

## Capitolul 7

### 7. AMPLIFICATOARE ELECTRONICE

#### 7.1. Parametrii amplificatoarelor

Un amplificator este un circuit electronic care mărește puterea unui semnal electric, lăsând neschimbată variația lui în timp. Pentru a putea îndeplini această funcție, un amplificator trebuie prevăzut cu sursă de energie electrică, pe seama căreia se obține sporul de putere de la ieșire și cu elemente active capabile să transforme în energie de curent alternativ, variabil în ritmul semnalului, o parte din energia absorbită de la sursa de alimentare.

Cu ajutorul unui tranzistor se poate obține o amplificare în putere, în tensiune sau în curent.

Structura amplificatoarelor este complexă, acestea conținând în mod frecvent mai multe tranzistoare. Gradul de complexitate și varietatea schemelor depind de o serie de factori cum ar fi: nivelul semnalului de intrare, nivelul semnalului de ieșire, banda de frecvență, fidelitatea redării, etc.

Reprezentarea unui amplificator sub formă de cuadripol se poate face ca în figura 7.1.

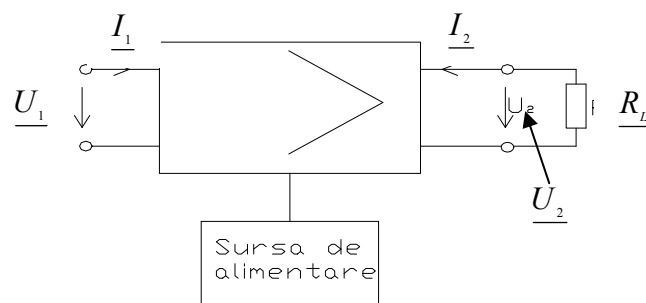


Fig. 7.1. Amplificatorul reprezentat ca un cvadripol.

*Parametrii (performanțele)* unui amplificator caracterizează circuitul din punctul de vedere al ansamblului pe care îl reprezintă, nefăcându-se referire la structura internă. Pentru un amplificator se pot defini astfel parametri de intrare, de ieșire și de transfer.

a) Parametri de intrare

- Gama tensiunilor ce se pot aplica la intrare reprezintă domeniul de valori pe care le poate lua semnalul de la intrare astfel încât amplificatorul să nu se distrugă sau să determine schimbarea regimului de lucru.

- Impedanța de intrare este impedanța echivalentă la bornele de intrare, atunci când la bornele de ieșire este conectată impedanța de sarcină nominală. Acest parametru caracterizează încărcarea produsă de intrarea amplificatorului asupra sursei de semnal, sau altfel spus, cum simte generatorul de semnal circuitul de amplificare. Impedanța de intrare se definește prin relația

$$\underline{Z}_1 = \frac{U_1}{I_1}.$$

Utilizarea mărimilor complexe pentru descrierea impedanței de intrare este necesară deoarece aceasta este formată, în general, dintr-o parte activă (rezistență) și dintr-o parte reactivă (capacitate cel mai des). Ca urmare, impedanța de intrare este dependentă de frecvență, intrarea amplificatorului comportându-se diferit în funcție de frecvența de lucru. Impedanța de intrare a unui amplificator trebuie să fie cât mai mare și să nu varieze cu frecvența de lucru.

b) Parametri de ieșire

- Gama de tensiuni / curenți la ieșire reprezintă domeniul de valori pe care le poate lua tensiunea / curentul de ieșire din amplificator. Pentru valori ale semnalului de ieșire cuprinse în acest interval, semnalul nu este distorsionat.

- Impedanța de ieșire este impedanța internă a generatorului echivalent între bornele de ieșire ale amplificatorului și se definește cu ajutorul relației

$$\underline{Z}_2 = \frac{U_2}{I_2} \Big|_{\underline{U}_S=0},$$

în care  $\underline{U}_S$  este tensiunea generatorului de semnal conectat la bornele de intrare ale amplificatorului.

