

D. Influența reacției negative asupra caracteristicilor amplificatorului

Reacția negativă este utilizată pe scară largă în amplificatoare, în scopul îmbunătățirii performanțelor. Un amplificator de calitate are amplificarea independentă de temperatură, de dispersia parametrilor componentelor și de variațiile tensiunilor de alimentare, o bandă extinsă de trecere, o caracteristică de transfer liniară (nu introduce distorsiuni de neliniaritate), rezistențe de intrare și de ieșire controlate cu precizie, o valoare ridicată a raportului semnal util/zgomot. Reacția negativă (RN) permite ca, plecând de la un amplificator cu amplificare mare, să se obțină un amplificator cu amplificare mai mică, ceilalți parametri de performanță apropiindu-se de aceia ce caracterizează un amplificator ideal.

Prin reacție sau legătură inversă, se înțelege legătura stabilită între ieșirea și intrarea unui amplificator prin intermediul unui circuit suplimentar, numit circuit de reacție. Prin circuitul de reacție, de tip pasiv sau activ, se stabilește o cale inversă de transmitere a semnalului, calea directă fiind asigurată prin amplificatorul căruia i se aplică reacția.

D1. Schema bloc a amplificatorului cu reacție negativă. Amplificarea în buclă închisă

Se consideră schema bloc a unui amplificator ideal cu reacție, reprezentată în fig. D.1, și se presupune că, prin amplificatorul liniar descris prin amplificarea (funcția de transfer în frecvență) \underline{A} , se realizează numai calea directă de transmitere a semnalului, iar prin circuitul de reacție, descris prin funcția de transfer $\underline{\beta}$ - numai calea inversă, așa cum indică săgețile din interiorul blocurilor. În plus, se admite că, după conectarea legăturii inverse, parametri de performanță ai amplificatorului de pe calea directă nu se modifică (circuitul de reacție nu încarcă amplificatorul de bază).

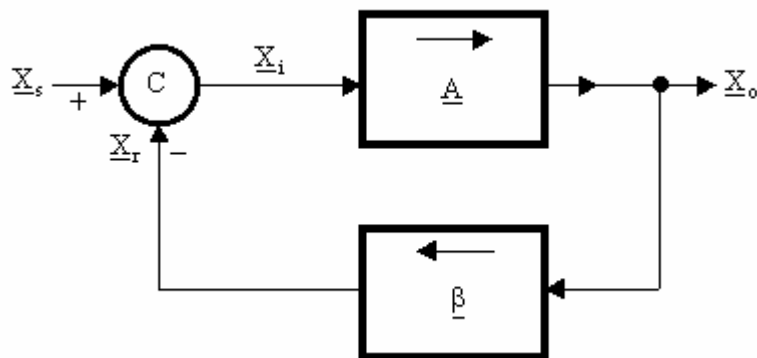


Fig. D.1. Schema bloc a unui ARN

Semnalele notate cu x pot fi curenți sau tensiuni. Prin circuitul de reacție, o parte din semnalul de ieșire (x_o), este adusă la blocul comparator (C), care efectuează suma algebrică a semnalului furnizat de generatorul de semnal (x_s), cu semnalul de reacție (x_r). În cazul unui amplificator cu reacție negativă (ARN), semnalul de ieșire al comparatorului ($x_i = x_s - x_r$) reprezintă semnalul de intrare al amplificatorului. Amplificarea în buclă închisă a ARN (funcția de transfer în frecvență) are expresia

$$\underline{A}_r = \frac{\underline{X}_o}{\underline{X}_s} = \frac{\underline{A}}{1 + \underline{\beta} \cdot \underline{A}} \text{ sau } A_r(s) = \frac{X_o(s)}{X_s(s)} = \frac{A(s)}{1 + \beta(s) \cdot A(s)}. \quad (D.1)$$

Dacă semnalul de reacție se adună la semnalul x_s , comparatorul va furniza, la ieșire, suma celor două semnale ($x_i = x_s + x_r$) și configurația corespunde unui amplificator cu reacție pozitivă (ARP) cu funcția de transfer

$$\underline{A}_r = \frac{\underline{X}_o}{\underline{X}_s} = \frac{\underline{A}}{1 - \underline{\beta} \cdot \underline{A}} \text{ sau } A_r(s) = \frac{X_o(s)}{X_s(s)} = \frac{A(s)}{1 - \beta(s) \cdot A(s)}. \quad (D.2)$$

Mărimile și caracterul reacției depind de frecvența semnalului și, din această cauză, stabilirea tipului de reacție – pozitivă sau negativă, se face pentru frecvența centrală a amplificatorului. La această frecvență, dacă semnalul de reacție este în antifază cu semnalul dat de generatorul de semnal, atunci reacția este negativă, iar dacă x_r este în fază cu x_s , reacția este pozitivă. Reacția negativă implică următoarea corespondență între fazele mărimilor \underline{A}_0 și $\underline{\beta}_0$ ($\underline{A}_0 = A_0 e^{j\varphi_{A0}}$, $\underline{\beta}_0 = \beta_0 e^{j\varphi_{\beta 0}}$): $\varphi_{A0} = 0 \rightarrow \varphi_{\beta 0} = 0$ și $\varphi_{A0} = \pi \rightarrow \varphi_{\beta 0} = \pi$; cu alte cuvinte, în banda de trecere a amplificatorului, \underline{A}_0 și $\underline{\beta}_0$ sunt numere sau mărimi reale cu același semn. Din (D.1), se obține expresia amplificării în buclă închisă, la frecvențe din bandă,

