

## AMPLIFICATORUL OPERAȚIONAL REAL

### 4.1 Introducere

În circuitele realizate cu amplificatoare operaționale (AO) și studiate până în acest moment, AO s-a presupus ideal. În practică nici una dintre presupunerile de idealitate nu este în totalitate adevărată și pentru a putea proiecta în condiții bune circuitele realizate cu AO, trebuie cunoscute limitările introduse de conceptul de idealitate.

Abaterile de la idealitate ale AO se caracterizează cu ajutorul parametrilor AO. În activitatea de proiectare, proiectantul trebuie să estimeze nivelul limitărilor și să selecționeze acel tip de AO ai cărui parametri permit să se mențină presupunerile de idealitate pentru condițiile de lucru impuse.

În acest capitol se iau în considerare efectele valorilor finite ale amplificării în buclă deschisă, ale rezistenței de intrare și ieșire.

Se prezintă modelul unui AO care are valori finite ale amplificării în buclă deschisă, rezistenței de intrare și ieșire. Pe acest model, pentru fiecare din cele două configurații de bază se deduc formulele pentru amplificarea în buclă închisă, rezistențele de intrare și ieșire ale montajului.

### 4.2 Modelul AO frecvențe foarte joase

Amplificatorul operațional real are valori finite ale amplificării în buclă deschisă, rezistenței de intrare și ieșire. În c.c. și la foarte joasă frecvență, aceste mărimi se apropie de cele ale AO ideal în sensul că amplificarea în buclă deschisă și rezistența de intrare au valori foarte mari dar nu infinite, iar rezistența de ieșire este mică dar diferită de zero.

Pentru toate aceste mărimi de valori finite, modelul de circuit are aspectul din fig.4.1.

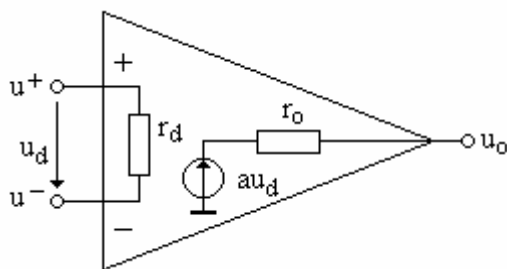


Fig. 4.1. Modelul AO la frecvențe foarte joase

Rezistența notată cu  $r_d$  este rezistența văzută între intrarea neinversoare și cea inversoare și se numește **rezistență de intrare diferențială** a AO. Cu  $r_o$  s-a notat **rezistența de ieșire** a AO. Amplificarea notată cu  $a$ , este, de fapt, o **amplificare diferențială în buclă deschisă**, dar se va numi pe scurt amplificare în buclă deschisă.

**Valorile tipice pentru AO de tipul 741** se pot afla studiind parametrii de catalog pentru acest amplificator operațional (Anexa 2). Astfel, pentru rezistența de intrare diferențială,  $r_d$  se găsește termenul *Rezistență de intrare*. Valoarea tipică este de  $2\text{M}\Omega$  iar cea minimă de  $0,3\text{M}\Omega$ . În foile de catalog se prezintă și dependența în funcție de temperatură a rezistenței de intrare. Analiza

acestor curbe ne dezvăluie faptul că rezistența de intrare crește odată cu temperatura, deci valorile date sunt doar orientative.

Rezistența de ieșire,  $r_o$  se găsește sub același nume - *Rezistența de ieșire*. Valoarea tipică este de  $75\Omega$ , fără să se indice valorile maximă și minimă.

Amplificarea în buclă deschisă,  $a$  se găsește sub denumirea *Amplificare (câștig) în tensiune la semnal mare*. În c.c. sau la foarte joasă frecvență, valoarea tipică pentru AO de tipul 741 este de 200.000, valoarea minimă fiind 50.000. În funcție de exemplar, există o abatere mare a acestui parametru, dar indiferent de valoarea individuală, amplificarea scade odată cu creșterea frecvenței semnalului amplificat. Valorile date sunt valabile numai în c.c. și la frecvențe joase, până la câțiva Hz.

Datele de catalog prezentate pentru amplificatorul 741 sunt tipice pentru AO realizate cu tranzistoare bipolare. O deosebire majoră față de AO realizate cu tranzistoare cu efect de câmp constă în faptul că acestea au rezistența de intrare mult mai mare decât AO cu tranzistoare bipolare ( $10^{12}\Omega$ ).

