

4. AMPLIFICATOARE CU TRANZISTOARE

Capitolul este destinat amplificatoarelor cu tranzistoare, o a doua categorie fiind amplificatoarele operaționale, prezente mai ales sub formă integrată și prezentate într-un capitol separat. Se pornește de la structurile cele mai simple, amplificatoarele elementare cu un tranzistor și pe rând sunt analizate amplificatoarele de semnal mic cu un etaj sau mai multe etaje, cu sau fără reacție negativă. Urmează amplificatoarele de curent continuu (c.c.) și amplificatoarele de putere. Un paragraf final prezintă oscilatoarele armonice cu tranzistoare.

4.1. Probleme generale

În paragraful de față sunt prezentate probleme generale ale amplificatoarelor, fie ele cu tranzistoare sau cu amplificatoare operaționale dar și probleme specifice amplificatoarelor cu tranzistoare. Problemele generale sunt structura unui etaj sau a unui lanț de amplificare, parametrii principali, caracteristicile grafice, modul de analiza. Probleme specifice sunt clasele de funcționare sau schemele echivalente utilizate pentru analiza amplificatoarelor cu tranzistoare.

4.1.1. Structura amplificatoarelor

Amplificatoarele electrice sunt circuite care realizează mărirea nivelului de putere al unui semnal electric cu modificări minime ale formei semnalului (distorsiuni minime).

Elementul principal al unui amplificator este un dispozitiv activ de circuit (tranzistor, tub electronic). Acesta este comandat de semnal și controlează puterea debitată de o sursă de alimentare de curent continuu într-o impedanță de sarcină. Deci amplificatoarele sunt în mod necesar alimentate de la o sursă de curent continuu (baterie, redresor).

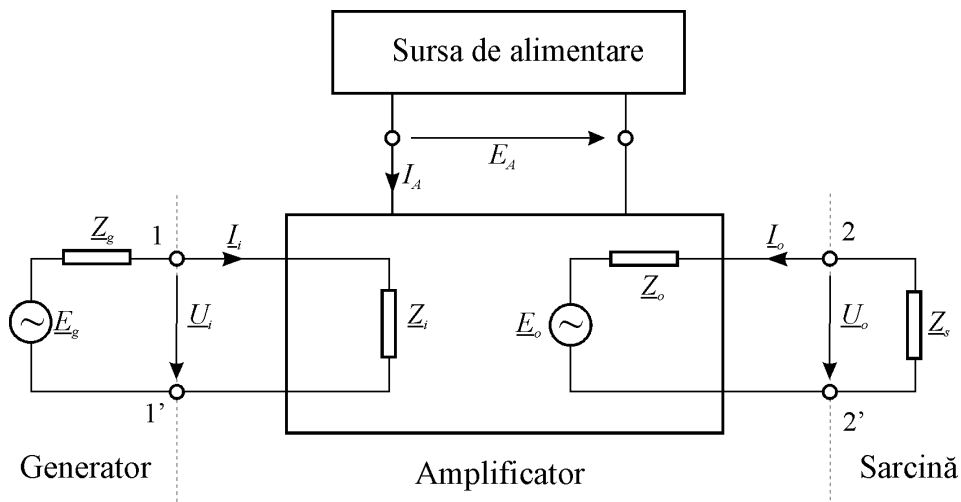


Fig. 4.1. Structura fundamentală a unui amplificator.

Din punct de vedere al semnalului amplificatorul este privit ca un cuadripol, cu două borne de intrare, unde este aplicat semnalul de intrare și două borne de ieșire, unde este furnizat semnalul de ieșire. Structura fundamentală a unui amplificator este prezentată în figura 4.1.

La intrare amplificatorul este echivalent cu o impedanță. Semnalul de intrare este caracterizat de două mărimi, tensiunea de intrare și intensitatea curentului de intrare. În mod obișnuit prin semnal de intrare se înțelege una dintre cele două mărimi.

La ieșire amplificatorul se comportă ca un generator și este echivalent cu un generator ideal și o impedanță internă (în figură este un generator de tensiune dar poate fi luat în considerare și ca generator de curent). Semnalul de ieșire este caracterizat și el de două mărimi, tensiunea și curentul, obișnuit fiind prezentat doar printr-una dintre ele.