$$\underline{A}_{r0} = \frac{\underline{A}_0}{1 + \underline{\beta}_0 \cdot \underline{A}_0} = \frac{A_0}{1 + \beta_0 \cdot A_0}, \quad (D.3)$$

cu modulul și faza amplificării în buclă închisă, în banda de trecere,

$$|\underline{A}_{r0}| = A_{r0} = \frac{A_0}{1 + \beta_0 \cdot A_0}, \quad \varphi_{Ar0} = \varphi_{A0}. \quad (D.4)$$

Relația D.4 evidențiază scăderea modulului performanței funcționale a ARN, ca urmare a aplicării RN ($A_{r0} < A_0$). Cantitatea $D_0 = 1 + \beta_0 \cdot A_0$ se numește *diferență la întoarcere* (în banda de trecere); produsul $\beta_0 \cdot A_0$ reprezintă *amplificarea în buclă deschisă* (în banda de trecere) sau *transmisia buclei* și, de regulă, $\beta_0 \cdot A_0 \gg 1$. În cazul amplificatoarelor cu reacție pozitivă, modulul amplificării în buclă închisă este mai mare decât modulul amplificării în buclă deschisă, A_0 , reacția pozitivă având caracter regenerativ. La frecvențe plasate în afara benzii de trecere, eficiența reacției negative scade datorită scăderii modulului amplificării în buclă deschisă.

Amplificarea în bandă a ARN

Amplificarea în bandă a ARN este egală cu amplificarea în bandă a amplificatorului de pe calea directă (fără reacție) împărțită la diferența la întoarcere,

$$A_{r0} = \frac{A_0}{1 + \beta_0 \cdot A_0} = \frac{A_0}{D_0}. \quad (D.5)$$

Faza amplificării în buclă închisă, la frecvențe din banda de trecere, este egală cu faza amplificării în buclă deschisă; altfel spus, prin închiderea buclei de reacție negativă, se conservă caracterul de amplificator inversor sau neinversor.

Pentru marea majoritate a cazurilor concrete, amplificarea în bandă a amplificatorului de bază este dependentă de condițiile de funcționare ale dispozitivelor active. Bucla de reacție negativă reduce variațiile amplificării A_{r0} determinate de variațiile amplificării A_0 . Acest efect benefic poate fi pus în evidență prin diferențierea funcției A_{r0} . Presupunând că β_0 este constant și $A_{r0} = f(A_0)$, se obține

$$dA_{r0} = \frac{dA_0}{(1 + \beta_0 \cdot A_0)^2} = \frac{dA_0}{D_0^2}. \quad (D.6)$$

În cazul unor variații mici, se poate admite că $\Delta A_0 \cong dA_0$ și $\Delta A_{r0} \cong dA_{r0}$. Din (D.6), rezultă că variația absolută a modului amplificării în buclă închisă se reduce de D_0^2 ori. De asemenea, variația relativă a modului amplificării în buclă închisă este redusă cu un factor egal cu diferența la întoarcere, comparativ cu variația relativă a amplificării în buclă deschisă,

$$\frac{\Delta A_{r0}}{A_{r0}} = \frac{\Delta A_0 / A_0}{1 + \beta_0 \cdot A_0}. \quad (D.7)$$

Amplificarea în bandă în buclă închisă, A_{r0} , devine independentă de parametrii dispozitivelor active (influențați de condițiile de funcționare), dacă amplificarea în buclă deschisă satisface condiția $\beta_0 \cdot A_0 \gg 1$. În acest caz, amplificarea în bandă a ARN devine

$$A_{r0} \cong 1 / \beta_0. \quad (D.8)$$

În marea majoritate a cazurilor, ARN are circuitul de reacție realizat din elemente pasive de circuit, cu toleranță mică și cu o mare stabilitate în timp a valorilor parametrilor. Dacă amplificarea în buclă închisă este stabilită de inversul factorului de transfer al blocului de reacție, atunci se poate considera că amplificarea este insensibilă la condițiile de funcționare.

Banda de frecvențe de trecere a ARN

Reacția negativă influențează și limitele benzii de frecvență, acționând în sensul creșterii lățimii benzii de trecere, prin creșterea frecvenței limită superioară (de la f_s – fără reacție, la f_{sr} – cu RN) și scăderea frecvenței limită inferioară (de la f_j – fără reacție, la f_{jr} – cu RN). Pentru ilustrarea acestui efect, se consideră un amplificator de c.a. al cărui răspuns în frecvență, în vecinătatea frecvențelor limită, este descris prin funcția de transfer (f.d.t.) la frecvențe înalte

$$\underline{A}_s = \frac{\underline{A}_0}{1 + j(f / f_s)} \quad (D.9)$$

și prin f.d.t. la frecvențe joase

$$\underline{A}_j = \frac{\underline{A}_0}{1 - j(f_j / f)}. \quad (D.10)$$

După închiderea buclei de reacție negativă, în ipoteza unui circuit de reacție caracterizat prin f.d.t. β_0 , independentă de frecvență, răspunsul la frecvențe înalte al ARN este descris prin f.d.t.