**Exemplul 4.1.** În fig.4.2 se dă modelul la foarte joasă frecvență al unui AO. Să se precizeze valorile pentru: rezistența de intrare diferențială, rezistența de ieșire și amplificarea în buclă deschisă.

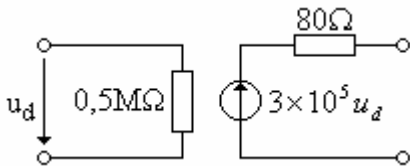


Fig. 4.2. Circuitul pentru exemplul 4.1

**Rezolvare:** Cele trei valori se citesc imediat prin analogie cu modelul din fig.4.1 și sunt:

$$r_d = 0,5M\Omega; r_o = 80\Omega; a = 3 \times 10^5$$

### 4.3 Amplificatorul neinvertor. Determinarea amplificării în buclă închisă, a rezistențelor de intrare și ieșire

Se vor lua în considerare efectele globale de circuit atunci când AO dintr-o configurație neinvertor se înlocuiește cu modelul real din fig.4.1.

#### 4.3.1 Amplificarea în buclă închisă

Se consideră amplificatorul neinvertor din fig.4.3.

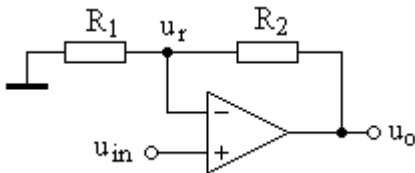


Fig. 4.3. Amplificatorul neinvertor, utilizat în analiza efectelor datorate valorilor finite ale amplificării în buclă închisă, rezistenței de intrare și ieșire

Analiza simultană a efectului celor trei parametri este greoaie și de aceea se consideră influența lor pe rând. Cele mai importante efecte asupra amplificării în buclă închisă sunt date de amplificarea diferențială în buclă deschisă. De aceea se va considera că amplificarea  $a$  este finită și se va neglija influența celorlalți doi parametri,  $r_d$  și  $r_o$ .

Se fac următoarele aproximări:

1. Pentru amplificatorul din fig.4.3 se consideră că tensiunea de ieșire este  $u_o = a(u_{in} - u_r)$ , chiar și atunci când se conectează o sarcină la ieșirea AO. Presupunerea este rezonabilă pentru multe

condiții de funcționare pentru că, așa cum se va vedea mai târziu, valoarea rezistenței de ieșire în buclă închisă este suficient de mică și astfel căderea internă de tensiune se poate neglija.

2. Se va considera că valorile de semnal ale curenților prin intrările AO sunt neglijabile în raport cu cele care curg prin rezistoarele  $R_1$  și  $R_2$ .

În consecință tensiunea de reacție  $u_r$  se poate determina aplicând regula divizorului de tensiune:

$$u_r = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o \quad (4.1)$$

Schema bloc a unui amplificator neinversor cu reacție se prezintă în fig.4.4.

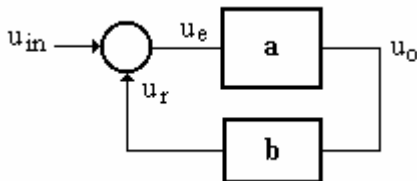


Fig. 4.4. Schema bloc de amplificator cu reacție, utilizat în analiza circuitului neinversor

**Amplificarea directă în buclă deschisă** este **a** iar **factorul de reacție** s-a notat cu **b**. Cerculețul din stânga figurii reprezintă un punct efectiv de sumare (algebrică) în care semnalul de reacție  $u_r$  este scăzut din cel de intrare  $u_{in}$  și se obține semnalul de „eroare“  $u_e$ :

$$u_e = u_{in} - u_r \quad (4.2)$$

În cazul AO, semnalul de eroare reprezintă chiar tensiunea de intrare diferențială,  $u_d$ .

Tensiunea de ieșire  $u_o$  se obține multiplicând semnalul de eroare cu  $a$ :

$$u_o = a u_e = a(u_{in} - u_r) \quad (4.3)$$

Semnalul de reacție se obține din cel de ieșire după ce se multiplică cu  $b$ :

$$u_r = b u_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o \quad (4.4)$$

unde

$$b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4.5)$$

reprezintă fracțiunea din tensiunea de ieșire adusă la intrarea circuitului.

