III.2.2.3. Impedanța de ieşire

Impedanța de ieşire se poate calcula ca raport între tensiunea de ieşire în gol, $V_{\text{OUT\_GOL}}$ şi curentul de ieşire în scurtcircuit, $I_{\text{OUT\_SC}}$, conform expresiei:

$$Z_{\text{OUT}} = \frac{V_{\text{OUT\_GOL}}}{I_{\text{OUT:\_SC}}}\,. \tag{III.32}$$

Pentru simplificarea, deoarece Z_{IR}, Z_{I}, Z_{R}, << Z_{D}, se vor neglija termenii respectivi. În aceste condiții, curentul de ieşire în scurtcircuit are expresia:

$$I_{\text{OUT:\_SC}} = \frac{V_0}{Z_0} + \frac{V_{\text{SC}}^{-}}{Z_{\text{R}}}\,, \tag{III.33}$$

unde V_{SC}^{-}, reprezentând tensiunea V^{-} în scurtcircuit, şi V_0 au expresiile:

$$V_{\text{SC}}^{-} = \frac{Z_{\text{R}}}{Z_{\text{I}} + Z_{\text{R}}} V_{\text{IN}}\,, \quad \text{iar} \quad V_0 = -aV_{\text{SC}}^{-}\,, \tag{III.34}$$

pe baza cărora (III.33) devine:

$$I_{\text{OUT:\_SC}} = \frac{-aZ_{\text{R}} + Z_0}{Z_0\left(Z_{\text{I}} + Z_{\text{R}}\right)} V_{\text{IN}}\,. \tag{III.35}$$

Exprimând V_{IN} în funcție de $V_{\text{OUT\_GOL}}$ şi de factorul de amplificare, conform (III.26), din (III.35) şi (III.32) rezultă expresia impedanței de ieşire:

$$Z_{\text{OUT}} = \frac{V_{\text{OUT\_GOL}}}{I_{\text{OUT:\_SC}}} = \frac{Z_0\left(Z_{\text{I}} + Z_{\text{R}}\right)}{aZ_{\text{I}}} = \frac{Z_0}{a\beta/(1+\beta)} = \frac{Z_0}{\beta A} = \frac{Z_0}{T}\,, \tag{III.36}$$

unde s-au avut în vedere (III.24) şi (III.25).

În concluzie, impedanța echivalentă de ieşire a amplificatorului inversor este egală cu impedanța de ieşire a AO divizată prin amplificare pe buclă, βA. Dacă $\beta A >> 1$, condiție de regulă îndeplinită, se poate considera că $Z_{\text{OUT}} \cong 0$.

III.2.3. AMPLIFICATORUL NEINVERSOR

III.2.3.1. Amplificarea

Schema amplificatorului neinversor este reprezentată în Fig.III.18, pe baza căreia ecuația de transfer se poate pune sub forma:

$$V_{\text{OUT}} = a\left(V_{\text{IN}} - V_{\text{B}}\right), \tag{III.37}$$

unde a reprezintă amplificarea în buclă deschisă, iar V_{B} o variabilă ajutătoare, reprezentând tensiunea pe intrarea inversoare a AO. Considerând curentul de intrare zero şi aplicând regula divizorului de tensiune se obține expresia V_{B}:

$$V_B = \frac{Z_I}{Z_I + Z_R} V_{OUT} . \qquad \text{(III.38)}$$

Din (III.37) şi (III.38) se poate determina forma explicită a ecuației de transfer:

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{a}{1 + \dfrac{aZ_I}{Z_I + Z_R}} . \qquad \text{(III.39)}$$

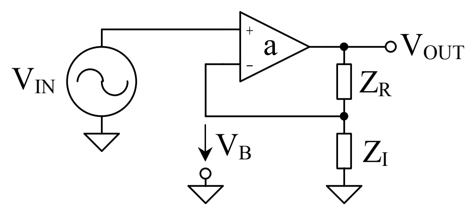

Fig.III.18. ***Amplificatorul neinversor.***

Schema echivalentă pentru determinarea amplificării pe buclă este identică cu cea a amplificatorului inversor (Fig.III.16.b). Deci şi amplificarea pe buclă va fi identică cu cea amplificatorului inversor, conform (III.23).