Semnalul poate avea componentă variabilă (în majoritatea cazurilor componenta utilă, purtătoare de informație) și componentă continuă. Exceptând cazul amplificatoarelor de curent continuu, componenta continuă este înlăturată prin cuplaj. În mod obișnuit prin semnal se va înțelege componenta variabilă. Având în vedere că amplificatoarele pot fi în marea majoritate a situațiilor considerate circuite liniare cărora le poate fi aplicat principiul superpoziției și că un semnal variabil poate fi aproximat printr-o sumă de semnale sinusoidale, studiul amplificatoarelor se face luând în considerare un semnal sinusoidal.

Atunci când nivelul de putere al semnalului de intrare este foarte mic, amplificatorul necesită mai multe etaje de amplificare. Structura unui lanț complet de amplificare poate fi urmărită în figura 4.2.

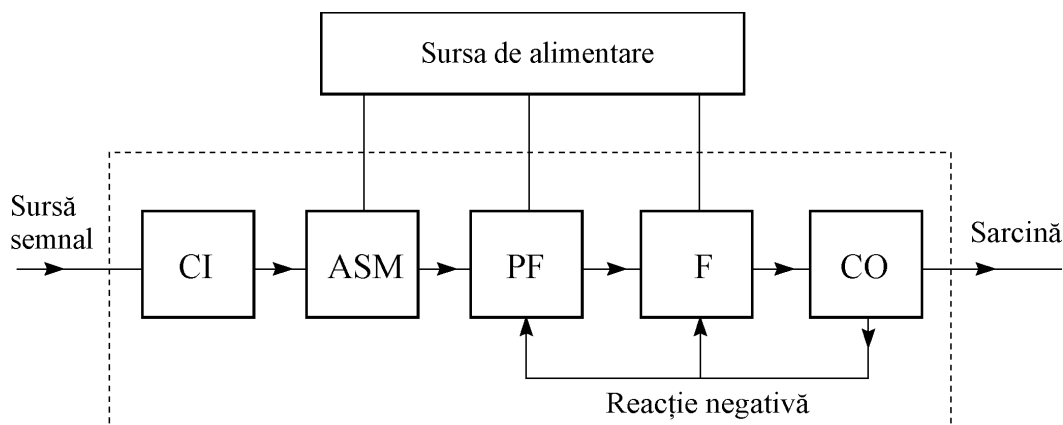


Fig. 4.2. Structura unui lanț complet de amplificare.

C.I. este circuitul de intrare care poate avea unul sau mai multe roluri:

- adaptare de impedanță pentru transfer maxim de putere de la sursă;
- limitare;
- atenuare;
- simetrizare

ASM este circuitul amplificator de semnal mic. Amplitudinea semnalului din acest circuit este mică față de valoarea tensiunii sau curentului în punctul de funcționare al dispozitivului activ utilizat. În aceste condiții dispozitivul se comportă

ca element liniar și ASM nu introduce distorsiuni de neliniaritate. De obicei ASM realizează amplificări mari de tensiune.

PF, etajul prefinal și F, etajul final formează împreună etajul de putere. Prefinalul pregătește semnalul pentru atacul etajului final care realizează o amplificare mare de putere. Sunt etaje de semnal mare, nivelul semnalului fiind comparabil cu valorile punctului static de funcționare al dispozitivelor utilizate. Dispozitivele funcționează în apropierea zonelor de neliniaritate și etajul de putere introduce inevitabil distorsiuni.

CO, circuitul de ieșire poate îndeplini rolurile:

- adaptare de impedanță sarcină-etaj final;
- izolare galvanică;
- separare a componentei continue;

Reacția negativă îmbunătățește considerabil unele performanțe ale amplificatoarelor și va fi tratată separat.

În proiectarea unui lant de amplificare sunt cunoscute sarcina și sursa de semnal și se impune puterea de ieșire cu distorsiunile sub o limita dată, pornind de la un semnal cunoscut de intrare. Calculul se face de la etajul final spre circuitul de intrare.

4.1.2. Parametrii amplificatoarelor

Parametrii amplificatoarelor sunt mărimi de intrare, mărimi de ieșire sau mărimi de transfer (legături între semnalele de intrare și de ieșire). Se exprimă pentru un semnal sinusoidal în regim permanent, la frecvența centrală.

- Puterea de ieșire nominală P_{on} reprezintă puterea maximă la ieșire pe sarcina nominală în condițiile unei deformări maxim admise a semnalului de ieșire.
- Impedanță de ieșire Z_o reprezintă impedanța internă a generatorului echivalent de la ieșire. Acest parametru este însoțit și de specificația modului de măsură (cu intrarea în gol, în scurt, sau alte situații).
- Sensibilitatea reprezintă semnalul de intrare pentru care se obține puterea de ieșire nominală (de obicei tensiunea U_i , dar poate fi și curentul I_i).
- Impedanța de intrare este impedanța echivalentă la bornele de intrare

$$Z_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (4.1)$$

Factorii de amplificare sunt raporturi între mărimi ale semnalului de ieșire și de intrare.