Pentru semnale de ieșire de tip tensiune, impedanța de ieșire trebuie să fie cât mai mică.

c) Parametri de transfer

Amplificarea se definește ca raportul dintre mărimea de ieșire și mărimea de intrare. Se pot defini:

- Amplificarea în tensiune prin relația

$$\underline{A}_u = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = A(\omega) \cdot e^{j\phi(\omega)}$$

- Amplificare în curent

$$\underline{A}_i = \frac{I_2}{I_1}$$

- Amplificare în putere

$$A_p = \frac{P_2}{P_1}$$

unde  $P_1$  este puterea la intrare și  $P_2$  este puterea la ieșire.

Relațiile de mai sus consideră amplificarea ca o mărime adimensională, deoarece se exprimă prin raportul a două mărimi de același tip.

Există aplicații în care domeniul de variație al amplificării este mare și utilizarea unei scări logaritmice este mai avantajoasă. De asemenea, dacă mai multe etaje de amplificare sunt conectate în cascadă, scara logaritmică permite calcularea amplificării totale prin sumarea amplificărilor parțiale ale fiecărui etaj în parte. Amplificarea se exprimă în decibeli (dB).

Amplificarea în tensiune

$$A_u = 20 \cdot \lg(A_u) = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ [dB]}$$

Amplificarea în curent

$$A_i = 20 \cdot \lg(A_i) = 20 \cdot \lg \frac{I_2}{I_1} \text{ [dB]}$$

Amplificarea în putere

$$A_p = 20 \cdot \lg(A_p) = 20 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ [dB]}$$

Amplificarea măsurată în decibeli se numește *câștig* (*gain* în limba engleză).

## 7.2. Caracteristicile amplificatoarelor

a) *Caracteristica intrare-ieșire*  $u_2 = f(u_1)$  (vezi figura 7.2) reprezintă dependența mărimii de ieșire de mărimea de intrare.

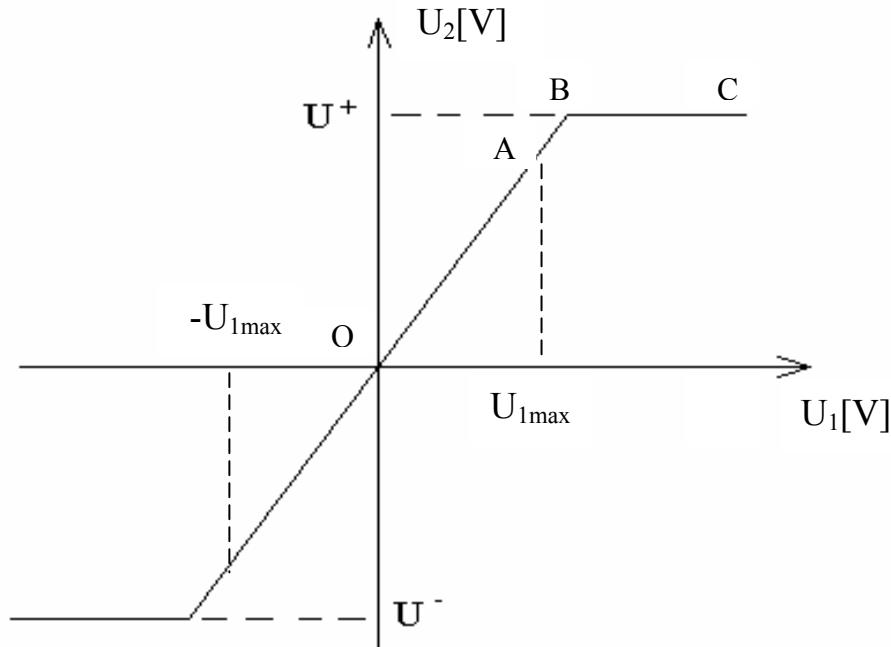


Fig. 7.2. Caracteristica intrare-ieșire a amplificatorului.

Se evidențiază o zonă liniară (OA), de obicei simetrică în jurul originii, o zonă neliniară (AB) și o zonă neliniară de saturație (BC). Depășirea valorii maxime a semnalului de intrare determină intrarea în regim de funcționare neliniară a amplificatorului. Efectul neliniarității conduce la distorsionarea semnalului de la ieșirea amplificatorului. Aceste distorsiuni se numesc distorsiuni de neliniaritate.

b) *Caracteristicile de frecvență* se referă la reprezentarea evoluției unui parametru al amplificatorului în funcție de frecvență. În mod curent se folosesc două astfel de caracteristici: caracteristica amplitudine-frecvență și caracteristica fază-frecvență.

b<sub>1</sub>) *Caracteristica amplitudine-frecvență* (fig. 7.3) caracterizează un amplificator, ce funcționează în porțiunea liniară a caracteristicii intrare-ieșire, funcție de frecvența semnalului de la intrare. Se determină în regim sinusoidal.