$$\underline{A}_{rs} = \frac{\underline{A}_s}{1 + \beta_0 \cdot \underline{A}_s} = \frac{\frac{\underline{A}_0}{1 + j(f/f_s)}}{1 + \beta_0 \cdot \frac{\underline{A}_0}{1 + j(f/f_s)}} = \frac{\frac{\underline{A}_0}{1 + \beta_0 \cdot \underline{A}_0}}{1 + j \frac{f}{f_s(1 + \beta_0 \cdot \underline{A}_0)}} = \frac{\underline{A}_{r0}}{1 + j(f/f_{sr})}, \quad (D.11)$$

cu frecvența limită de sus

$$f_{sr} = f_s \cdot (1 + \beta_0 \cdot \underline{A}_0) = f_s \cdot D_0. \quad (D.12)$$

Funcția de transfer a ARN este de aceeași formă cu aceea a amplificatorului de bază, fără reacție, numai că amplificarea în bandă este redusă de D_0 ori; cu aceeași cantitate, este multiplicată frecvența limită superioară. Presupunând, acum, răspunsul la frecvențe joase al aceluiași amplificator de c.a., de forma (D.10), după aplicarea RN, se obține:

$$\underline{A}_{rj} = \frac{\underline{A}_j}{1 + \beta_0 \cdot \underline{A}_j} = \frac{\frac{\underline{A}_0}{1 - j(f_j/f)}}{1 + \beta_0 \cdot \frac{\underline{A}_0}{1 - j(f_j/f)}} = \frac{\frac{\underline{A}_0}{1 + \beta_0 \cdot \underline{A}_0}}{1 - j \frac{f_j}{(1 + \beta_0 \cdot \underline{A}_0)}} = \frac{\underline{A}_{r0}}{1 - j(f_{jr}/f)}, \quad (D.13)$$

cu frecvența limită de jos

$$f_{jr} = f_j / (1 + \beta_0 \cdot \underline{A}_0) = f_j / D_0. \quad (D.14)$$

Din (D.14), se constată că RN deplasează polul funcției de transfer la o pulsație mult mai mică, măbind banda de trecere a ARN. Caracteristicile modul - frecvență și diagramele Bode (modul - frecvență) pentru circuitul considerat, cu și fără RN, sunt date în fig. D.2, respectiv, fig. D.3. Din ambele reprezentări grafice, se observă că, în afara benzii de trecere a ARN, amplificatorul în buclă închisă se comportă la fel ca și amplificatorul fără reacție (atât la frecvențe joase, cât și la frecvențe înalte, modulul amplificării în buclă deschisă, $|\beta_0 \cdot A(j\omega)|$, tinde la zero).

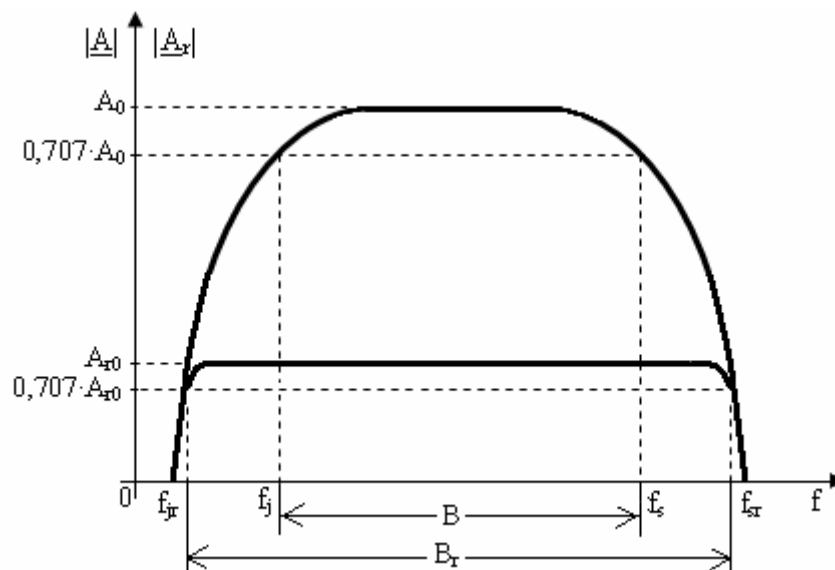


Fig. D.2. Caracteristicile modul-frecvență ale amplificatorului în buclă deschisă (fără reacție) și în buclă închisă (cu reacție negativă)