Dacă se înlocuiește relația (4.4) în (4.3), se găsește expresia generală a amplificării în buclă închisă a circuitului neinversor. Amplificarea în buclă închisă se notează cu  $A$ .

$$A = \frac{a}{1 + ab} \quad (4.6a)$$

sau scrisă sub forma echivalentă:

$$A = \frac{1}{1 + \frac{1}{ab}} \quad (4.6b)$$

Relațiile (4.6) sunt valabile pentru orice amplificator care poate fi reprezentat prin modelul din fig.4.4.

Parametrul  $ab$  care apare în ambele relații (4.6) se numește **câștigul buclei** sau **transmisia pe buclă** și se notează cu  $T$ :

$$T = ab \quad (4.7)$$

Dacă se presupune câștigul buclei foarte mare, adică  $T \gg 1$ , atunci  $1/T$  va fi mult mai mic decât unitatea și amplificarea în buclă închisă devine:

$$A \cong \frac{1}{b}, \text{ pentru } ab \gg 1 \quad (4.8)$$

Aceasta este una dintre cele mai importante rezultate ale reacției negative și se află la baza proiectării unui număr mare de circuite liniare. În cazul circuitelor realizate cu amplificatoare operaționale,  $a$  este amplificarea în buclă deschisă a AO și s-a arătat mai înainte că valoarea acesteia nu se poate cunoaște cu precizie, fiind supusă la fluctuații. Parametrul notat  $b$  este funcția de transfer a unei rețele rezistive și se poate determina cu precizie foarte mare. Dacă se combină o astfel de rețea rezistivă de precizie cu un amplificator și se realizează o valoare cât mai mare pentru câștigul buclei, atunci amplificarea în buclă închisă va depinde esențial numai de rețeaua rezistivă. În majoritatea aplicațiilor  $b$  este subunitar astfel că rezultă o amplificare ( $1/b=A>1$ ).

La circuitul neinversor, prin înlocuirea relației (4.5) în (4.6b), amplificarea în buclă închisă devine:

$$A = \frac{\frac{R_1 + R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_1 + R_2}{aR_1}} \quad (4.9)$$

Relația (4.9) permite calculul amplificării în buclă închisă a circuitului neinversor în funcție de amplificarea în buclă deschisă. Se observă că dacă  $a \rightarrow \infty$ , atunci amplificarea în buclă închisă atinge valoarea ideală. Deoarece  $b = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ , se observă că amplificarea ideală în buclă închisă este

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{1}{b}, \text{ fiind în concordanță cu relația (4.8).}$$

Numitorul relației (4.9) arată că dacă  $a$  este mai mare atunci se poate îmbunătăți aproximarea de idealitate a amplificării în buclă închisă. Dacă se dorește, de exemplu, o valoare mare a amplificării în buclă închisă, atunci trebuie să se mărească factorul  $\frac{R_1 + R_2}{R_1}$  iar ca efect, câștigul buclei va scădea. În consecință, cu cât se mărește valoarea amplificării în buclă închisă, se mărește și abaterea valorii acesteia față de amplificarea ideală.

### 4.3.2 Rezistența de intrare

Se consideră circuitul din fig.4.5, unde s-a reprezentat și rezistența de intrare diferențială a AO,  $r_d$ . Se va determina rezistența de intrare a circuitului în buclă închisă.

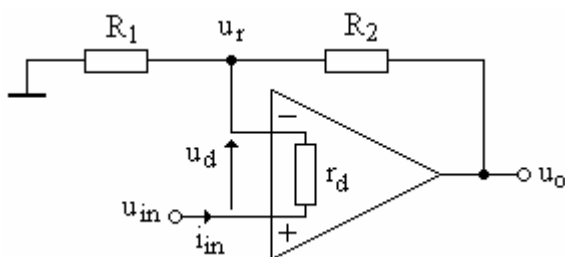


Fig. 4.5. Circuitul utilizat pentru determinarea valorii finite a rezistenței de intrare a amplificatorului neinversor

