

4.2. Amplificatoare elementare

Un etaj al unui amplificator, care conține ca element activ un tranzistor, poate fi redus la o schemă elementară, simplificată. Atât pentru amplificatoarele cu tranzistoare bipolare cât și pentru amplificatoarele cu TEC există trei variante de scheme elementare care depind de *conexiunea tranzistoarelor*.

4.2.1. Conexiunile tranzistoarelor

Prin noțiunea de *conexiune* se introduce un mod de a privi un tranzistor, element cu trei terminale, ca un cuadripol, un element cu patru terminale, două de intrare și două de ieșire. Sunt trei variante de conexiune, obținute prin alegerea unuia dintre terminale comun atât la intrare cât și la ieșire. Astfel, pentru tranzistoarele bipolare există conexiunile emitor comun, prescurtat EC, bază comună, BC și colector comun, CC (figura 4.12.).

Similar, pentru TEC există conexiunile sursă comună SC, grilă comună GC și drenă comună DC.

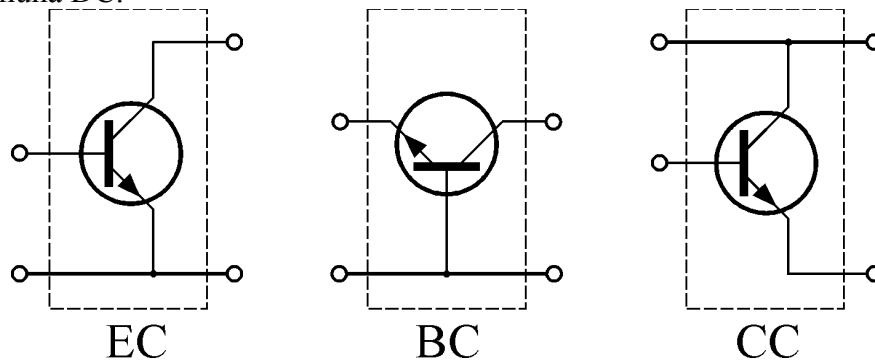


Fig. 4.12. Tranzistorul în conexiune emitor comun, EC, bază comună, BC, colector comun, CC.

4.2.2. Schemele amplificatoarelor elementare cu tranzistoare bipolare

Amplificatoarele de semnal mic cu tranzistoare bipolare au la baza cele trei scheme elementare din figura 4.13 în care tranzistoarele funcționează în conexiune EC (figura 4.13.a), în conexiune BC (figura 4.13.b) și în conexiune CC (figura 4.13.c). Pentru ultima variantă este mai puțin clar că tranzistorul este cu adevărat în conexiune CC, cu alte cuvinte că are colectorul comun la ieșire și intrare, dar acest lucru va deveni evident când se va face analiza în c.a.

Amplificatoarele elementare au, pe lângă elementul amplificator, sursa de tensiune continuă și o rezistență care este aici rezistență de sarcină și care transformă variațiile de curent ale generatorului de curent care este de fapt tranzistorul în variații de tensiune. Curentul de ieșire al amplificatoarelor elementare este în acest caz chiar curentul prin rezistența de sarcina.

În practică amplificatoarele elementare sunt completate cu elemente de polarizare și cuplaj. Comparăția între cele trei variante se va face prin analiza

simplificată a fiecărei scheme la frecvențe joase sau medii, calculând parametrii principali (amplificările de tensiune și curent și rezistențe de intrare și ieșire).