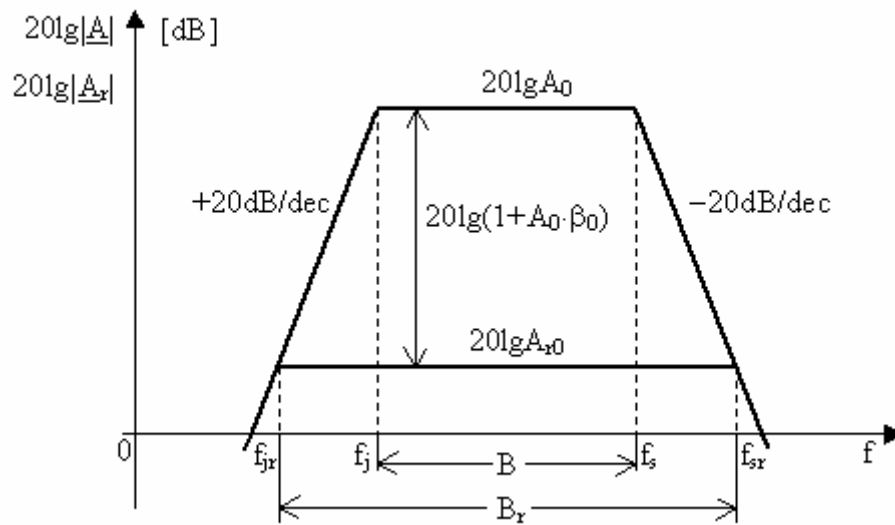


Fig. D.3. Diagramele Bode ale amplificatorului în buclă deschisă (fără reacție) și în buclă închisă (cu reacție negativă)

Produsul amplificare-bandă

În cazul amplificatoarelor de c.c., după închiderea buclei de RN, se menține nealterată valoarea produsului amplificare-bandă,

$$P_r = A_{r0} \cdot f_{sr} = \frac{A_0}{D_0} \cdot f_s \cdot D_0 = A_0 \cdot f_s = P. \quad (D.15)$$

Produsul amplificare-bandă al amplificatorului în buclă deschisă de c.a. este

$$P = A_0 \cdot (f_s - f_j), \quad (D.16)$$

iar după închiderea buclei de reacție negativă,

$$P_r = A_{r0} \cdot (f_{sr} - f_{jr}) = A_{r0} \cdot (f_s \cdot D_0 - f_j / D_0) = A_0 \cdot (f_s - f_j / D_0^2) \neq A_0 \cdot f_s = P. \quad (D.17)$$

Pentru amplificatoarele de c.a., numai pentru cazurile $f_s \gg f_j$, se poate considera că RN nu modifică valoarea produsului amplificare-bandă:

$$P = A_0 \cdot (f_s - f_j) \cong A_0 \cdot f_s, \quad (D.18)$$

$$P_r = A_{r0} \cdot (f_{sr} - f_{jr}) = A_{r0} \cdot (f_s \cdot D_0 - f_j / D_0) \cong A_{r0} \cdot f_{sr} = A_0 \cdot f_s = P. \quad (D.19)$$

D2. Topologii de bază ale ARN

Schema bloc a unui ARN se poate desena ca în fig. D.4, având în vedere faptul că amplificatorul și circuitul de reacție pot fi reprezentate sub formă de cuadripoli. Ținând seama de posibilitățile de conectare a doi cuadripoli și de faptul că semnalele x_s , x_r , x_i , x_o pot fi tensiuni sau

curenți, s-au introdus blocurile de mixare (comparatorul din fig. D1) și de conectare, care conțin legăturile realizate între circuitele de intrare și de ieșire ale celor doi cuadripoli.

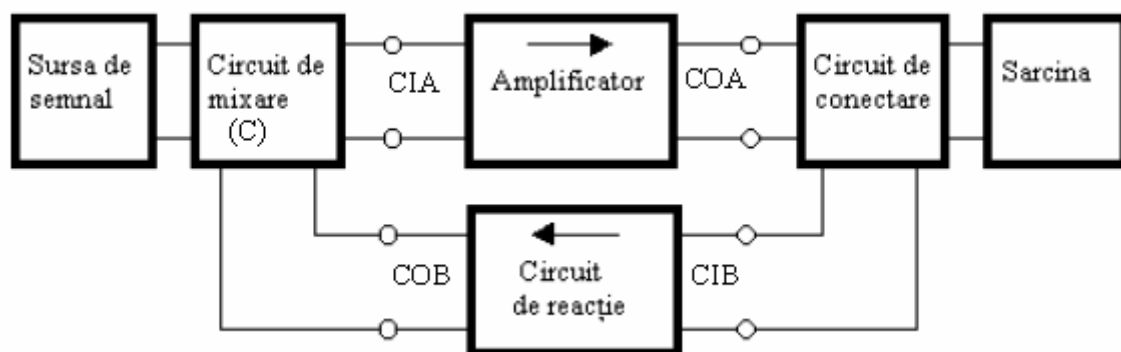


Fig. D.4. Schema bloc a ARN

Circuitul de mixare sau comparatorul poate fi de tip serie sau paralel, după cum circuitul de intrare al amplificatorului (CIA) se conectează în serie cu circuitul de ieșire al blocului de reacție (COB) - fig. D.5.a, sau în paralel - fig. D.5.b. În primul caz, compararea mărimilor x_s , x_r , x_i , (tensiuni) se face pe un ochi de circuit - *RN serie*, iar în al doilea caz, care caracterizează o *RN paralel*, compararea acestor mărimi se face într-un nod (x_s , x_r , x_i sunt curenți).