Dacă se identifică termenii între ecuația de transfer generală, (III.16) şi cea a amplificatorului neinversor, (III.39), se obține:

$$A = a ; \quad T = \beta A = \frac{aZ_I}{Z_I + Z_R} ; \quad \text{deci} \quad \beta = \frac{\beta A}{A} = \frac{Z_I}{Z_I + Z_R} . \qquad \text{(III.40)}$$

Introducând β în (III.40) şi (III.39), se obțin expresiile A, βA şi A_V în funcția de amplificarea în buclă deschisă a AO, a şi de factorul de reacție, β:

$$A = a ; \quad T = \beta A = \beta a ; \quad \text{şi} \quad A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{a}{1 + \beta a} . \qquad \text{(III.41)}$$

Considerând AO ideal, $a = \infty$, adică $A = \infty$ deci $\beta A >> 1$, (III.39) devine:

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{Z_I + Z_R}{Z_I} = 1 + \frac{Z_R}{Z_I} = \frac{1}{\beta} . \qquad \text{(III.42)}$$

III.2.3.2. Impedanța de intrare

Impedanța de intrare a amplificatorului neinversor se calculează în aceleaşi ipoteze ca şi în cazul amplificatorului inversor (pct.III.2.2.2). Schema echivalentă a amplificatorului neinversor este reprezentată în Fig.III.19, pe baza căreia impedanța de intrare, Z_{IN}, se poate calcula cu relațiile:

$$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}}, \quad \text{unde} \quad I_{IN} = \frac{V_{IN} - V^-}{Z_{IR} + Z_D}. \tag{III.43}$$

Aplicând metoda suprapunerii efectelor, se calculează expresiile V^+, V_0 şi V^-:

$$V^+ = \frac{Z_D + Z_I \| (Z_R + Z_0) V_{IN}}{Z_{IR} + Z_D + Z_I \| (Z_R + Z_0)} + \frac{Z_{IR}}{Z_{IR} + Z_D} \cdot \frac{Z_I \| (Z_D + Z_{IR}) V_0}{Z_0 + Z_R + Z_I \| (Z_D + Z_{IR})}$$

$$V_0 = a(V^+ - V^-) \tag{III.44}$$

$$V^- = \frac{Z_I \| (Z_R + Z_0)}{Z_{IR} + Z_D + Z_I \| (Z_R + Z_0)} V_{IN} + \frac{Z_I \| (Z_D + Z_{IR})}{Z_0 + Z_R + Z_I \| (Z_D + Z_{IR})} V_0$$

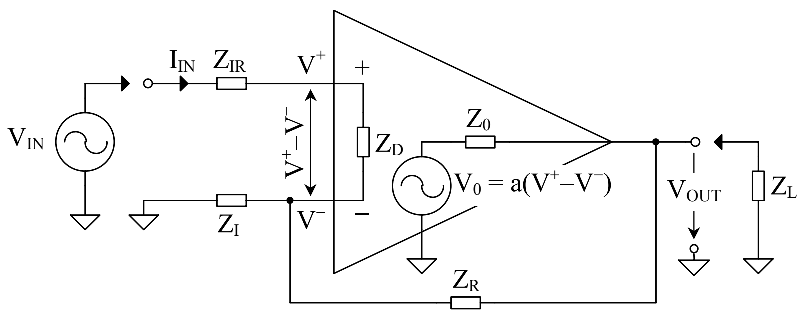

Fig.III.19. ***Schema echivalentă a amplificatorul neinversor.***

Fiind îndeplinite condiţiile: $Z_0 << Z_R$ şi Z_{IR}, Z_I, Z_R, $<< Z_D$, se pot neglija termeni corespunzători. În aceste condiţii sistemul de ecuaţii (III.44), devine:

$$V^+ = V_{IN}; \quad V_0 = a(V_{IN} - V^-); \quad V^- = \frac{Z_I}{Z_I + Z_R} V_0 = \beta V_0 = \frac{\beta a}{1 + \beta a} V_{IN}, \tag{III.45}$$

rezultat care, introdus în (III.43), conduce la forma finală a expresiei Z_{IN}:

$$Z_{IN} = Z_D(1 + \beta a) = Z_D(1 + \beta A) \cong Z_D \beta A = Z_D T \leq Z_C. \tag{III.46}$$

În concluzie, impedanţa de intrare a amplificatorului neinversor este egală cu impedanţa diferenţială a AO multiplicată cu amplificarea pe buclă. La prima vedere s-ar părea că amplificatorul neinversor ar putea avea Z_{IN} oricât de mare. Însă Z_{IN} este limitată fizic la valoarea impedanţei de mod comun, Z_C.