Se presupune că semnalul de intrare,  $u_{in}$  se aplică direct la intrarea neinversoare. Deoarece nu se mai consideră că rezistența de intrare a AO este infinită (ca în cazul ideal), prin intrarea neinversoare va circula un curent diferit de zero și notat cu  $i_{in}$ . Căderea de tensiune pe rezistența  $r_d$  este tensiunea de intrare diferențială și este egală cu  $u_{in} - u_r$ , astfel că pentru curentul de intrare se poate scrie relația:

$$i_{in} = \frac{u_{in} - u_r}{r_d} \quad (4.10)$$

Se presupune că acest curent este suficient de mic, mai mic decât curentul prin rezistoarele  $R_1$  și  $R_2$ , astfel încât să rămână valabile relațiile (4.3) și (4.4). În aceste condiții rezultă:

$$i_{in} = \frac{u_{in} - bu_o}{r_d} \quad (4.11)$$

Tensiunea de ieșire se poate scrie:

$$u_o = a(u_{in} - u_r) \quad (4.12)$$

unde s-a neglijat valoarea mică a căderii de tensiune pe rezistența de ieșire (diferită de zero) a circuitului.

Tensiunea diferențială  $u_{in} - u_r$  se poate exprima în funcție de curentul de intrare și rezistența diferențială de intrare:

$$u_d = u_{in} - u_r = r_d \cdot i_{in} \quad (4.13)$$

Dacă se înlocuiește relația (4.13) în (4.12) se obține:

$$u_o = ar_d i_{in} \quad (4.14)$$

și dacă se înlocuiește relația (4.14) în (4.11) se obține:

$$i_{in} = \frac{u_{in} - abr_d i_{in}}{r_d} \quad (4.15)$$

După rezolvare în funcție de  $\frac{u_{in}}{i_{in}}$ , se găsește că rezistența de intrare,  $R_{in}$  a circuitului neinversor este:

$$R_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = (1 + ab)r_d \quad (4.16)$$

Relația (4.16) arată că *rezistența de intrare a configurației neinversoare este de (1+ab) ori mai mare decât rezistența de intrare diferențială a amplificatorului operațional*. Deoarece câștigul buclei are, uzual, valori mari, într-o funcționare stabilă în buclă închisă, rezistența de intrare a amplificatorului neinversor este deosebit de mare.

De exemplu, să presupunem că un anumit tip de AO are rezistența de intrare diferențială egală cu 500kΩ și amplificarea în buclă deschisă  $10^5$ . AO este conectat într-o configurație neinversoare la care factorul de reacție  $b=10^{-3}$ . Pentru aceste valori tipice rezultă o valoare de 50MΩ a rezistenței de intrare a configurației neinversoare. Cu toate că s-au făcut unele aproximări, nivelul de rezistență este suficient de mare pentru a se justifica presupunerea că, pentru majoritatea aplicațiilor, amplitudinea curentului  $i_{in}$  este foarte mică în comparație cu valoarea curentului prin  $R_1$  și  $R_2$ .

Câștigul buclei este tipic suficient de mare pentru ca relația (4.16) să se exprime astfel: *rezistența de intrare a configurației neinversoare este aproximativ egală cu produsul dintre câștigul buclei și rezistența de intrare diferențială în buclă deschisă a AO*, adică

$$R_{in} \cong ab \times r_d \quad (4.17)$$

### 4.3.3 Rezistența de ieșire

Pentru a determina expresia rezistenței de ieșire a circuitului se folosește montajul din fig.4.6. Intrarea s-a conectat la masă (sursa de semnal s-a pasivizat) iar la ieșire s-a legat sursa de tensiune de test  $u_x$  care debitează curentul  $i_x$ . Sursa dependentă este  $a(u_{in} - u_r) = a(0 - u_r) = -au_r$ . Curentul  $i_x$  are două componente, notate  $i_1$  și  $i_2$ .