- Amplificarea de tensiune : $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ (4.2)

- Amplificarea de curent: $A_i = \frac{I_o}{I_i}$ (4.3)

- Amplificarea de putere (sau castigul G): $A_p = \frac{P_o}{P_i}$ (4.4)

- Transimpedanță: $Z_r = \frac{U_o}{I_i}$ (4.5)

- Transadmitanță: $Y_r = \frac{I_o}{U_i}$ (4.6)

Din considerente de simplificare a reprezentărilor grafice dar și a calculelor, amplificările pot apărea în exprimare logaritmică, măsurându-se în decibeli (dB) conform relațiilor:

$$A_{p\,dB} = 10 \log \frac{P_o}{P_i} \quad \text{pentru puteri} \quad (4.7)$$

$$A_{dB} = 20 \log \frac{U_o}{U_i} \quad \text{pentru tensiuni (curenți)} \quad (4.8)$$

În tabelul 4.1 pot fi urmărite relațiile între amplificare și mărimea corespunzătoare logaritmică.

Tabelul 4.1. Amplificare și atenuare exprimate direct și în decibeli.

Amplificare	A_p	1,26	2	4	10	16	100	1000	10^4	10^6	10^8
	A_u, A_i	1,12	1,41	2	3,16	4	10	31,6	100	10^3	10^4
	A_{dB}	1	3	6	10	12	20	30	40	60	80
Atenuare	A_u, A_i	0,891	0,707	0,5	0,316	0,25	0,1	0,032	0,01	10^{-3}	10^{-4}
	A_p	0,794	0,5	0,25	0,1	0,063	0,01	0,001	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
	A_{dB}	-1	-3	-6	-10	-12	-20	-30	-40	-60	-80

- Factorul de zgomot caracterizează zgomotul propriu al amplificatorului fiind un raport între puterea de zgomot la ieșire a amplificatorului real și puterea de zgomot la ieșire a unui amplificator ideal (zgomot propriu zero), când la intrare este același zgomot.

4.1.3. Caracteristicile amplificatoarelor

Descriu grafic legături între semnalele de ieșire și intrare și dau informații asupra proprietății amplificatorului de a modifica minim semnalul.

Caracteristica de transfer reprezintă dependența valorii instantanee a semnalului de ieșire de valoarea instantanee a semnalului de intrare la o variație sinusoidală (frecvență la mijlocul benzii). O caracteristică tipică este prezentată în figura 1.3. În zona de tensiuni mici variația este liniară, dar pentru valori mari apare o saturație a mărimii de ieșire. Acest lucru se datorează neliniarității dispozitivelor pentru semnale mari și duce la apariția distorsiunilor de neliniaritate prin prezența unor armonici în semnalul de ieșire, caracterizată de factorul de distorsiune de neliniaritate:

$$\delta = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots}{P_1}} 100\% \quad (4.9)$$

unde P_1 este puterea corespunzătoare fundamentalei iar P_2, P_3, \dots sunt puterile corespunzătoare armonicilor superioare.

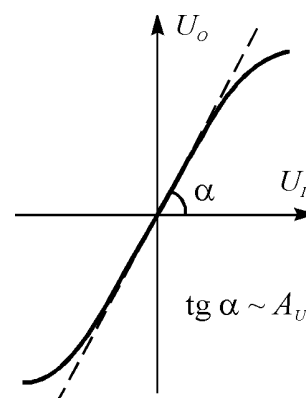


Fig. 4.3. Caracteristica de transfer.

Caracteristicile de frecvență descriu variația cu frecvența a factorului de amplificare (de obicei amplificarea de tensiune) și luând în considerare semnalele prin imaginile în complex obținem două caracteristici:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (4.10)$$

unde $A(\omega)$ – caracteristica amplitudine-frecvență și
 $\varphi(\omega)$ - caracteristica fază-frecvență

Dacă presupunem $u_i(t)$ semnalul de intrare, pentru ca $u_o(t)$ să fie nedeformat trebuie să existe relația:

$$u_o(t) = A u_i(t - T), \quad (4.11)$$

A fiind amplificarea și T întârzierea semnalului. Dezvoltând în serie și punând condiția de egalitate pentru fiecare armonică:

$$a_o(\omega) \cos(\omega t + \varphi_o) = A a_i(\omega) \cos[\omega(t-T) + \varphi_i]$$

rezulta condițiile pentru o trecere nedistorsionată a semnalului:

$$A = \frac{a_o(\omega)}{a_i(\omega)} = \text{constanta} \quad (4.12)$$

$$\varphi = \varphi_o - \varphi_i = -\omega T + k\pi \quad (4.13)$$

deci amplificarea constantă iar defazajul cu variație liniară funcție de frecvență.