III.2.3.3. Impedanţa de ieşire

Impedanţa de ieşire se poate calcula ca raport între tensiunea de ieşire în gol, V_{OUT_GOL} şi curentul de ieşire în scurtcircuit, I_{OUT_SC}, conform expresiei:

$$Z_{\mathrm{OUT}} = \frac{V_{\mathrm{OUT\_GOL}}}{I_{\mathrm{OUT:\_SC}}}. \qquad \text{(III.47)}$$

Pentru simplificarea, deoarece Z_{IR}, Z_{I}, Z_{R}, << Z_{D}, se vor neglija termenii respectivi. În aceste condiții, curentul de ieşire în scurtcircuit are expresia:

$$I_{\mathrm{OUT:\_SC}} = \frac{V_0}{Z_0} + \frac{V_{\mathrm{SC}}^{-}}{Z_{\mathrm{R}}}, \qquad \text{(III.48)}$$

unde V_{SC}^{-}, reprezentând tensiunea V^{-} în scurtcircuit, şi V_0 au expresiile:

$$V_{\mathrm{SC}}^{-} = 0, \quad \text{iar} \quad V_0 = aV_{\mathrm{IN}}, \qquad \text{(III.49)}$$

pe baza cărora (III.48) devine:

$$I_{\mathrm{OUT:\_SC}} = \frac{aV_{\mathrm{IN}}}{Z_0}. \qquad \text{(III.50)}$$

Exprimând V_{IN} în funcție de $V_{\mathrm{OUT\_GOL}}$ şi de factorul de amplificare, conform (III.42), din (III.50) şi (III.47) rezultă expresia impedanței de ieşire:

$$Z_{\mathrm{OUT}} = \frac{V_{\mathrm{OUT\_GOL}}}{I_{\mathrm{OUT:\_SC}}} = \frac{Z_0}{\beta a} = \frac{Z_0}{\beta A} = \frac{Z_0}{T}, \qquad \text{(III.51)}$$

unde s-au avut în vedere (III.40) şi (III.41).

În concluzie, impedanța echivalentă de ieşire a amplificatorului inversor este egală cu impedanța de ieşire a AO divizată prin amplificare pe buclă, βA. Dacă $\beta A >> 1$, condiție de regulă îndeplinită, se poate considera că $Z_{\mathrm{OUT}} \cong 0$.

Conform (III.36) şi (III.51), impedanța de ieşire are aceeaşi valoare pentru ambele tipuri de amplificatoare, inversor şi neinversor.

III.2.4. REPETORUL DE TENSIUNE

III.2.4.1. Amplificarea

Schema repetorului de tensiune este reprezentată în Fig.III.20, pe baza căreia ecuația de transfer se poate pune sub forma:

$$V_{\mathrm{OUT}} = a\left(V_{\mathrm{IN}} - V_{\mathrm{B}}\right), \qquad \text{(III.52)}$$

unde a reprezintă amplificarea în buclă deschisă, iar V_{B} o variabilă ajutătoare, identică cu tensiunea pe intrarea inversoare a AO. Având în vedere că:

$$V_{\mathrm{B}} = V_{\mathrm{OUT}}, \qquad \text{(III.53)}$$

din (III.51) rezultă forma explicită a ecuației de transfer:

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{a}{1+a}. \quad \text{(III.54)}$$

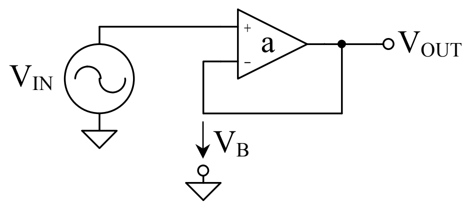

Fig.III.20. ***Repetorul de tensiune.***

Dacă se identifică termenii între ecuația de transfer generală, (III.16) şi cea a repetorului de tensiune, (III.54), se obține:

$$A = a; \quad \beta A = a; \quad \text{deci} \quad \beta = 1. \quad \text{(III.55)}$$

Considerând AO ideal, $a = \infty$, adică $A = \infty$ deci $\beta A >> 1$, (III.54) devine:

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 = \frac{1}{\beta}, \quad \text{(III.56)}$$

reprezentând factorul de amplificare al repetorului de tensiune ideal.