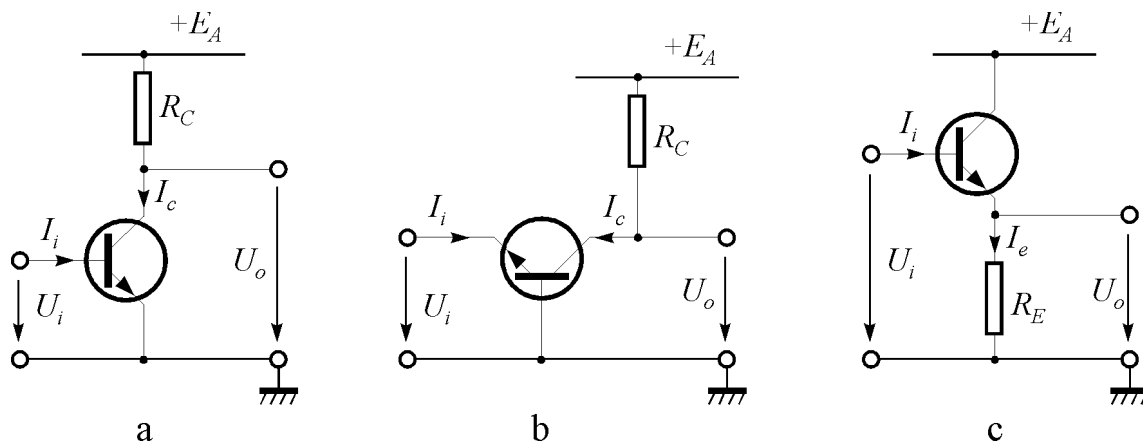


Fig. 4.13. Schemele amplificatoarelor elementare cu tranzistoare bipolare: a) amplificator în conexiune EC; b) amplificator în conexiune BC; c) amplificator în conexiune CC

4.2.3. Amplificator elementar în conexiune emitor comun

Pentru amplificatorul în conexiune EC (figura 4.13.a), schema echivalentă de semnal mic este aceea din fig. 4.14., unde s-a utilizat pentru tranzistor schema simplificată naturală din figura 4.10.c, cu rezistența r_x considerată zero.

Calculul pentru parametrii principali sunt:

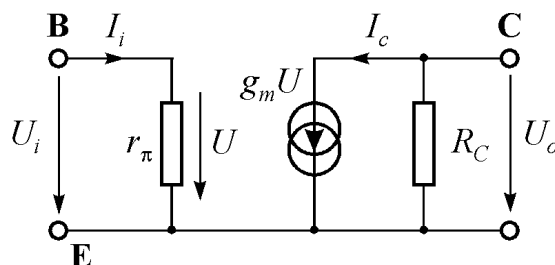


Fig. 4.14. Schema echivalentă de semnal mic a amplificatorului elementar în conexiune EC

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = r_\pi = h_{11e}; \quad (4.19)$$

$$A_i = \frac{I_c}{I_i} = \frac{g_m U}{\frac{U}{r_\pi}} = g_m r_\pi = \beta = h_{21e}; \quad (4.20)$$

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-R_C I_c}{U} = -g_m R_C = -\frac{\beta R_C}{r_\pi} = -\frac{h_{21e} R_C}{h_{11e}}; \quad (4.21)$$

Rezistența echivalentă la ieșire se calculează pe schema echivalentă de semnal mic cu intrarea în scurtcircuit la care se aplică la bornele de ieșire o sursă de tensiune de test, U_t . Se evaluează curentul sursei, I_t , iar rezistența de ieșire este raportul acestora.

În cazul amplificatorului elementar în conexiune EC circuitul de calcul este prezentat în figura 4.15.a. Intrarea fiind în scurtcircuit, tensiunea de intrare și curentul

de intrare sunt zero și la fel tensiunea U de unde rezultă un curent zero prin generatorul de curent din colector și deci curent I_c zero, adică generatorul de curent dintre colector și emitor este echivalent unui gol, figura 4.15.b. Rezultă imediat că:

$$R_0 = \frac{U_t}{I_t} = R_C \quad (4.22)$$

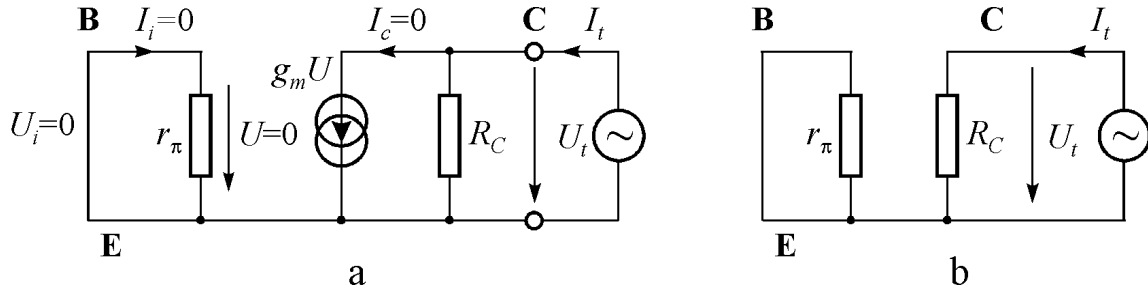
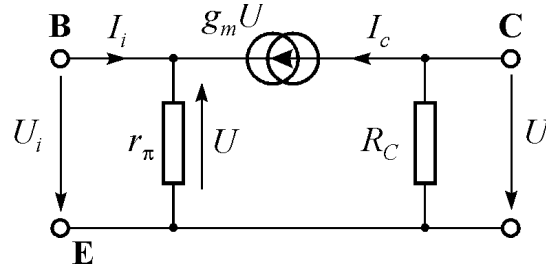