Un amplificator ideal are caracteristicile de frecvență de forma celor prezentate în figura 4.4.

Pentru amplificatoarele reale caracteristica de amplitudine are o zonă în care se menține constantă (A_0 – amplificarea la frecvențe medii) și scade în zonele de frecvențe joase sau înalte, iar caracteristica de fază nu variază liniar cu frecvența. Se obișnuiește să se deseneze logaritm scara frecvențelor, iar amplificarea să se măsoare în decibeli, adică de asemenea o scară logaritmă, astfel că pentru un amplificator real caracteristicile au forma din figura 4.5. și poartă numele de caracteristici Bode.

A_0 este amplificarea la frecvențe medii, care la majoritatea amplificatoarelor (mai puțin amplificatoarele selective) se păstrează aproximativ constantă pe o plajă largă de frecvență. O mărime importantă este banda amplificatorului, reprezentând intervalul de frecvență în care amplificarea se menține aproximativ constantă. Aceasta se definește în mod obișnuit la 3 decibeli (B_{3db}) și cuprinde intervalul de frecvență în care amplificarea nu scade cu mai mult de 3dB față de A_0 . Sunt definite două frecvențe limită, una este frecvența jos (f_j), frecvența de la care amplificarea este mai mare decât

$\frac{A_0}{\sqrt{2}}$ și frecvența sus (f_s) a amplificatorului, frecvența de la care amplificarea este mai

mică decât $\frac{A_0}{\sqrt{2}}$. Diferența lor este banda la 3dB:

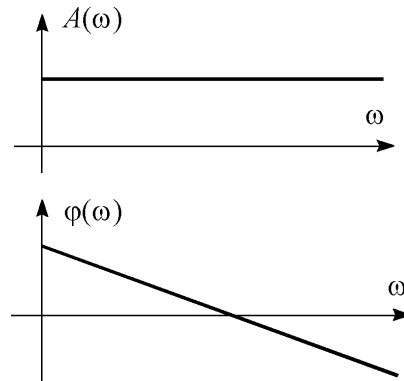


Fig. 4.4. Caracteristici ideale de frecvență.

$$B_{3dB} = f_s - f_j \quad (4.14)$$

Abaterea caracteristicilor de frecvență față de forma ideala duce la apariția distorsiunilor liniare de amplitudine și fază.

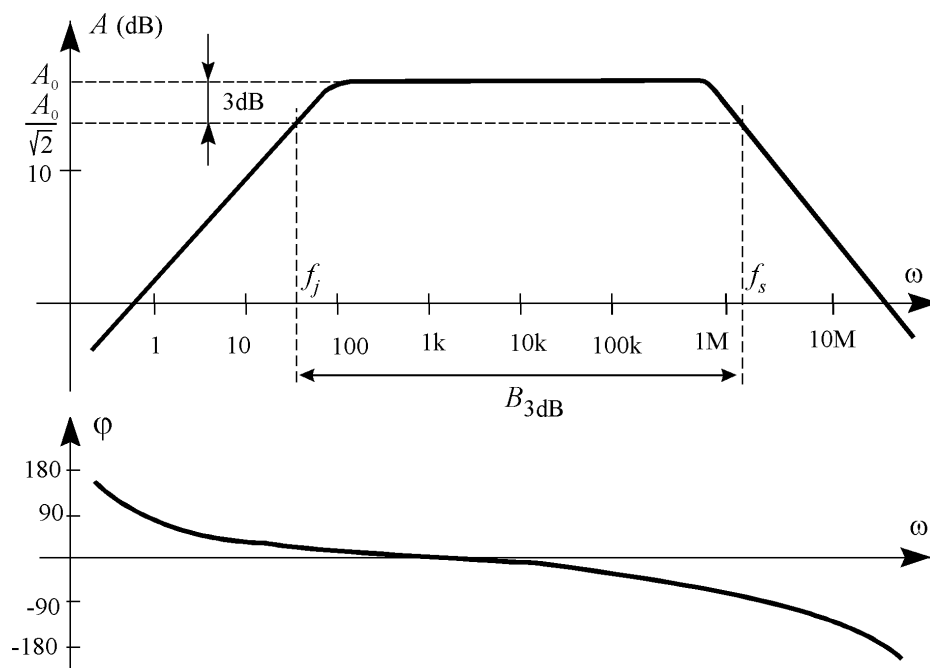


Fig. 4.5. Caracteristici Bode.