Considerând $\beta = 1$ în expresia impedanței de intrare a amplificatorului neinversor, (III.46), rezultă expresia impedanței de intrare a repetorului:

$$Z_{IN} = Z_D a = Z_D A = Z_D T \leq Z_C. \quad \text{(III.57)}$$

În mod analog, considerând $\beta = 1$, din (III.51) rezultă impedanța de ieşire:

$$Z_{OUT} = \frac{Z_0}{a} = \frac{Z_0}{A} = \frac{Z_0}{T}. \quad \text{(III.58)}$$

Deci, în ceea ce priveşte Z_{IN} şi Z_{OUT}, repetorul de tensiune este mai performant decât amplificatorul neinversor, deoarece prezintă Z_{IN} mai mare de $1/\beta$ ori şi Z_{OUT} mai mic de $1/\beta$ ori. Dacă $\beta A = T >> 1$, aceste diferențe se atenuează, astfel încât nu mai contează din punct de vedere practic.

Repetorul de tensiune este un caz limită al amplificatorului neinversor, corespunzător unei reacții negative totale sau unei amplificări unitare. Dacă pentru celelalte configurații de amplificator, conform (III.24), (III.40), factorul de reacție β este subunitar, în cazul repetorului de tensiune atinge valoarea maximă $\beta = 1$. Ca urmare, pentru o anumită amplificare în buclă deschisă, a, amplificarea pe buclă a repetorului fiind maximă, $T = \beta A = A = a$, rezultă că din punct de vedere al stabilității repetorului de tensiune este cel mai deficitar.

III.2.5. AMPLIFICATORUL DIFERENȚIAL

Schema amplificatorului diferențial este reprezentată în Fig.III.21, pe baza căreia ecuația de transfer se poate pune sub forma:

$$V_{\mathrm{OUT}} = aV_{\mathrm{E}} = a\left(V^{+} - V^{-}\right), \qquad \text{(III.59)}$$

unde a reprezintă amplificarea în buclă deschisă, V_{E} – o variabilă ajutătoare, reprezentând tensiunea diferențială, iar V^{+}, V^{-} – tensiunile pe intrările AO. Considerând curentul de intrare zero, aplicând regula divizorului de tensiune şi teorema superpoziției, se obțin expresiile tensiunilor pe intrările AO:

$$V^{+} = \frac{Z_{\mathrm{R}}}{Z_{\mathrm{I}} + Z_{\mathrm{R}}} V_{\mathrm{IN2}} \quad \text{şi} \quad V^{-} = \frac{Z_{\mathrm{R}}}{Z_{\mathrm{I}} + Z_{\mathrm{R}}} V_{\mathrm{IN1}} + \frac{Z_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{I}} + Z_{\mathrm{R}}} V_{\mathrm{OUT}} . \qquad \text{(III.60)}$$

Din (III.59) şi (III.60) se poate determina forma explicită a ecuației de transfer:

$$A_{\mathrm{V}} = \frac{V_{\mathrm{OUT}}}{V_{\mathrm{IN}}} = \frac{\dfrac{aZ_{\mathrm{R}}}{Z_{\mathrm{I}} + Z_{\mathrm{R}}}}{1 + \dfrac{aZ_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{I}} + Z_{\mathrm{R}}}} . \qquad \text{(III.61)}$$