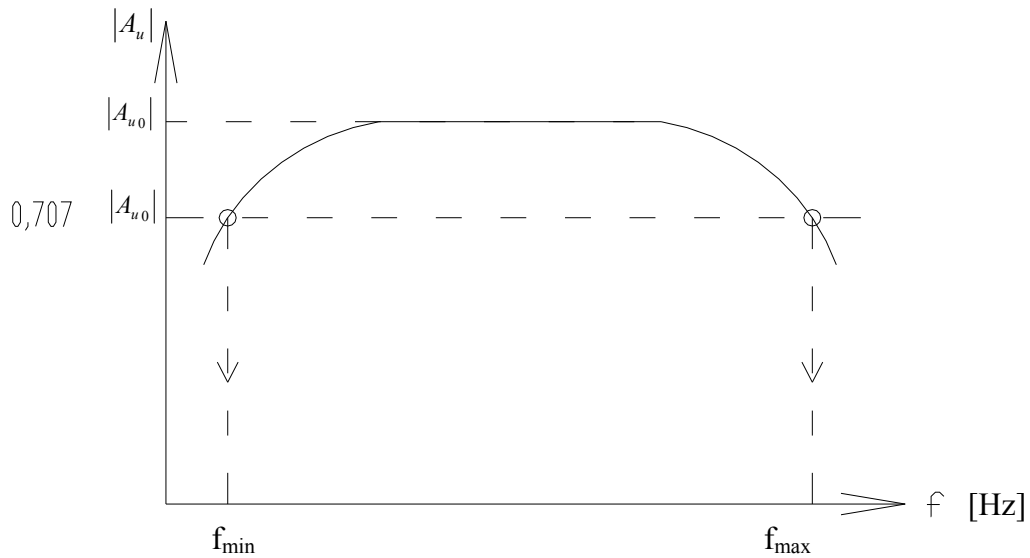


Fig. 7.3. Caracteristica amplitudine-frecvență a amplificatorului.

Domaniul de frecvență în care amplificarea rămâne aproximativ constantă determină *banda de trecere* sau *banda de frecvență* a amplificatorului. În figura 7.3 s-au definit două frecvențe,  $f_{min}$  și  $f_{max}$  ce corespund scăderii amplificării  $A$  de la  $A_0$  la  $0,707A_0$ . Diferența celor două frecvențe constituie banda de trecere la 3 dB (corespunzătoare scăderii amplificării la  $0,707$  din  $A_0$ . Cele două frecvențe se mai notează  $f_j$  și  $f_s$  și se numesc frecvența limită de jos, respectiv, frecvența limită de sus pentru banda de frecvență.

b<sub>2</sub>) *Caracteristica fază-frecvență* reprezintă dependența defazajului introdus de amplificator în funcție de frecvență. Pentru ca semnalul amplificat să aibă aceeași formă cu semnalul de la intrare, trebuie ca defazajul introdus de amplificator să fie zero sau să existe o dependență liniară de frecvență.

*Concluzie.* Corespunzător caracteristicilor definite până acum, un amplificator poate distorsiona semnalul de la intrare prin două mecanisme:

1. prin neliniaritate, când semnalul de intrare este mai mare decât limitele corespunzătoare domeniului de liniaritate;
2. prin filtrare, când banda de frecvență a semnalului de intrare este mai mare decât banda amplificatorului. Acestea se numesc distorsiuni de frecvență.

### 7.3. Clasificarea amplificatoarelor

a) După banda de frecvență transmisă:

- amplificatoare de curent continuu, care transmit banda de frecvență cuprinsă între zero și o frecvență oarecare  $f$ ;
- amplificatoare de bandă largă, care transmit o bandă de frecvență ( $f_j \dots f_s$ ) în care raportul  $\frac{f_s}{f_j} = 10 \dots 10^5$ ; s-au notat  $f_j$  – frecvența limită de jos și  $f_s$  – frecvența limită de sus.