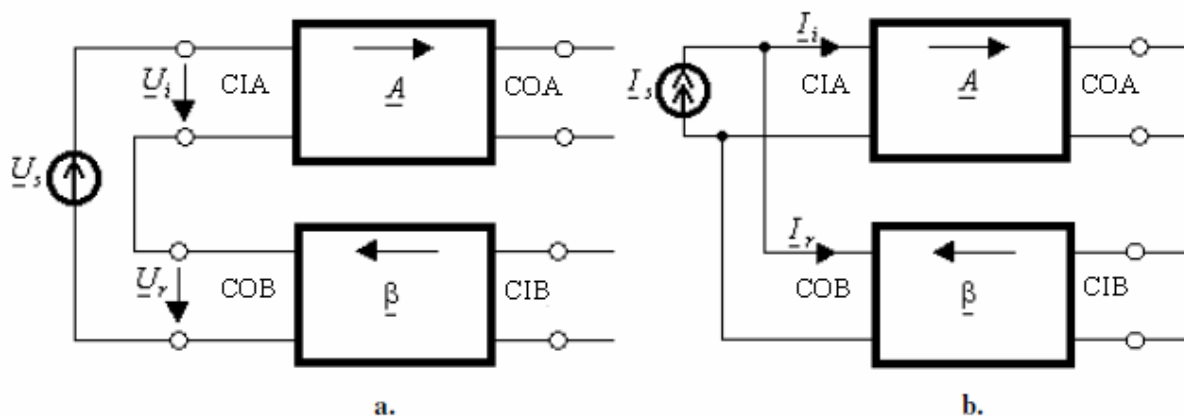


Fig. D.5. Circuite de mixare: a. Serie; b. Paralel

Circuitul de conectare, de asemenea, poate fi de tip serie (fig. D.6.a) sau de tip paralel (fig. D.6.b). În primul caz, când COA se înseriază cu CIB, circuitul de intrare al blocului de reacție este parcurs de curentul prin sarcină, i_o , care reprezintă mărimea de ieșire a ARN; cu o astfel de conectare, se obține o *reacție de curent*. Fig. D.6.b evidențiază faptul că tensiunea de intrare a circuitului de reacție este chiar tensiunea de ieșire, u_o , a ARN (mărimea de ieșire). În acest caz, se spune că se aplică o *reacție de tensiune*.

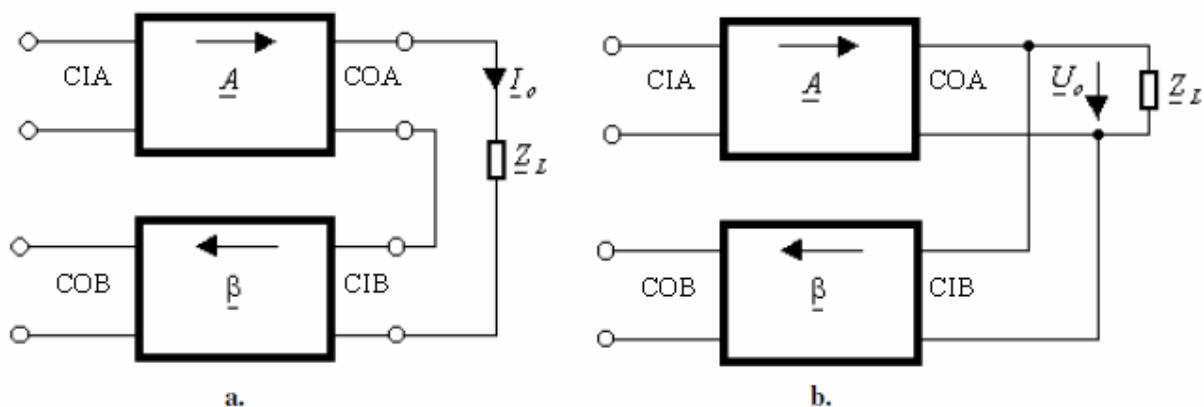


Fig. D.6. Circuite de conectare: a. serie; b. paralel

Prin combinarea celor două tipuri de circuite de mixare (comparare) cu cele două tipuri de circuite de conectare, rezultă patru topologii sau configurații de bază de amplificatoare cu reacție negativă:

- ARN serie – paralel (serie de tensiune - fig. D.7);
- ARN serie - serie (serie de curent - fig. D.8);
- ARN paralel – paralel (paralel de tensiune - fig. D.9);
- ARN paralel – serie (paralel de curent - fig. D.10).

Precizarea configurației ARN implică, în mod automat, precizarea tipului de amplificator de semnal mic de pe calea directă (fig. D5), nerespectarea acestei corespondențe reducând substanțial eficiența RN.

a. ARN serie – paralel (serie de tensiune)

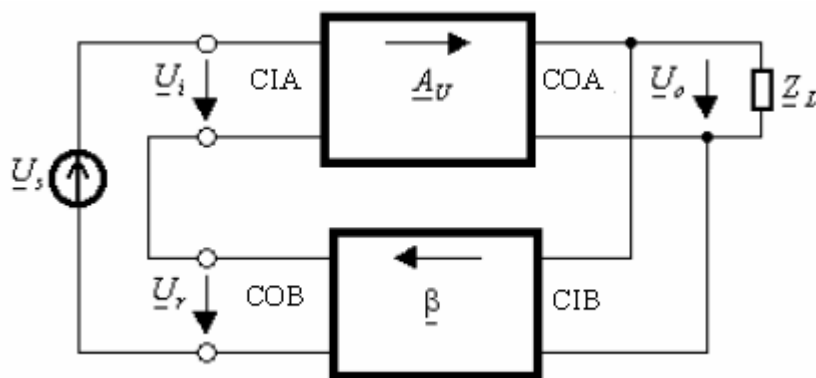


Fig. D.7. ARN serie – paralel (serie de tensiune)