Uneori performanțele unui amplificator pot fi caracterizate prin răspunsul la impulsul treapta. Acest răspuns reprezintă variația normală a tensiunii de ieșire în timp, pentru cazul în care tensiunea de intrare este un impuls treapta (figura 4.6).

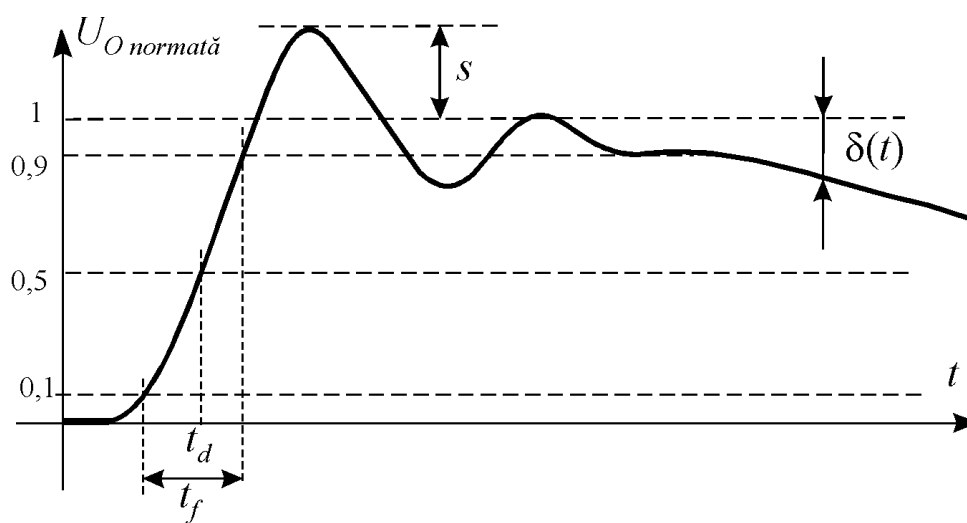


Fig. 4.6. Răspunsul la impulsul treapta.

Timpii importanți sunt timpul de întârziere, t_d și timpul de creștere directă (forward) t_f . Informații privind efectul asupra palierului impulsului sunt date de supracreșterea, s și caderea palierului $\delta(t)$, dependentă de timp.

4.1.4. Clasificarea amplificatoarelor

Amplificatoarele pot fi comparate după criterii diverse și corespunzător există numeroase variante de clasificare ale amplificatoarelor.

În primul rând, dacă pot sau nu să amplifice și componenta continuă a unui semnal, amplificatoarele se împart în două mari categorii:

- amplificatoare de curent continuu (c.c.) – vezi fig 4.7,a;
- amplificatoare de curent alternativ (c.a.)

Amplificatoarele de c.a. se pot împărți după domeniul de frecvență al semnalelor amplificate:

- amplificatoare de audio frecvență AF (zeci Hz – zeci kHz);
- amplificatoare de înaltă frecvență HF (sute kHz – sute MHz);
- amplificatoare de foarte înaltă frecvență VHF (zeci – sute MHz);
- amplificatoare de ultra înaltă frecvență UHF (sute MHz în sus).

După lățimea benzii de frecvență:

- amplificatoare de bandă largă, la care raportul f_s/f_j este mai mare decât 10 (fig.4.7.,b);
- amplificatoare de bandă îngustă (sau acordate) la care raportul f_s/f_j este mai mic de 1,2 (fig.4.7.,c).

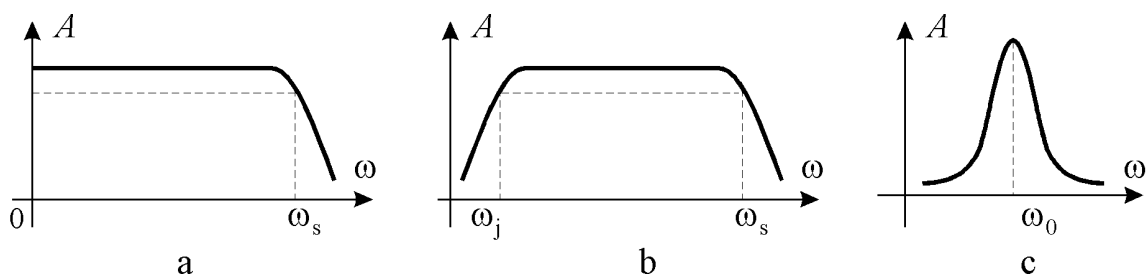


Fig. 4.7. Caracteristici de frecvență ale amplificatoarelor.