- amplificatoare selective, care au raportul  $\frac{f_s}{f_j} = 1 \dots 1,2$ , deci transmit o bandă îngustă în jurul unei frecvențe fixe.

b) După amplitudinea semnalului amplificat:

- amplificatoare de semnal mic (amplificatoare de tensiune), la care variațiile de tensiune și curent corespundătoare semnalului de la intrare, sunt mici în raport cu valorile tensiunilor și curenților din punctul static de funcționare;
- amplificatoare de semnal mare la care variațiile semnalului de intrare sunt relativ mari în raport cu valorile din punctul static de funcționare, iar dispozitivul electronic lucrează la limita de funcționare liniară; se urmărește obținerea unei puteri mari la ieșire, motiv pentru care se numesc și amplificatoare de putere.

c) După valoarea frecvenței medii din spectrul semnalului amplificat:

- ✓ amplificatoare de frecvență joasă, atunci când frecvența medie este mai mică de câțiva zeci de kHz;
- ✓ amplificatoare de frecvență medie, atunci când frecvența medie este de sute de kHz până la câțiva MHz;
- ✓ amplificatoare de frecvență înaltă, cu frecvența medie de zeci de MHz.

## 7.4. Analiza unui circuit de amplificare de semnal mic la frecvențe joase cu ajutorul parametrilor hibridi

Considerăm un circuit de amplificare, realizat cu un tranzistor bipolar cu joncțiuni, care are conectat la intrare un generator de semnal  $u_s$ ,  $\underline{Z}_s$ , iar la ieșire are conectată o impedanță de sarcină  $\underline{Z}_L$  (fig. 7.4). Se folosește modelul cu parametri hibridi al tranzistorului biopolar cu joncțiuni, stabilit prin relațiile 3.18 și 3.19.

Reamintim semnificațiile parametrilor hibridi:

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{impedanța de intrare, ieșirea fiind în scurtcircuit;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{raportul dintre tensiunea de intrare și tensiunea de ieșire}$$

(coeficientul de transfer invers), cu intrarea în gol;

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{amplificarea în curent (coeficientul de transfer al curentului) cu}$$

ieșirea în scurtcircuit;

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{admitanța de ieșire, intrarea fiind în gol.}$$

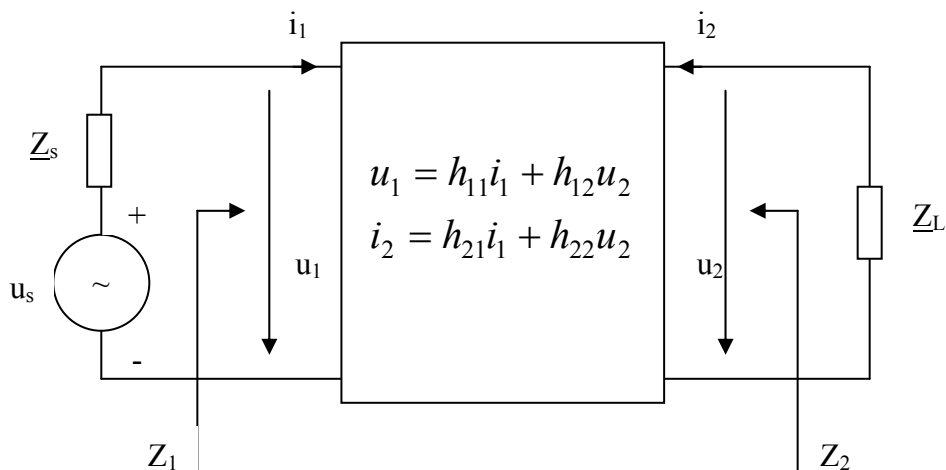


Fig. 7.4.

Se vor stabili pentru acest circuit electronic expresiile de calcul ale amplificării în curent  $\underline{A}_i = \frac{i_L}{i_1}$ , impedanței de intrare  $\underline{Z}_1 = \frac{u_1}{i_1}$ , amplificării în tensiune  $\underline{A}_u = \frac{u_2}{u_1}$ , impedanței de ieșire  $\underline{Z}_2 = \frac{u_2}{i_2} \Big|_{u_s=0}$ , admitanței de ieșire  $\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2}$ .