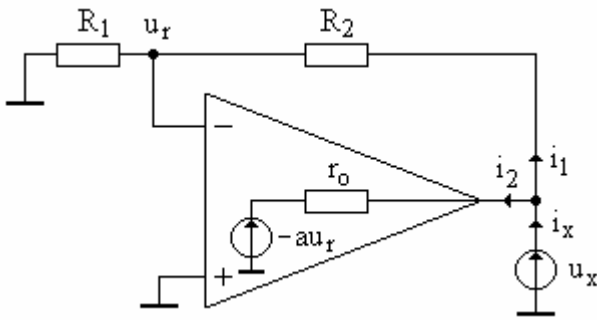


Fig. 4.6. Circuitul utilizat pentru determinarea rezistenței de ieșire, diferită de zero, a amplificatorului neinversor

Dacă se neglijează din nou curentul de intrare în raport cu cel care trece prin rezistoarele  $R_1$  și  $R_2$ , componenta  $i_1$  se scrie:

$$i_1 = \frac{u_x}{R_1 + R_2} \quad (4.18)$$

Pentru componenta  $i_2$ , relația de calcul este:

$$i_2 = \frac{u_x - (-au_r)}{r_o} = \frac{u_x + au_r}{r_o} \quad (4.19)$$

Tensiunea de reacție are expresia:

$$u_r = bu_x \quad (4.20)$$

Dacă se înlocuiește relația (4.20) în (4.19) se găsește:

$$i_2 = \frac{(1+ab)u_x}{r_o} \quad (4.21)$$

Se pot face următoarele observații: tipic, numărătorul relației (4.21) este mai mare decât cel al relației (4.18). În schimb, numitorul relației (4.21) este tipic mult mai mic decât cel al relației (4.18). Conform acestor două constatări se poate afirma că  $i_2 \gg i_1$  și astfel  $i_x \cong i_2$  ( $i_1$  se poate neglija). Rezultă:

$$i_x \cong \frac{(1+ab)u_x}{r_o} \quad (4.22)$$

Rezistența de ieșire,  $R_o$  se poate determina din (4.22) și este:

$$R_o = \frac{u_x}{i_x} = \frac{r_o}{1+ab} \quad (4.23)$$

În cazul configurației neinversoare rezistența de ieșire este de  $(1+ab)$  ori mai mică decât rezistența de ieșire a AO. Deoarece câștigul buclei are, uzual, valori mari, într-o funcționare stabilă în buclă închisă, rezistența de ieșire a amplificatorului neinversor va avea o valoare extrem de mică.

De exemplu, dacă se consideră valorile tipice  $r_o=75\Omega$ ,  $a=10^5$  și  $b=10^{-3}$ , rezistența de ieșire va avea valoarea:  $R_o = \frac{75}{1+10^5 \times 10^{-3}} \cong 0,75\Omega$ . Această valoare foarte mică a rezistenței de ieșire justifică presupunerea conform căreia căderea internă de tensiune este mică, practic negliabilă.

Deoarece câștigul buclei are valori foarte mari (mult mai mari decât unitatea), relația (4.23) se mai poate exprima astfel: rezistența de ieșire a configurației neinversoare este aproximativ egală cu raportul dintre rezistența de ieșire a AO și câștigul buclei, adică

$$R_o \cong \frac{r_o}{ab} \quad (4.24)$$

Ce înseamnă o valoare foarte mică a rezistenței de ieșire? Se presupune că în buclă închisă rezistența de ieșire a circuitului este  $R_o=1\Omega$  și că valoarea tensiunii de ieșire în gol este de 10V. Se consideră o sarcină care cere un curent de sarcină de 5mA. Neglijând curentul prin circuitul de reacție, căderea internă de tensiune este  $\Delta u_o=5\text{mA} \times 1\Omega=5\text{mV}$  și practic se poate neglija față de valoarea tensiunii de ieșire.

Valoarea curentului de sarcină corespunde funcționării liniare pentru majoritatea amplificatoarelor operaționale. Modelul linear în care impedanța de ieșire este foarte mică este valabil numai dacă încărcarea circuitului nu depășește valoarea maximă de care este capabil tipul de AO folosit. De îndată ce curentul a atins nivelul maxim admisibil, apar efecte neliniare și situația se modifică total, uneori chiar dramatic. În funcție de tipul de AO folosit, fie intră în acțiune circuitele de limitare a curentului de ieșire și atunci curentul de ieșire nu reflectă situația reală, fie amplificatorul operațional se distruge.

**Exemplul 4.2.** Se presupune că un AO care are  $a=5 \times 10^4$ ,  $r_d=0,3 \text{ M}\Omega$  și  $r_o=120\Omega$ , se conectează într-o configurație neinversoare în care  $R_1=1\text{k}\Omega$  și  $R_2=99\text{k}\Omega$ . În c.c. și la joasă frecvență să se determine: a) factorul de reacție  $b$ ; b) câștigul buclei; c) valoarea reală a amplificării în buclă închisă; d) rezistența de intrare a montajului; e) rezistența de ieșire a montajului; f) valoarea ideală a amplificării și să se compare cu cea de la punctul c).