După mărimea semnalului de ieșire:

- amplificatoare de semnal mic (de tensiune);
- amplificatoare de semnal mare (de putere);

După durata de conducție a tranzistorului (sau poziția punctului M de funcționare):

- amplificatoare clasa A, în care tranzistorul conduce toată perioada semnalului – unghiul de conducție este $\theta = 2\pi$ (fig. 4.8.a);

- amplificatoare clasa B – durata de conducție egală cu durata de blocare, (fig. 4.8.b); unghiul de conducție este $\theta = \pi$;
- amplificatoare clasa AB $\theta \in (\pi, 2\pi)$;
 - amplificatoare clasa C unghiul de conducție este $\theta < \pi$ (Fig. 4.8.c);.

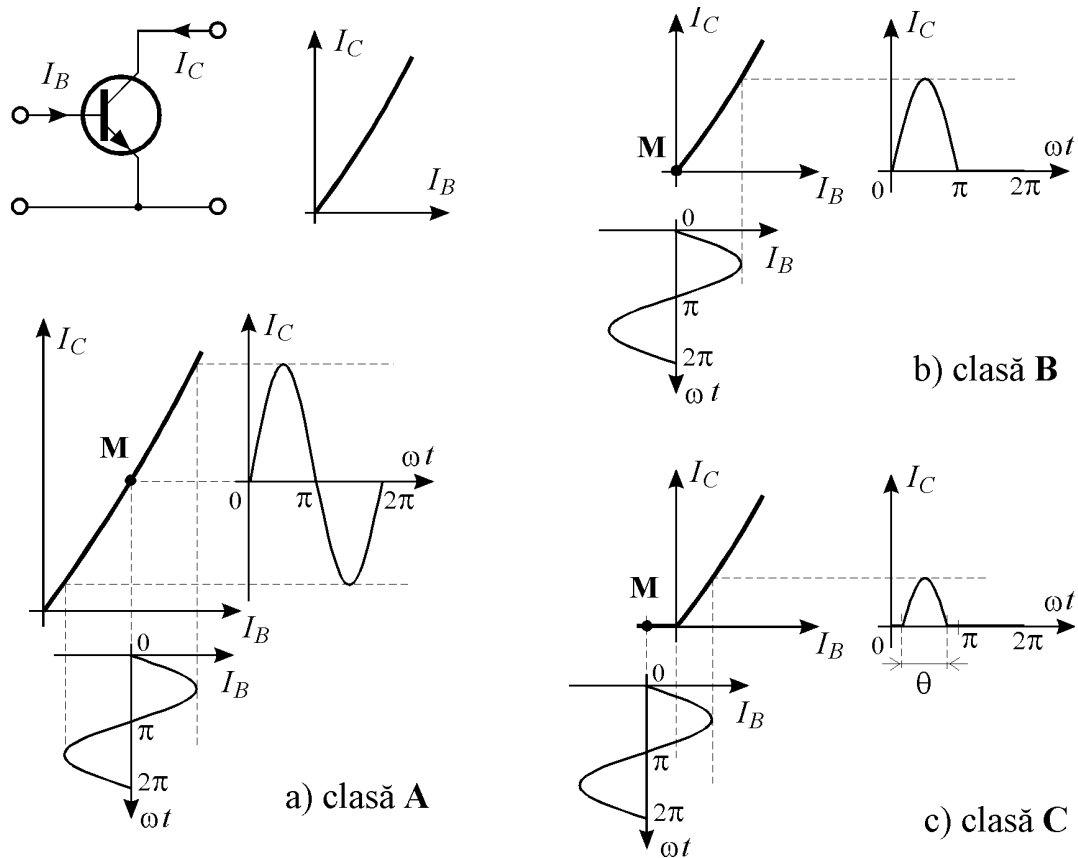


Fig. 4.8. Clasele de funcționare ale amplificatoarelor.

O categorie specială de amplificatoare, la care tranzistorul lucrează în comutație poartă numele de amplificator clasa D.