Folosind modelul cu parametri hibridi al tranzistorului, circuitul din figura 7.4 poate fi reprezentat ca în figura 7.5.

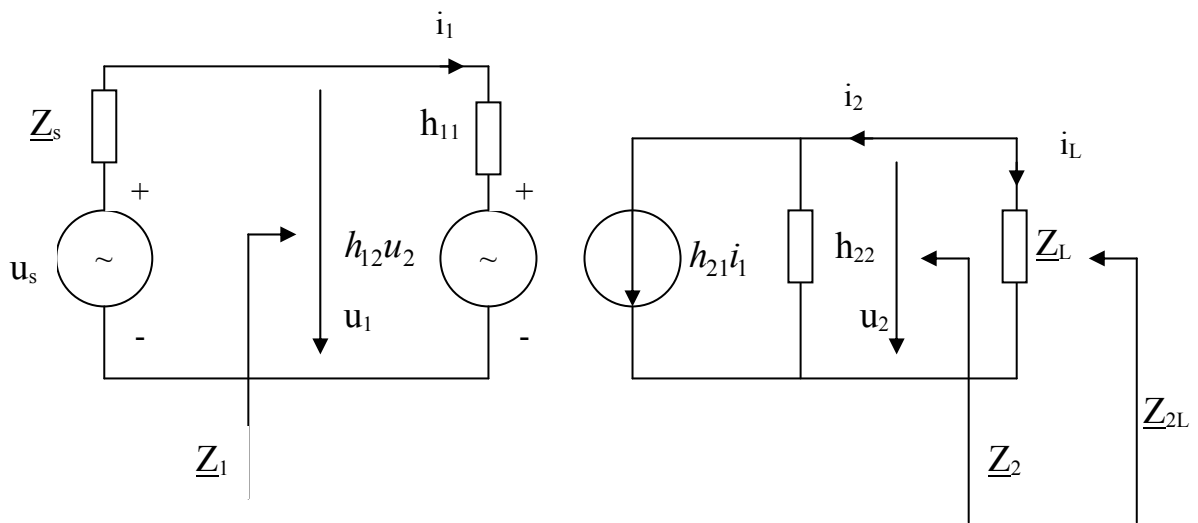


Fig. 7.5.

### Amplificarea în curent

$$\underline{A}_i = \frac{i_L}{i_1} = \frac{-i_2}{i_1} \quad u_2 = i_L Z_L = -i_2 Z_L$$

$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} u_2$$

$$\text{Rezultă că } i_2 = h_{21} i_1 - h_{22} Z_L i_2 \quad i_2 (1 + h_{22} Z_L) = h_{21} i_1$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{h_{21}}{1 + h_{22} Z_L}$$

$$\underline{A}_i = -\frac{i_2}{i_1} = -\frac{h_{21}}{1 + h_{22} Z_L}$$

### Impedanța de intrare

$$\underline{Z}_1 = \frac{u_1}{i_1} \quad u_1 = h_{11} i_1 + h_{12} u_2 \quad u_2 = i_L Z_L = -i_2 Z_L \quad u_1 = h_{11} i_1 - h_{12} Z_L i_2$$



$$\frac{u_1}{i_1} = h_{11} - h_{12} Z_L \frac{i_2}{i_1} = h_{11} + h_{12} Z_L A_i$$

$$\underline{Z}_1 = h_{11} + h_{12} \underline{Z}_L A_i = h_{11} + h_{12} Z_L \frac{(-h_{21})}{1 + h_{21} Z_L} = h_{11} - \frac{h_{12} h_{21} Z_L}{1 + h_{21} Z_L}$$

$$\underline{Z}_1 = h_{11} - \frac{h_{12} h_{21}}{h_{21} + \frac{1}{\underline{Z}_L}}$$

### *Amplificarea în tensiune*

$$\underline{A}_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-i_2 \underline{Z}_L}{i_1 \underline{Z}_1} = A_i \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_1}$$