**Rezolvare:**

a) Valoarea factorului de reacție este:

$$b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1\text{k}}{1\text{k} + 99\text{k}} = 0,01 \quad (4.25)$$

b) Câștigul buclei este:

$$ab = 5 \times 10^4 \times 0,01 = 500 \quad (4.26)$$

c) Valoarea reală a amplificării se exprimă:

$$A_{re} = \frac{a}{1 + ab} = \frac{5 \times 10^4}{1 + 500} = 99,8 \quad (4.27)$$

d) Valoarea rezistenței de intrare în buclă închisă a montajului este:

$$R_{in} = r_d(1 + ab) = 0,3 \times 10^6 \times 501 = 1,503 \times 10^8 \Omega = 150,3 \text{ M}\Omega \quad (4.28)$$

e) Valoarea rezistenței de ieșire în buclă închisă a montajului este:

$$R_o = \frac{r_o}{1 + ab} = \frac{120}{501} = 0,24\Omega \quad (4.29)$$

f) Valoarea amplificării dată de relația (4.8) este amplificarea ideală în buclă închisă,  $A_{id}$ :

$$A_{id} \approx \frac{1}{b} = \frac{1}{0,01} = 100 \quad (4.30)$$

Comparând  $A_{re}$  cu  $A_{id}$  se poate determina eroarea relativă de calcul a amplificării:

$$\varepsilon_A = \frac{A_{re} - A_{id}}{A_{id}} \cdot 100[\%] = \frac{99,8 - 100}{100} \cdot 100[\%] = -0,2\% \quad (4.31)$$

**Observații:**

1. Deoarece rezistența de intrare a montajului este foarte mare iar cea de ieșire foarte mică, pentru majoritatea aplicațiilor cu AO în configurație neinversoare, se poate menține presupunerea că rezistența de intrare este infinită iar cea de ieșire zero.
2. Se poate enunța următoarea regulă, utilă în cazul configurației neinversoare: *în c.c. sau la joasă frecvență, pentru a se obține amplificarea dorită în buclă închisă cu o eroare mai mică de 1% față de valoarea sa ideală, amplificarea în buclă deschisă trebuie să fie de cel puțin 100 de ori mai mare decât cea în buclă închisă.*

**Exemplul 4.3.** a) Se presupune un AO cu o amplificare în buclă deschisă  $a=10^5$ . Să se determine în c.c. și la joasă frecvență abaterea amplificării reale în buclă închisă,  $A_{re}$ , față de cea ideală,  $A_{id}$ , dacă  $A_{id}$  ia următoarele valori: 1, 100,  $10^4$ . b) Să se reia calculele pentru o valoare mai mică a amplificării în buclă închisă și anume  $a=10^4$ .

**Rezolvare:** Amplificarea ideală în buclă închisă este:

$$A_{id} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{1}{b}, \text{ deoarece } b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4.32)$$

Amplificarea reală în buclă închisă are la joasă frecvență și în c.c. expresia:

$$A_{re} = \frac{a}{1+ab} = \frac{\frac{1}{b}}{1+\frac{1}{ab}} = \frac{A_{id}}{1+\frac{A_{id}}{a}} \quad (4.33)$$

Eroarea relativă se determină cu ajutorul relației:

$$\varepsilon_A = \frac{A_{re} - A_{id}}{A_{id}} \cdot 100 [\%] \quad (4.34)$$

Rezultatele calculelor pentru ambele valori ale amplificării în buclă deschisă se trec în tabelul 4.1

Analizând rezultatele obținute se pot face următoarele observații:

1. pentru o valoare dată a amplificării în buclă deschisă, eroarea crește odată cu creșterea valorii amplificării în buclă închisă;
2. pentru o valoare dată a amplificării în buclă închisă, eroare crește odată cu micșorarea amplificării în buclă deschisă.