4.1.5. Probleme ale analizei și proiectării

Analiza unui circuit amplificator cu tranzistoare (paragraful 1.6.2) presupune că circuitul este dat și trebuie determinate performanțele acestuia, de obicei parametrii și caracteristicile, adică amplificările, rezistențele sau impedanțele, nivelul curenților, tensiunilor și puterilor, limitele în frecvență, distorsiunile. Amplificatorul presupune existența cel puțin a unui element neliniar astfel că analiza nu se face foarte simplu (paragraful 1.6.6).

Sinteza sau proiectarea pornește de la anumite performanțe dorite și determină elementele și structura circuitului. Proiectarea are un caracter aplicativ și se bazează pe cunoașterea rezultatelor analizei pentru clasa de circuite ce trebuie proiectate dar și pe cunoașterea variantelor de circuite care sunt susceptibile a duce la performanțele dorite, cu avantajele și dezavantajele lor.

În capitolul acesta se va face în special analiza circuitelor amplificatoare de semnal mic, problemele amplificatoarelor de semnal mare fiind atinse în paragraful destinat amplificatoarelor de putere.

Probleme ale proiectării sunt abordate în capitolul 7.

Amplificatoarele de semnal mic sunt destinate amplificării unor semnale variabile de valori mici și apar în prima parte a unui lanț de amplificatoare. Aceste amplificatoare pot avea unul sau mai multe etaje. Un etaj folosește ca element amplificator un tranzistor funcționând în clasa A.

Semnalul este considerat mic atunci când are valori mult mai mici decât valorile corespunzătoare punctului de funcționare al tranzistorului. Atunci tranzistorul are o comportare liniară în jurul punctului de funcționare și poate fi înlocuit cu o schemă echivalentă de semnal mic (valabilă în curent alternativ).

Problemele analizei se împart în două părți mari :

- analiza de curent continuu (c.c.) – urmărește polarizarea tranzistoarelor și evaluarea calității și stabilității punctului de funcționare;
- analiza de curent alternativ (c.a.) – urmărește determinarea parametrilor amplificatorului (amplificari, impedanțe de intrare și ieșire), comportarea la variația frecvenței semnalului, stabilitatea.

Analiza de curent continuu a circuitelor cu tranzistoare și implicit a amplificatoarelor de semnal mic este prezentată mai amănunțit în secțiunea de aplicații și probleme, capitolul 7. Aici se va face o analiză de c.a.

Pentru calculul de c.a. amplificatorul se reduce la un circuit echivalent liniar de c.a., reducere care se realizează astfel:

1. Tranzistoarele (sau alte elemente neliniare) se înlocuiesc cu una dintre schemele echivalente de semnal mic;
2. Sursele de tensiune continuă se consideră scurtcircuitate (sau se înlocuiesc cu rezistența internă atunci când aceasta nu poate fi neglijată);
3. Sursele de curent continuu se consideră gol (sau se înlocuiesc cu rezistența internă atunci când aceasta nu poate fi neglijată);
4. Se iau în considerare doar componentele variabile ale mărimilor;

Cele mai utilizate scheme echivalente pentru tranzistoare sunt prezentate în figura 4.9.

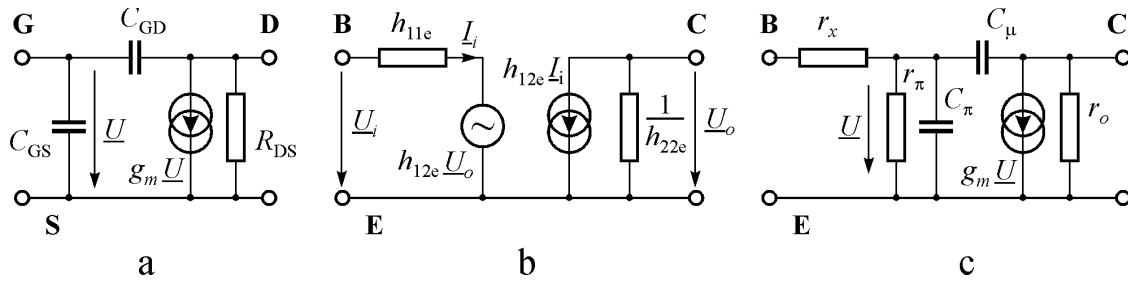


Fig. 4.9. Scheme echivalente pentru tranzistoare. a) TEC; b) schema de cuadripol cu parametri h în conexiune EC pentru tranzistoare bipolare; c) schema naturală (Giacoletto) pentru tranzistoare bipolare.

Analiza în c.a. se face de obicei pe domenii restrânse de frecvențe (joase, medii, înalte) și corespunzător sunt neglijate unele componente în schema echivalentă.