### *Impedanța de ieșire*

$$\underline{Z}_2 = \left. \frac{u_2}{i_2} \right|_{\underline{U}_s=0}$$

Analizând circuitul de intrare din figura 7.5 (ținând seama de sensul curentului  $i_1$ , de polaritatea sursei de tensiune  $h_{12}u_2$  și de faptul că  $U_s=0$ ) se poate scrie:

$$0 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2 + Z_s i_1$$

$$0 = i_1(h_{11} + Z_s) + h_{12}u_2$$

$$i_1 = -\frac{h_{12}u_2}{h_{11} + \underline{Z}_s}$$

Folosim ecuația cu parametri hibridi  $i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2 = h_{21}\left(-\frac{h_{12}u_2}{h_{11} + \underline{Z}_s}\right) + h_{22}u_2$

$$\underline{Z}_2 = \left. \frac{u_2}{i_2} \right|_{\underline{U}_s=0} = \frac{u_2}{h_{21}\left(-\frac{h_{12}u_2}{h_{11} + \underline{Z}_s}\right) + h_{22}u_2} = \frac{1}{h_{22} - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{11} + \underline{Z}_s}}$$

### *Admitanța de ieșire*

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = h_{22} - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{11} + \underline{Z}_s}$$

### Exemplu

Considerăm un tranzistor de tipul BC 171A la care s-au măsurat parametrii hibridi (tabelul 7.1) pentru tensiunea colector-emitor  $U_{CE} = 5V$ , curentul de colector  $I_C = 2mA$ , frecvența  $f = 1kHz$ , temperatura  $t_A = 25^0 C$ . Se asigură pentru tranzistor același punct static de funcționare în diferite conexiuni: BC, EC, CC. Generatorul de semnal are  $R_s = 1k\Omega$  și sarcina este  $R_L = 2k\Omega$ .

Se calculează parametrii circuitului de amplificare de semnal mic și rezultatele sunt prezentate în tabelul 7.2.

(Tabelul 7.1)

BC	EC	CC
$h_{11b} = 12,2\Omega$	$h_{11e} = 2,7k\Omega$	$h_{11c} = 2,7k\Omega$
$h_{12b} = 0,69 \cdot 10^{-4}$	$h_{12e} = 1,5 \cdot 10^{-4}$	$h_{12c} = 1$
$h_{21b} = 0,995$	$h_{21e} = 220$	$h_{21c} = -221$
$h_{22b} = 0,081 \mu A/V$	$h_{22e} = 18 \mu A/V$	$h_{22c} = 18 \mu A/V$

(Tabelul 7.2)

	BC	EC	CC
$\underline{A}_i$	0,995	-212,3	213,3
$R_1$	12,3 $\Omega$	2,637 k $\Omega$	428,7 k $\Omega$
$\underline{A}_u$	161,7	-156,8	0,995
$R_2$	6,75 M $\Omega$	110 k $\Omega$	16,7 $\Omega$

Amplificările sunt negative la conexiunea emitor-comun (EC), deci aici se inversează faza semnalului de la ieșire față de semnalul de la intrare. Conexiunea EC este conexiune inversoare.

Amplificările sunt pozitive la conexiunile bază-comună (BC) și colector comun (CC). Conexiunile BC și CC sunt conexiuni neinversoare.

Semnalul de la ieșire este aproape egal cu semnalul de la intrare în conexiunea CC. Amplificarea în tensiune  $\underline{A}_u = 0,995$ , deci apropiată ca valoare de 1. Conexiunea CC se cunoaște și sub denumirea de *repetor pe emitor*.

## 7.5. Amplificatoare de bandă largă

### 7.5.1. Amplificator cu un etaj în conexiune emitor comun (EC)

Schema amplificatorului și formele semnalelor de intrare și de ieșire se prezintă în figura 7.6.