Amplificarea în buclă închisă este amplificarea de tensiune

$$\underline{A}_{Ur} = \frac{\underline{A}_U}{1 + \underline{\beta} \cdot \underline{A}_U} \quad (D.20)$$

Amplificarea în bandă este

$$A_{Ur0} = \frac{A_{U0}}{1 + \beta_0 \cdot A_{U0}}. \quad (D.21)$$

b. ARN serie - serie (serie de curent)

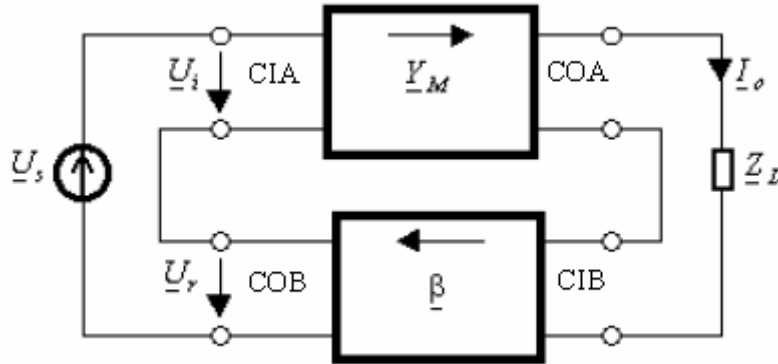


Fig. D.8. ARN serie - serie (serie de curent)

Amplificarea în buclă închisă este admitanța de transfer

$$\underline{Y}_{Mr} = \frac{\underline{Y}_M}{1 + \underline{\beta} \cdot \underline{Y}_M}. \quad (D.22)$$

Amplificarea în bandă este

$$Y_{Mr0} = \frac{Y_{M0}}{1 + \beta_0 \cdot Y_{M0}}. \quad (D.23)$$

c. ARN paralel – paralel (paralel de tensiune)

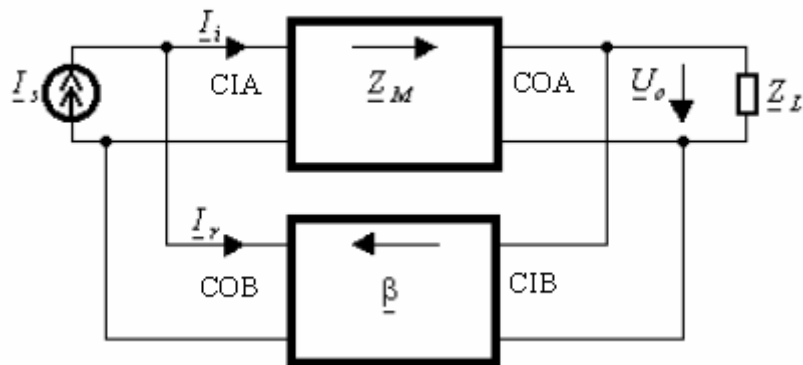


Fig. D.9. ARN paralel – paralel (paralel de tensiune)

Amplificarea în buclă închisă este impedența de transfer

$$\underline{Z}_{Mr} = \frac{\underline{Z}_M}{1 + \underline{\beta} \cdot \underline{Z}_M}. \quad (D.24)$$

Amplificarea în bandă este

$$Z_{Mr0} = \frac{Z_{M0}}{1 + \beta_0 \cdot Z_{M0}} . \quad (D.25)$$

d. ARN paralel – serie (paralel de curent - fig. D.10)

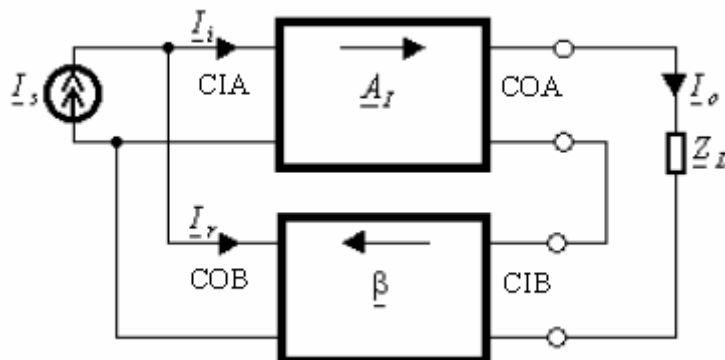


Fig. D.10. ARN paralel – serie (paralel de curent)

Amplificarea în buclă închisă este amplificarea de curent

$$\underline{A}_{Ir} = \frac{\underline{A}_I}{1 + \underline{\beta} \cdot \underline{A}_I} . \quad (D.26)$$

Amplificarea în bandă este

$$A_{Ir0} = \frac{A_{I0}}{1 + \beta_0 \cdot A_{I0}} . \quad (D.27)$$

Alte efecte benefice ale reacției negative

Modificarea controlată a rezistențelor de intrare și ieșire. Modificarea rezistențelor de intrare și ieșire depinde de tipul RN. Astfel, o RN de tip serie (la intrare) crește rezistența de intrare a ARN (R_{ir}), în timp ce o reacție de tip paralel (la intrare) conduce la scăderea aceluiași parametru, în comparație cu rezistența de intrare a amplificatorului fără reacție (R_i). Reacția negativă de curent (RN serie – la ieșire) conduce la creșterea rezistenței de ieșire, iar RN de tensiune (RN paralel – la ieșire) micșorează rezistența de ieșire a configurației, R_{or} , în comparație cu valoarea acesteia (R_o) în absența reacției.