Fig. 4.15. Scheme pentru calculul rezistenței de ieșire: inițială (a); cu generatorul de curent echivalat cu un gol (b).

4.2.4. Amplificator elementar în conexiune bază comună

Pentru conexiunea bază comună, BC, schema echivalentă de semnal mic este aceea din figura 4.16.

Calculul pentru parametrii principali sunt:



$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{-U}{-(\frac{U}{r_\pi} + g_m U)} = \frac{r_\pi}{1 + g_m r_\pi} = \frac{r_\pi}{1 + \beta} \cong \frac{r_\pi}{\beta} \cong \frac{h_{ie}}{\beta} \quad (4.23)$$

Fig. 4.16. Schema echivalentă de semnal mic a amplificatorului elementar în conexiune BC

Considerând R_C rezistență de sarcină și corespunzător I_c curentul de ieșire:

$$A_i = \frac{I_c}{I_i} = \frac{g_m U}{-(\frac{U}{r_\pi} + g_m U)} = \frac{g_m r_\pi}{1 + g_m r_\pi} = -\frac{\beta}{1 + \beta} \cong -1; \quad (4.24)$$

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-g_m U R_C}{-U} = g_m R_C = \frac{\beta R_C}{r_\pi} = \frac{h_{21e} R_C}{h_{11e}} \quad (4.25)$$

Rezistența de ieșire se calculează similar ca în cazul conexiunii EC, adică cu intrarea în scurtcircuit și are aceeași valoare (intrarea în scurtcircuit înseamnă $U_i = 0$, rezultă U și deci $I_c = 0$ și circuitul e similar figurii 4.15.b):

$$R_o = R_C \quad (4.26)$$

4.2.5. Amplificator elementar în conexiune colector comun

Pentru conexiunea colector comun, CC, schema echivalenta de semnal mic este prezentată în figura 4.17.a.

Calcululele pentru parametrii principali sunt:

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{r_\pi \cdot I_i + R_E I_e}{I_i} = \frac{r_\pi I_i + R_E (I_i + g_m r_\pi I_i)}{I_i} \quad (4.27)$$

$$= r_\pi + (g_m r_\pi + 1)R_E = r_\pi + (\beta + 1)R_E \cong r_\pi + \beta R_E = h_{11e} + h_{21e} R_E.$$

$$A_i = \frac{I_e}{I_i} = \frac{I_i + g_m r_\pi I_i}{I_i} = 1 + g_m r_\pi \cong \beta = h_{21e}. \quad (4.28)$$

(R_E este aici rezistența de sarcină și I_E curentul de ieșire)

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_E (I_i + g_m r_\pi I_i)}{r_\pi + R_E (I_i + g_m r_\pi I_i)} = \frac{(g_m r_\pi + 1)R_E}{r_\pi + (g_m r_\pi + 1)R_E} \cong \frac{\beta R_E}{r_\pi + \beta R_E} = \frac{h_{21e} R_E}{h_{11e} + h_{21e} R_E} \quad (4.29)$$

Daca $h_{11e} \ll h_{21e} R_E$, ceea ce este cazul în majoritatea aplicațiilor practice, atunci:

$$A_u \sim 1. \quad (4.30)$$

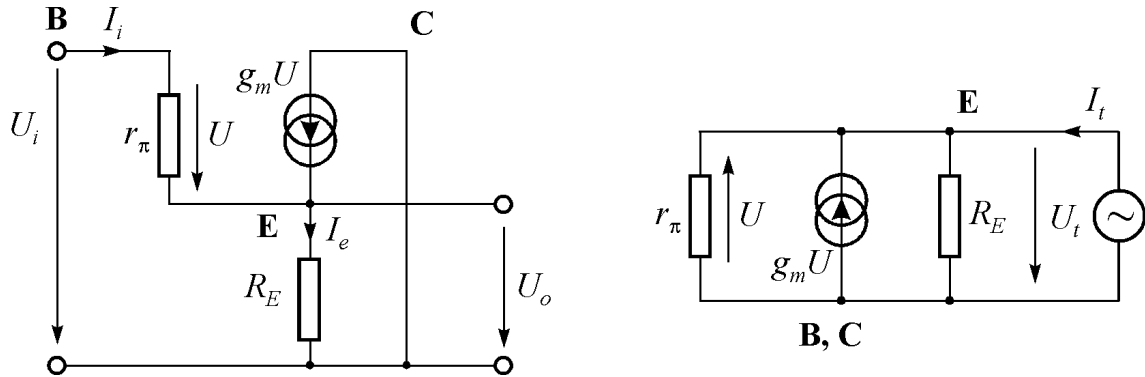


Fig. 4.17. Schema echivalentă de semnal mic a amplificatorului elementar în conexiune CC (a); schema de calcul a rezistenței de ieșire (b).

Pentru aflarea rezistenței de ieșire se aplică un generator de tensiune la bornele de ieșire, U_t (intrarea fiind în scurtcircuit), rezultând un curent I_t (fig. 4.17.b.). Raportul lor va fi rezistența de ieșire:

$$R_o = \frac{U_t}{I_t} = \frac{-U}{-(\frac{U}{r_\pi} + g_m U + \frac{U}{R_E})} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{r_\pi} + \frac{1}{R_E}} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R_E \parallel r_\pi}} = \frac{R_E \parallel r_\pi}{g_m R_E \parallel r_\pi + 1} \quad (4.31)$$

unde $R_E \parallel r_\pi$ este combinația paralel a celor două rezistențe.

Dacă neglijăm $\frac{1}{r_\pi}$ față de $g_m = \frac{\beta}{r_\pi}$, obținem:

$$R_o \cong R_E \parallel \frac{r_\pi}{\beta} = R_E \parallel \frac{h_{11e}}{h_{21e}} \quad (4.32)$$

4.2.6. Comparația tipurilor de amplificatoare elementare

Compararea performanțelor amplificatoarelor elementare se poate face urmărind tabelul 4.2 unde au fost grupați parametrii în variantele simplificate, conform relațiilor 4.19 - 4.32.

Fiecare dintre cele trei conexiuni are avantaje și dezavantaje care le fac utile doar în anumite situații.

Dintre cele trei conexiuni cea mai utilizată în practica este conexiunea EC.

În primul rând conexiunea EC are cea mai mare amplificare de putere, proporțională cu pătratul factorului de amplificare în curent, β , pe când la celelalte două variante amplificarea de putere este proporțională cu β .

Amplificările de tensiune și curent sunt de valoare ceva mai mică, proporționale cu β . Tensiunea de ieșire este defazată cu 180° față de tensiunea de intrare, de unde semnul minus din expresia A_u .

Rezistența de intrare a etajului este chiar rezistența de intrare a tranzistorului, r_π , relativ mică, iar rezistența de ieșire este aproximativ egală cu rezistența de colector.

Tabelul 4.2. Valorile parametrilor principali ai amplificatoarelor elementare.

Mărimea	A_i	A_u	A_p	R_i	R_o
Conexiunea					
EC	β	$-\frac{\beta R_C}{r_\pi}$	$\frac{\beta^2 R_C}{r_\pi}$	r_π	R_C
BC	-1	$\frac{\beta R_C}{r_\pi}$	$\frac{\beta R_C}{r_\pi}$	$\frac{r_\pi}{\beta}$	R_C
CC	β	1	β	$r_\pi + \beta R_E$	$\frac{r_\pi}{\beta} \parallel R_E$

Conexiunea BC are ca dezavantaj principal rezistența de intrare foarte mică, ceea ce impune un generator la intrare cu rezistență internă foarte mică. Are însă un avantaj important și anume că amplificarea se menține ridicată până la frecvențe mult mai mari decât în cazul celorlalte două conexiuni. Dacă la conexiunea BC frecvența superioară este la nivelul f_α , în cazul conexiunilor EC și CC aceasta este de β ori mai mică, la nivelul $f_\beta = \frac{f_\alpha}{\beta}$. Astfel conexiunea BC este utilizată îndeosebi în cazul amplificatoarelor de înaltă frecvență.