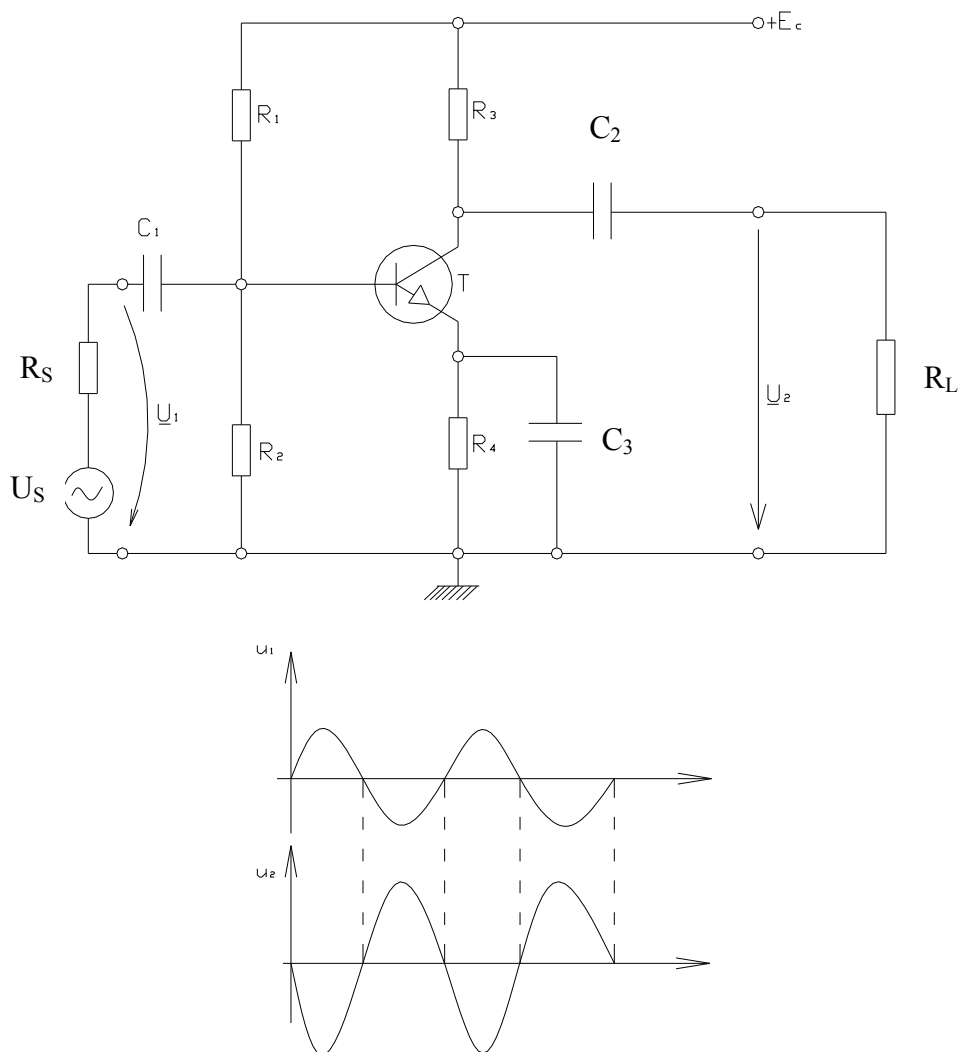


Fig. 7.6.

Amplificarea în tensiune  $A_u$  are valori de ordinul zecilor până la ordinul sutelor. Polarizarea și stabilizarea punctului static de funcționare al TBJ se realizează cu ajutorul unui circuit de polarizare cu rezistență în emitor ( $R_4$ ) și divizor de tensiune în bază ( $R_1, R_2$ ).

Condensatoarele  $C_1$  și  $C_2$  au rolul de a separa componenta continuă de componenta alternativă (blochează trecerea componentei continue).

În regimul dinamic, cu semnal sinusoidal aplicat la intrare, emitorul tranzistorului este legat la masă, deoarece condensatorul  $C_3$  se scurtcircuitează la frecvențe ridicate (condensator de decuplare a emitorului).

Semnalul sinusoidal de la intrare și cel de la ieșire sunt defazate cu  $180^\circ$  deoarece etajul de amplificare în conexiunea emitor comun este defazor.

### 7.5.2. Amplificator cu un etaj în conexiune bază comună (BC)

Schema amplificatorului se prezintă în figura 7.7.