Liniarizarea caracteristicii statice de transfer a amplificatorului. Distorsiunile neliniare sunt determinate de modificarea pantei caracteristicii statice de transfer a amplificatorului de bază (fig. D.11.a); porțiunile caracteristicii statice de transfer (liniarizate) de pante constante nenule, dar diferite ca valoare ($m_1 \neq m_2$), în urma închiderii unei bucle de RN, vor avea pante aproape egale (fig. D.11.b):

$$m_{Ir} = \frac{m_1}{1 + \beta_0 \cdot m_1} \cong \frac{1}{\beta_0} = m_r , \quad (D.28)$$

$$m_{2r} = \frac{m_2}{1 + \beta_0 \cdot m_2} \cong \frac{1}{\beta_0} = m_r. \quad (D.29)$$

Comparând domeniile semnalului de intrare pentru care amplificatorul (cu și fără reacție negativă) are o comportare liniară ieșire - intrare, se constată că, pentru atingerea nivelurilor de saturație ($\pm X_{o2}$), în prezența reacției negative, este necesar un semnal de intrare (X'_{i2}) cu amplitudine mai mare decât în lipsa legăturii inverse (X_{i2}). În plus, pe tot domeniul semnalului de intrare, amplificatorul cu reacție negativă realizează aceeași amplificare (distorsiunile neliniare sunt nule); în absența reacției negative, domeniul semnalului de intrare, amplificat fără distorsiuni neliniare, este restrâns la $\pm X_{i1}$. În concluzie, reacția negativă reduce gradul de deformare a semnalului amplificat și extinde domeniul mărimii de intrare pentru care amplificatorul lucrează liniar.

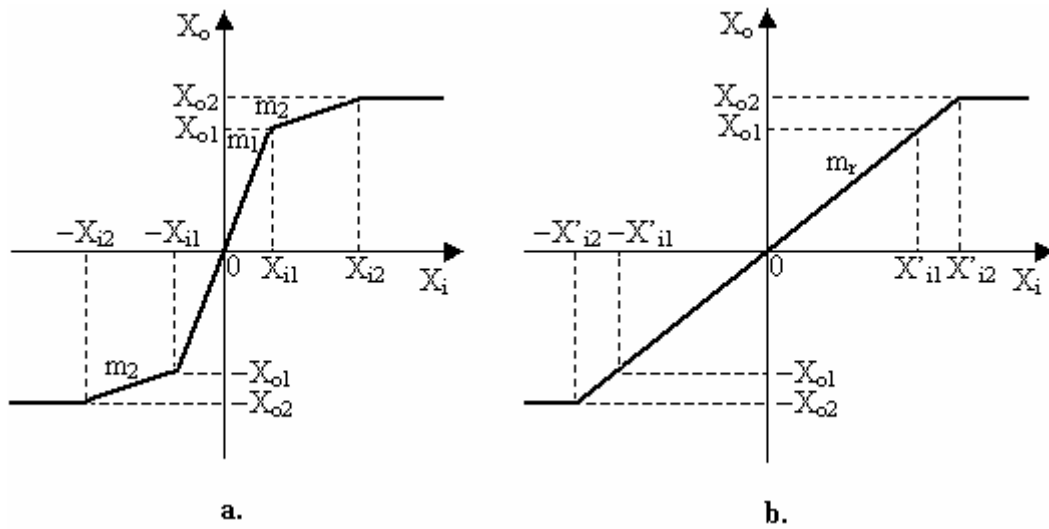


Fig. D.11. Caracteristicile statice de transfer ale amplificatorului: **a.** în buclă deschisă; **b.** în buclă închisă

Reducerea influenței semnalelor parazite asupra semnalului de ieșire. Reacția negativă reduce influența semnalelor perturbatoare asupra ieșirii, dacă aceste semnale parazite nu apar la intrarea amplificatorului. Considerând schema bloc generală a unui ARN în care se presupune că amplificatorul de pe calea directă conține două etaje, fiecare realizând o amplificare în bandă A_{10} , respectiv, A_{20} , și un semnal perturbator, x_p , care apare chiar la intrarea configurației (fig. D.12), semnalul de ieșire va fi

$$\underline{X}_o = \frac{A_{10} \cdot A_{20}}{1 + \beta_0 \cdot A_{10} \cdot A_{20}} (\underline{X}_s + \underline{X}_p) = \underline{X}_{ou} + \underline{X}_{op}. \quad (D.30)$$

Componenta parazită a semnalului de ieșire este notată cu x_{op} , iar componenta utilă – cu x_{ou} . Relația precedentă arată că, în acest caz, la ieșirea amplificatorului, se menține raportul semnal util/semnal parazit de la intrare,

$$\frac{\underline{X}_{ou}}{\underline{X}_{op}} = \frac{\underline{X}_s}{\underline{X}_p}, \quad (D.31)$$

indicând absența oricărui efect al RN.