Conexiunea CC are în principal avantajele unei rezistențe mari de intrare și a unei rezistențe mici de ieșire și este utilizată din acest motiv la etaje tampon care asigură adaptarea unui generator cu rezistența internă mai mare la o sarcină de valoare mică. Dezavantajul este amplificarea de tensiune, egală aproximativ cu unitatea. Tensiunea de la ieșire (la emitorul tranzistorului) este deci aproximativ egală cu aceea de la intrare, motiv pentru care etajul amplificator în conexiune CC este cunoscut sub numele de *repetor pe emitor*.

4.2.7. Influența rețelei de polarizare

Performanțele acestor variante elementare pot fi serios modificate de rețeaua de polarizare a tranzistorului. Aceasta este compusă în cazul general dintr-una sau două rezistențe de polarizare a bazei și din rezistența din emitor pentru stabilizare termică

Se vor analiza pe rând efectele fiecărui element al rețelei de polarizare. Analiza se face întâi pentru cazul amplificatorului în conexiune EC în variantă simplificată și frecvențe medii și este extinsă apoi și pentru celelalte conexiuni.

Influența rezistențelor de polarizare a bazei

Cel mai simplu mod de a polariza baza unui tranzistor bipolar *nnp*, indiferent de conexiune, este conectarea ei printr-o rezistență la borna pozitivă a sursei de alimentare (figura 4.18.a). Schema echivalentă în acest caz este aceea din figura 4.18.b. Schema echivalentă este similară cu cazul amplificatorului elementar în conexiune EC, figura 4.14., cu deosebirea că la intrare există două rezistențe în paralel, r_π și R_B .

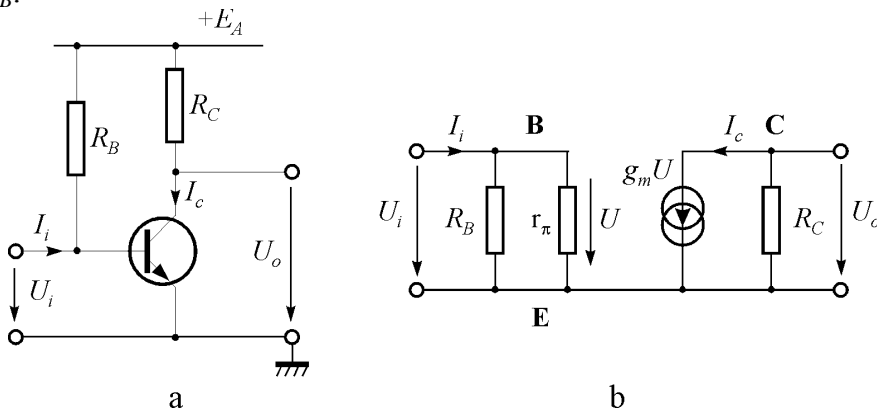


Fig. 4.18. Amplificator în conexiune EC cu o rezistență de polarizare a bazei (a) și schema echivalentă (b).

Calcululele pentru parametrii principali sunt similare celor pentru amplificatorul elementar:

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = r_\pi // R_B = h_{11e} // R_B; \quad (4.33)$$

$$A_i = \frac{I_c}{I_i} = \frac{g_m U}{\frac{U}{R_B} + \frac{U}{r_\pi}} = g_m r_\pi // R_B = \beta \frac{R_B}{r_\pi + R_B} = h_{21e} \frac{R_B}{r_\pi + R_B}; \quad (4.34)$$

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-R_C I_c}{U} = -g_m R_C = -\frac{\beta R_C}{r_\pi} = \frac{h_{21e} R_C}{h_{11e}}; \quad (4.35)$$

$$R_o = R_C \quad (4.36)$$

Amplificarea de tensiune nu este modificată. La fel rezistența de ieșire, schema de calcul a acesteia fiind în acest caz similară cu aceea din figura 4.15.b unde se poate vedea că rezistența de la intrare nu intervine în rezultatul final.

Se modifică rezistența de intrare care devine egală cu combinația paralel a rezistenței de intrare a tranzistorului cu rezistența de polarizare a bazei, fapt ce este evident și din examinarea directă a schemei echivalente.