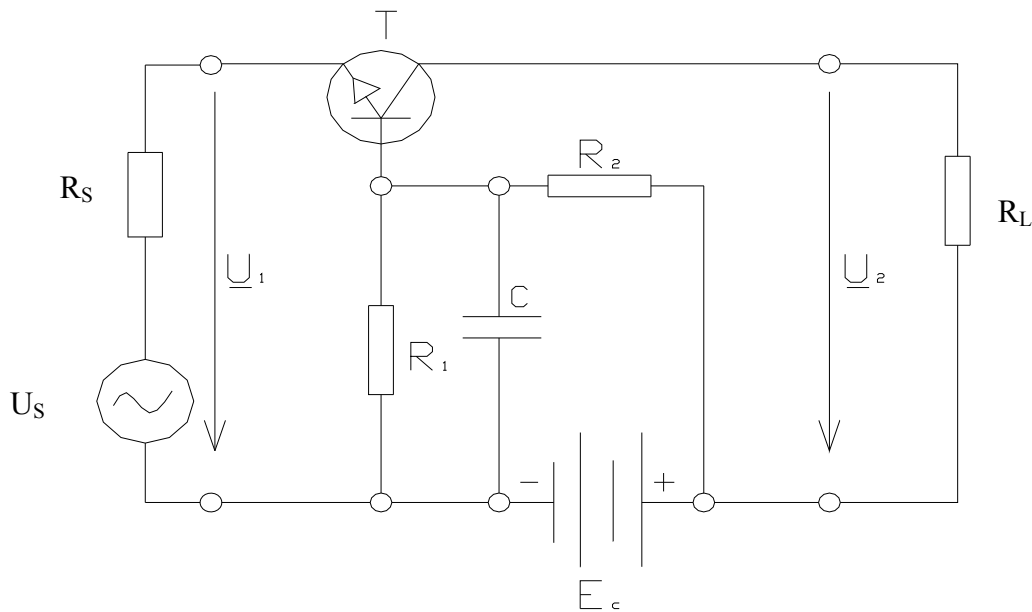


Fig. 7.7.

Rezistoarele  $R_1$  și  $R_2$  formează un divizor de tensiune pentru polarizarea bazei tranzistorului.

Condensatorul  $C$  se presupune scurtcircuitat în toată banda de lucru, iar generatorul de semnal  $U_s$  asigură închiderea căii de curent continuu (de exemplu are ieșirea prin transformator).

### 7.5.3. Amplificator cu un etaj în conexiune colector comun (CC)

Schema amplificatorului se prezintă în figura 7.8.

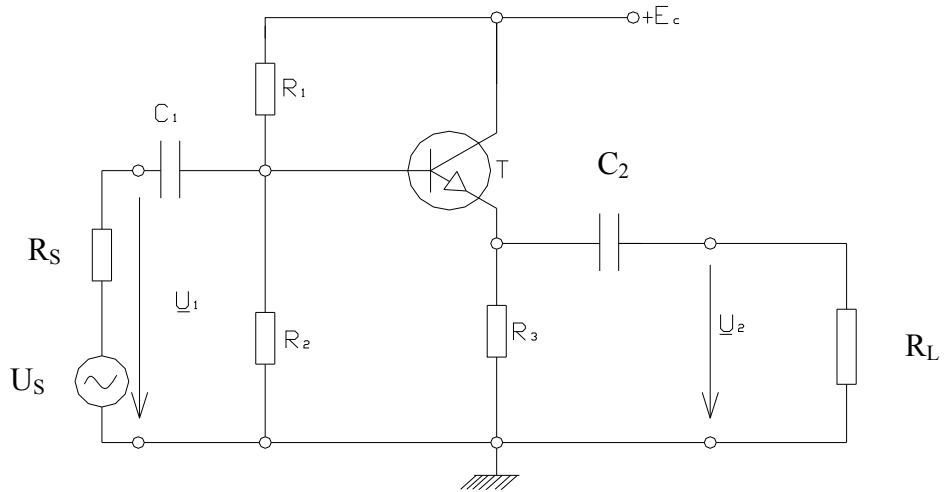


Fig. 7.8.

Polarizarea bazei tranzistorului este asigurată de rezistoarele  $R_1$  și  $R_2$ . Condensatoarele  $C_1$  și  $C_2$  blochează trecerea componentei continue. Semnalul de ieșire se culege din emitorul tranzistorului.