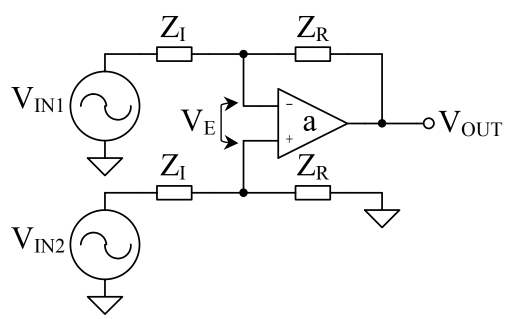

Fig.III.21. ***Amplificatorul diferențial.***

Dacă se identifică termenii între ecuația de transfer generală, (III.16) şi cea a amplificatorului diferențial, (III.61), se obține:

$$A = \frac{aZ_{\mathrm{R}}}{Z_{\mathrm{I}} + Z_{\mathrm{R}}}; \quad T = \beta A = \frac{aZ_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{I}} + Z_{\mathrm{R}}}; \quad \text{deci} \quad \beta = \frac{\beta A}{A} = \frac{Z_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{R}}} . \qquad \text{(III.62)}$$

Introducând β în (III.62) şi (III.61), se obțin expresiile A, βA şi A_{V} în funcția de amplificarea în buclă deschisă a AO, a şi de factorul de reacție, β:

$$A=\frac{a}{1+\beta};\quad T=\beta A=\frac{\beta a}{1+\beta};\quad \text{şi}\quad A_{\mathrm{V}}=\frac{V_{\mathrm{OUT}}}{V_{\mathrm{IN}}}=\frac{a}{1+\beta(1+a)}. \qquad \text{(III.63)}$$

Considerând AO ideal, $a=\infty$, adică $A=\infty$ deci $\beta A >> 1$, (III.61) devine:

$$A_{\mathrm{V}}=\frac{V_{\mathrm{OUT}}}{V_{\mathrm{IN}}}=\frac{Z_{\mathrm{R}}}{Z_{\mathrm{I}}}=\frac{1}{\beta}, \qquad \text{(III.64)}$$

reprezentând factorul de amplificare al amplificatorului diferențial ideal.

Impedanțele de intrare ale amplificatorului diferențial au expresiile:

$$Z_{\mathrm{IN}}^{-}\cong Z_{\mathrm{I}} \quad \text{şi} \quad Z_{\mathrm{IN}}^{+}=Z_{\mathrm{I}}+Z_{\mathrm{R}}=Z_{\mathrm{IR}}, \qquad \text{(III.65)}$$

unde Z_{IN}^{-} se referă la intrarea inversoare, fiind egală cu impedanța de intrare a amplificatorului inversor, (III.31), iar Z_{IN}^{+} se referă la intrarea neinversoare.

Impedanța de ieşire a amplificatorului diferențial are expresia:

$$Z_{\mathrm{OUT}}=\frac{Z_0}{a\beta/(1+\beta)}=\frac{Z_0}{\beta A}=\frac{Z_0}{T}, \qquad \text{(III.66)}$$

fiind egală cu cea a amplificatoarelor inversor şi neinversor, (III.36), (III.51).

Pentru fi posibilă o analiză comparativă a tipurilor de amplificatoare realizate cu AO, în Tabelul III.1 se prezintă o sinteză a principalilor parametri.

Tabel III.1

Parametrii amplificatoarelor cu reacție pe bază de AO

X	Amplificator inversor	Amplificator neinversor	Repetor de tensiune	Amplificator diferențial
β	$\frac{Z_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{R}}}$	$\frac{Z_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{I}}+Z_{\mathrm{R}}}$	1	$\frac{Z_{\mathrm{I}}}{Z_{\mathrm{R}}}$
A	$\frac{a}{1+\beta}$	a	a	$\frac{a}{1+\beta}$
$T=\beta A$	$\frac{\beta a}{1+\beta}$	βa	a	$\frac{\beta a}{1+\beta}$
A_{V}	$\frac{-a}{1+\beta(1+a)}\cong-\frac{1}{\beta}$	$\frac{a}{1+\beta a}\cong\frac{1}{\beta}$	$\frac{a}{1+a}\cong 1$	$\frac{a}{1+\beta(1+a)}\cong\frac{1}{\beta}$
Z_{IN}	$Z_{\mathrm{I}}+\frac{Z_{\mathrm{R}}}{1+a}\cong Z_{\mathrm{I}}$	$Z_{\mathrm{D}}(1+T)$ $\cong Z_{\mathrm{D}}T$	$Z_{\mathrm{D}}(1+T)$ $\cong Z_{\mathrm{D}}T$	$Z_{\mathrm{IN}}^{+}\cong Z_{\mathrm{I}}$ $Z_{\mathrm{IN}}^{-}=Z_{\mathrm{I}}+Z_{\mathrm{R}}$
Z_{OUT}	$\frac{Z_0}{T}$	$\frac{Z_0}{T}$	$\frac{Z_0}{T}$	$\frac{Z_0}{T}$