Aceste scheme sunt la rândul lor simplificate funcție de domeniul precizie dar și de zona de frecvență a analizei.

Schema naturala are unele avantaje față de schema cu parametri h . Ea permite determinarea relativ precisă a parametrilor, în orice punct de funcționare, cu un număr redus de date de catalog și este valabilă până la frecvențe mai ridicate în majoritatea cazurilor, astfel că ea va fi folosită aici. Pe de altă parte numeroase cataloage de tranzistoare dau parametrii h și sunt necesare relații de transformare pentru a determina parametrii schemei naturale.

În practică, analiza se face pe trei domenii de frecvență, joase, medii și înalte și se folosesc scheme simplificate pentru fiecare domeniu.

La frecvențe joase și medii, în schema echivalenta pentru TEC, se neglijează condensatoarele și rezistența drena-sursă (figura 4.10.a), la schema cu parametri h se consideră parametri reali, iar $h_{12e} = h_{22e} \approx 0$ (figura 4.10.b) iar la schema naturală se neglijează condensatoarele (figura 4.10.c). La această ultima schemă, la calcule ce nu cer precizie ridicată este neglijată și rezistența $r_x \approx 0$.

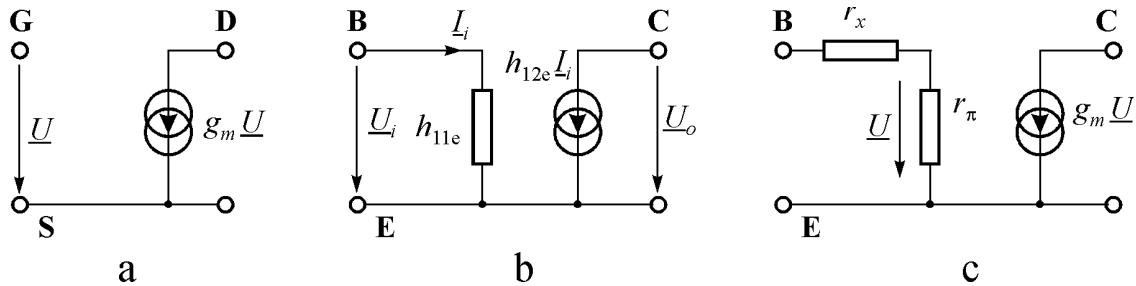


Fig. 4.10. Scheme echivalente simplificate la frecvențe joase și medii pentru tranzistoare. a) TEC; b) schema cu parametri h în conexiune EC pentru tranzistoare bipolare; c) schema naturală (Giacoletto) pentru tranzistoare bipolare.

La frecvențe înalte pentru TEC se folosește schema din figura 4.9.a iar pentru tranzistoarele bipolare se utilizează o schemă naturală unilateralizată (fig.4.11), prin care se exclude influența ieșirii asupra intrării și deci C_μ este eliminat fiind însă

adăugată la C_π o componentă suplimentară dependentă de valoarea C_μ astfel că se obține un condensator cu o valoare totală, C_t . Se mai neglijează $r_x \approx 0$ și se consideră $r_o \approx \text{infinita}$.

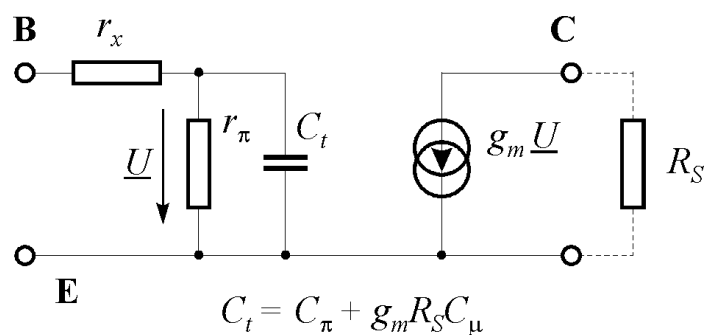


Fig. 4.11. Schema echivalentă unilateralizată a tranzistorului bipolar, pentru frecvențe înalte.

Relațiile care permit determinarea parametrilor schemei naturale și dau legăturile aproximative cu schema cu parametri h sunt:

$$g_m = 40 I_C \quad (4.15)$$

unde I_C este curentul continuu de colector,

$$h_{21e} = \beta = g_m r_\pi ; \quad (4.16)$$

$$h_{11e} = r_x + r_\pi \approx r_\pi ; \quad (4.17)$$

$$C_\pi = \frac{g_m}{\omega_T} - C_\mu \quad (4.18)$$

unde ω_T este pulsația de tăiere a tranzistorului.