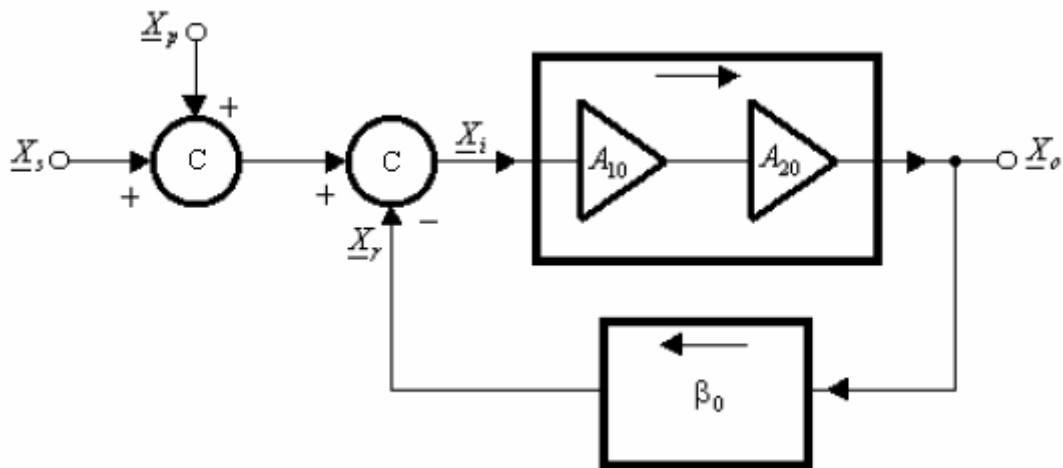


Fig. D.12. Semnalul parazit apare la intrarea ARN

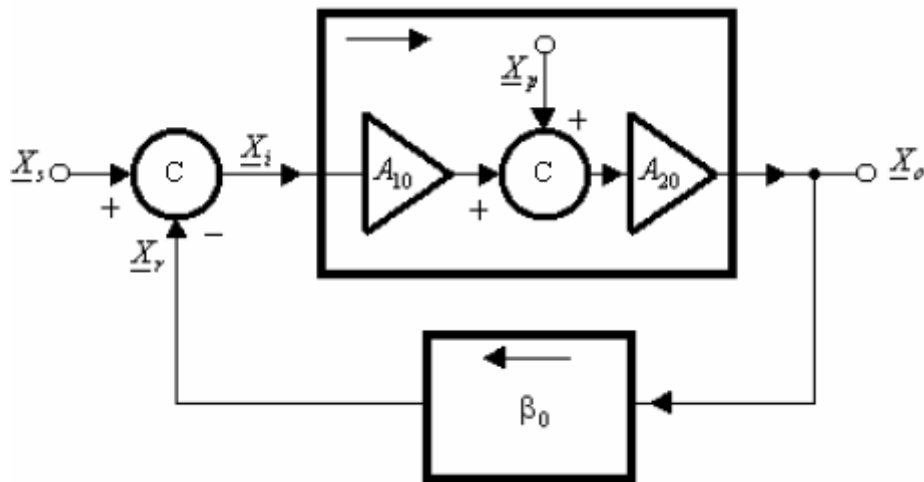


Fig. D.13. Semnalul parazit apare la intrarea etajului de ieșire al amplificatorului

Dacă se consideră că semnalul perturbator apare la intrarea celui de-al doilea etaj (fig. D.13), la ieșirea configurației, se va obține semnalul

$$\underline{X}_o = \frac{A_{10} \cdot A_{20}}{1 + \beta_0 \cdot A_{10} \cdot A_{20}} \cdot \underline{X}_s + \frac{A_{20}}{1 + \beta_0 \cdot A_{10} \cdot A_{20}} \cdot \underline{X}_p = \underline{X}_{ou} + \underline{X}_{op}, \quad (D.32)$$

iar

$$\frac{\underline{X}_{ou}}{\underline{X}_{op}} = A_{10} \cdot \frac{\underline{X}_s}{\underline{X}_p}. \quad (D.33)$$

Se constată că, atunci când semnalele parazite (zgomote, distorsiuni) nu apar la intrarea ARN, componenta parazită a semnalului de ieșire este mult mai mică decât componenta utilă, raportul semnal util / semnal parazit fiind îmbunătățit.

Subiecte pentru examen (Amplificatoare de semnal mic = ASM)

1. ASM. Caracteristici generale de regim armonic permanent: amplificarea în bandă, banda de frecvențe de trecere, produsul amplificare-bandă.
2. ASM. Reprezentarea tip cuadripol a amplificatorului: circuite echivalente, impedanța de intrare, impedanța de ieșire, amplificări; clasificarea ASM.
3. ASM. Răspunsul în frecvență: circuite echivalente la frecvențe joase ale amplificatorului de c.a. și la frecvențe înalte ale amplificatoarelor de c.a. și de c.c.; expresiile amplificărilor la frecvențe joase și înalte.
4. ARN. Schema bloc a ARN. Amplificarea în buclă închisă: amplificarea în bandă, banda de frecvențe de trecere, produsul amplificare-bandă.
5. ARN. Topologii de bază.