**Tabelul 4.1**

a)				b)			
a	$A_{id}$	$A_{re}$	$\varepsilon_A$ [%]	a	$A_{id}$	$A_{re}$	$\varepsilon_A$ [%]
$10^5$	1	0,99999	-0,001	$10^4$	1	0,9999	-0,01
$10^5$	100	99,9	-0,1	$10^4$	100	99,01	-0,99
$10^5$	$10^4$	9090,9	-9,091	$10^4$	$10^4$	5000	-50

Generalizând aceste rezultate se poate deduce următoarea relație aproximativă pentru calculul erorii:

$$\varepsilon_A \approx \frac{A_{id}}{a} \times 100 [\%] \quad (4.35)$$

Formula este corectă numai dacă  $A_{id} \leq \frac{a}{100}$ , așa cum se poate verifica pentru exemplul dat. Precizia relației scade pe măsură ce valoarea lui  $A_{id}$  se apropie de cea a amplificării în buclă deschisă  $a$ .

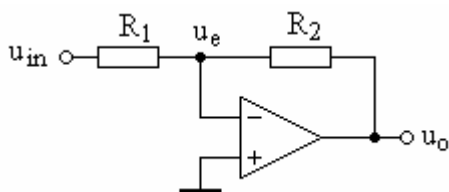
#### 4.4 Amplificatorul inversor. Determinarea amplificării în buclă închisă, a rezistențelor de intrare și ieșire

Se vor lua în considerare efectele globale de circuit atunci când AO dintr-un amplificator inversor se înlocuiește cu modelul real din fig.4.1.

##### 4.4.1 Amplificarea în buclă închisă

Ca și la configurația neinversoare, cel mai important efect este și în acest caz tot cel al valorii finite a amplificării în buclă închisă. Calea cea mai simplă de analiză presupune scrierea ecuațiilor de circuit direct pentru configurația inversoare.

Se consideră amplificatorul inversor din fig.4.7, la care se presupune că amplificarea în buclă deschisă are valoare finită. Pentru moment se consideră că rezistența de intrare a circuitului este infinită iar cea de ieșire zero.



**Fig. 4.7.** Amplificatorul inversor, utilizat în analiza efectelor datorate valorilor finite ale amplificării în buclă închisă, rezistenței de intrare și ieșire

În nodul corespunzător intrării inversoare se poate scrie relația:



$$\frac{u_e - u_{in}}{R_1} + \frac{u_e - u_o}{R_2} = 0 \quad (4.36)$$

Pentru a găsi relația dintre tensiunile  $u_{in}$  și  $u_o$  mai trebuie aflată relația dintre  $u_o$  și  $u_e$ . Deoarece tensiunea diferențială este:

$$u_d = u^+ - u^- = 0 - u_e = -u_e \quad (4.37)$$

tensiunea de ieșire se poate exprima rapid în funcție de cea diferențială prin relația:

$$u_o = au_d = -au_e \quad (4.38)$$

Rezolvând sistemul de ecuații (4.36) și (4.38) și eliminând  $u_e$ , se găsește că expresia amplificării în buclă închisă este:

$$A = \frac{-R_2/R_1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{aR_1}} \quad (4.39)$$

Comparând relația (4.39) cu cea corespunzătoare pentru circuitul neinversor (relația (4.9)), se pot face următoarele observații:

1. numărătorul fiecărei expresii reprezintă valoarea ideală a amplificării în buclă închisă;
2. pentru  $a \rightarrow \infty$ , expresia amplificării în buclă închisă se reduce la forma ideală;
3. numitoarele celor două amplificări sunt identice.

Schema bloc a amplificatorului inversor se obține mai greu decât la configurația neinversoare. Din acest motiv analiza configurației inversoare s-a făcut direct cu ajutorul ecuațiilor de circuit.

Principala diferență între formele de reacție ale celor două circuite constă în faptul că la circuitul neinversor reacția este de tip serie, în timp ce la circuitul inversor este de tip paralel. Reacția serie are ca efect creșterea rezistenței de intrare a circuitului, așa cum s-a evidențiat la studiul configurației neinversoare. Reacția paralel are ca efect micșorarea rezistenței de intrare a circuitului și rezultă că în acest caz semnalul de intrare trebuie atenuat înainte de a fi introdus în punctul de sumare.