Se modifică de asemenea amplificarea de curent care este acum mai mică decât factorul de amplificare în curent cu un raport similar celui de la divizorul de curent (figura 1.x).

Modificările sunt în realitate mici, pentru că obișnuit:

$$R_B \gg r_\pi \quad (4.37)$$

și atunci rezistența de intrare, combinația $R_B \parallel r_\pi$ are o valoare ceva mai mică dar apropiată de r_π și similar amplificarea de curent are o valoare ceva mai mică dar apropiată de β . Dacă însă condiția 4.37 nu este îndeplinită atunci modificările rezistenței de intrare și a amplificării de curent sunt mai importante.

Dacă polarizarea se face cu un divizor rezistiv ca în figura 4.19.a (cu schema echivalentă din figura 4.19.b), atunci se observă că suntem de fapt într-un caz similar cu cel anterior, diferența fiind doar că în locul R_B apare combinația paralel $R_{B1} \parallel R_{B2}$. Astfel formulele 4.33 – 4.36 sunt valabile și în acest caz.

Influența rețelei de polarizare este mai mare în cazul de față fiindcă R_{B2} este de valoare mai mică și combinația paralel $R_{B1} \parallel R_{B2}$ este de obicei comparabilă cu rezistența de intrare a tranzistorului, r_π .

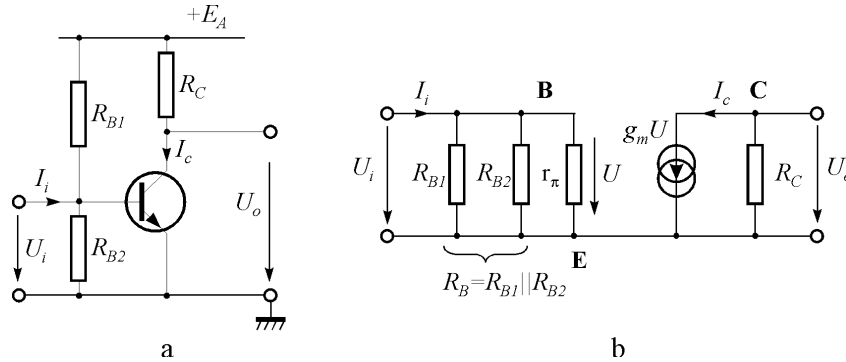


Fig. 4.19. Amplificator în conexiune EC cu divizor de polarizare a bazei (a) și schema echivalentă (b).

Influența rezistenței de emitor

Se analizează acum doar influența rezistenței de emitor, R_E , numită și rezistență de stabilizare termică pentru că diminuează influența temperaturii asupra punctului static de funcționare al tranzistorului. Schema și schema echivalenta sunt prezentate în figura 4.20.

Observație: Nu mai avem aici de fapt conexiune EC pentru tranzistor, emitorul nu este comun la intrare și ieșire. Se va vedea în paragraful următor cum se va ajunge totuși la conexiune Ec pentru regimul de curent alternativ.

În continuare sunt calculele pentru parametrii principali.

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U + R_E I_e}{\frac{U}{r_\pi}} = \frac{U + (\frac{U}{r_\pi} + g_m U) R_E}{\frac{U}{r_\pi}} = r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E \cong \quad (4.38)$$

$$\cong r_\pi + g_m r_\pi R_E = r_\pi + \beta R_E = h_{11e} + h_{21e} R_E$$

Se observă că R_E mărește mult rezistența de intrare a amplificatorului, efectul fiind proporțional cu factorul de amplificare în curent, β .

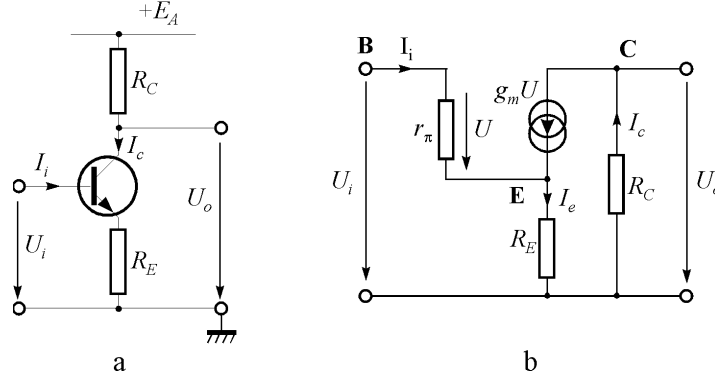


Fig. 4.20. Amplificator cu rezistență de emitor (a) și schema echivalentă (b).