III.2.6. BANDA DE FRECVENȚĂ ŞI STABILITATEA

III.2.6.1. Banda de frecvență

Banda de frecvența a AO în buclă deschisă fiind cunoscută (în foile de catalog este prezentată grafic caracteristică amplitudine-frecvență), se pune problema determinării benzii de frecvență a amplificatoarelor cu AO în buclă închisă.

Amplificarea în buclă închisă a unui amplificator neinversor fiind:

$$A_{\mathrm{V}} = \frac{V_{\mathrm{OUT}}}{V_{\mathrm{IN}}} = \frac{a}{1+\beta a}, \tag{III.67}$$

iar a unui amplificator inversor şi diferențial fiind:

$$A_{\mathrm{V}} = \frac{V_{\mathrm{OUT}}}{V_{\mathrm{IN}}} = \frac{a}{1+\beta(1+a)} \cong \frac{a}{1+\beta a}, \tag{III.68}$$

unde s-a avut în vedere că $a >> 1$, se poate analiza banda de frecvență pentru amplificatoarele în buclă închisă pe baza expresiei generale a reacției, (III.16):

$$A_{\mathrm{V}} = \frac{V_{\mathrm{OUT}}}{V_{\mathrm{IN}}} = \frac{A}{1+\beta A} = \frac{1}{1+T}, \tag{III.69}$$

unde $T = \beta A$, iar $A = a$ reprezintă amplificarea în buclă deschisă.

AO real are mai mulți poli, care fiind compensați intern, AO prezintă o caracteristică amplitudine-frecvență cu un singur pol dominant (Fig.III.12). Prin urmare, amplificarea AO în buclă deschisă are expresia generală:

$$A = \frac{A_0}{1+j\omega/\omega_0} = \frac{A_0}{1+jf/f_0}, \tag{III.70}$$

unde ω_0 reprezintă pulsația polului, iar f_0 – frecvența polului.

Introducând (III.70) în (III.69) se obține:

$$A_{\mathrm{V}} = \frac{V_{\mathrm{OUT}}}{V_{\mathrm{IN}}} = \frac{A_{\mathrm{V0}}}{1+jf/f_0(1+\beta A_0)} = \frac{A_{\mathrm{V0}}}{1+jf/f_{\mathrm{V}}}, \tag{III.71}$$

unde A_{V0} şi $T_0 = \beta A_0$ sunt valorile de curent continuu pentru A_{V} şi T, iar f_{V} este frecvența polului amplificării în buclă închisă, A_{V}, având următoarele expresii:

$$A_{\mathrm{V0}} = \frac{A_0}{1+\beta A_0} = \frac{A_0}{1+T_0} \quad \text{şi} \quad f_{\mathrm{V}} = f_0(1+\beta A_0) = f_0(1+T_0). \tag{III.72}$$

Din (III.72) se observă că frecvența polului în buclă închisă este mai mare de $(1 + T_0)$ ori decât frecvența polului amplificării în buclă deschisă.

Tot din (III.72) se mai poate observa şi că produsul $A_{V0}f_V$ este constant:

$$A_{V0}f_V = \frac{A_0}{1+\beta A_0} f_0\left(1+\beta A_0\right) = A_0 f_0 = const. \qquad \text{(III.73)}$$

Deoarece AO sunt amplificatoare cu cuplaj direct, în curent continuu, frecvenţa polilor este identică cu banda de frecvenţă la 3 dB. Deci (III.73) reprezintă produsul amplificare-bandă, GBW, conform (III.11), din care pentru amplificare unitară rezultă banda la amplificare unitară, B_1, conform (III.10).

III.2.6.2. Banda de frecvenţă

Banda de frecvenţa a AO în buclă deschisă fiind cunoscută (în foile de catalog