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-R_C I_c}{U + R_E I_e} = \frac{-g_m U R_C}{U + (\frac{U}{r_\pi} + g_m U) R_E} = \frac{-g_m r_\pi R_C}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} \cong \quad (4.39)$$

$$\cong -\frac{g_m r_\pi R_C}{r_\pi + g_m r_\pi R_E} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi + \beta R_E} = -\frac{h_{21e} R_C}{h_{11e} + h_{21e} R_E}$$

Rezistența R_E micșorează amplificarea de tensiune, termenul de la numitor fiind chiar rezistența de intrare, mărită.

O situație specială este în cazul des întâlnit când rezistența R_E este de o valoare comparabilă cu rezistența de intrare a tranzistorului r_π , este îndeplinită condiția:

$$\beta R_E \gg r_\pi \quad (4.40)$$

și se poate neglija r_π astfel că amplificarea de tensiune devine:

$$A_u = \frac{R_C}{R_E} \quad (4.41)$$

Amplificarea de tensiune este o constantă, fiind un raport de rezistențe. Acesta este un rezultat important, fiindcă amplificarea este predictibilă și nu mai depinde de

parametrii tranzistorului, β și r_π , care variaza mult de la tranzistor la tranzistor chiar pentru un același tip de tranzistor. De fapt această insensibilizare a amplificării la variația parametrilor tranzistorului este un efect al reacției negative, care face subiectul unui paragraf distinct.

Rezistența R_E nu schimbă amplificarea de curent față de cazul amplificatorului elementar, așadar relația (4.20) rămâne neschimbată..

Pentru calculul rezistenței de ieșire se procedează similar cu cazul amplificatorului elementar în conexiune CC. Schema echivalenta de calcul, după pasivizarea intrării, este prezentată în figura 4.21.

Teorema întâia a lui Kirchhoff în emitor conduce la ecuația:

$$g_m U + \frac{U}{r_\pi} + \frac{U}{R_E} = 0$$

Dar g_m , r_π și R_E sunt mărimi pozitive astfel că rezultă:

$$U=0$$

și deci generatorul de curent este, ca și în cazul amplificatorului elementar în conexiune EC, figura 4.15, un gol (curentul este zero) și la fel ca acolo rezistența de ieșire este dată de relația 4.22.

4.2.8. Amplificatoare elementare cu TEC

Variantele elementare ale amplificatoarelor cu TEC sunt aceleași ca în cazul utilizării tranzistoarelor bipolare și schemele echivalente simplificate sunt asemănătoare (fig.1.17). La TEC nu mai apare r_B considerată infinită într-o primă aproximatie. Calcule similare cu cele anterioare conduc la următoarele performanțe:

$$\text{- conexiunea sursă comună (SC): } A_u = -g_m R_D \quad (4.42)$$

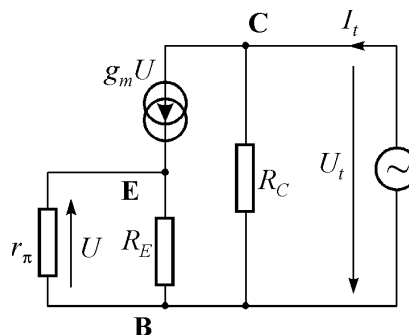
$$R_o = R_D \quad (4.43)$$

$$\text{- conexiunea drenă comună (DC): } A_u = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} \cong 1 \quad (4.44)$$

$$R_o = R_s \parallel \frac{1}{g_m} \quad (4.45)$$

$$\text{- conexiunea grila comună (GC): } A_u = g_m R_D \quad (4.46)$$

Rezistența de intrare fiind considerată infinită pentru toate conexiunile. Pentru amplificatoarele cu TEC rețeaua de polarizare are ca principal efect micșorarea rezistenței de intrare la valoarea rezistenței echivalente de polarizare.



4.21. Schema de calcul a rezistenței de ieșire cu rezistență de emitor