Dacă în fig.4.7 se aplică superpoziția și se presupune mai întâi că  $u_o=0$ , atunci tensiunea  $u'_{in}$  care apare la borna inversoare se poate determina cu regula divizorului de tensiune aplicată rețelei rezistive  $R_1, R_2$ :

$$u'_{in} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{in} \quad (4.40)$$

Apoi se consideră  $u_{in}=0$  și se determină tensiunea de reacție,  $u_r$  în funcție de tensiunea de ieșire  $u_o$ . Se utilizează din nou regula divizorului de tensiune:

$$u_r = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o \quad (4.41)$$

Semnalul de eroare care se aplică la borna inversoare este:

$$u_e = u'_{in} + u_r \quad (4.42)$$

iar tensiunea de ieșire se află cu relația:

$$u_o = -au_e \quad (4.43)$$

Celor patru ecuații scrise anterior le corespunde schema bloc din fig.4.8.

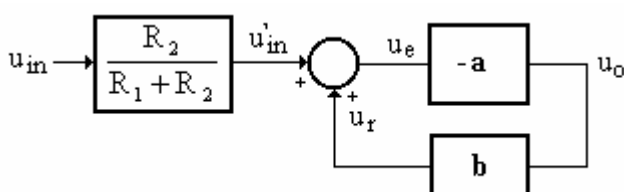


Fig. 4.8. Schema bloc de amplificator cu reacție, utilizat în analiza circuitului inversor

În comparație cu schema bloc a configurației neînversoare (fig.4.4) sunt evidente următoarele diferențe:

- în fig.4.8 înainte de blocul de sumare este prezent un bloc suplimentar (un divizor de tensiune);
- blocul de sumare din fig.4.8 generează suma dintre semnalul de intrare modificat și cel de reacție, în timp ce blocul de sumare din fig.4.4 generează diferența dintre semnalul de intrare și cel de reacție.

Expresia factorului de reacție  $b$  se deduce din relația (4.41) și este:

$$b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4.44)$$

fiind identică cu cea de la configurația neînversoare.

Câștigul buclei se determină cu relația:

$$T = ab = \frac{aR_1}{R_1 + R_2} \quad (4.45)$$

fiind și el identic cu cel de la amplificatorul neînversor. Deci se poate afirma că *valoarea câștigului buclei este aceeași atât pentru configurația neînversoare cât și pentru cea înversoare*.

Exprimarea alternativă a amplificării în buclă închisă a configurației înversoare, în termeni de câștig al buclei, este:

$$A = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{ab}} \quad (4.46)$$

numărătorul relației (4.46) reprezentând amplificarea ideală în buclă închisă a configurației înversoare.

#### 4.4.2 Rezistența de intrare

În cazul amplificatorului operațional ideal, intrarea înversoare este forțată să aibă potențialul masei, astfel că la circuitul înversor rezistența văzută în acest punct este zero. La amplificatorul operațional real situația se schimbă, rezistența văzută în intrarea înversoare a circuitului înversor este diferită de zero.

Pentru a determina rezistenței de intrare a configurației înversoare din fig.4.9, mai întâi se face abstracție de rezistența  $R_1$  și se calculează rezistența de intrare,  $R_{in}'$ , văzută la intrarea înversoare. Rezistența totală de intrare se află după aceea simplu adunând  $R_1$  cu  $R_{in}'$ .

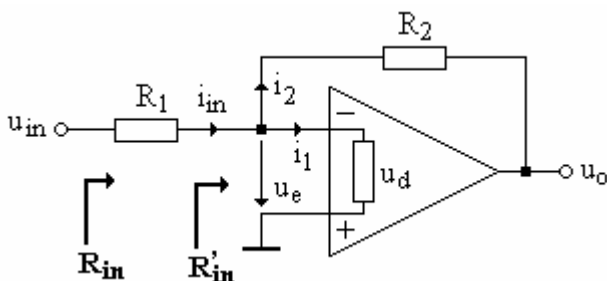


Fig. 4.9. Circuitul utilizat pentru determinarea valorii finite a rezistenței de intrare a amplificatorului înversor

Se presupune că în nodul corespunzător intrării înversoare tensiunea este  $u_e$  iar curentul  $i_{in}$  are două componente  $i_1$  și  $i_2$ . Componenta  $i_1$  este curentul real care intră în AO și se determină cu ajutorul relației:

$$i_1 = \frac{u_e}{r_d} \quad (4.47)$$

Componenta  $i_2$  se află din relația:

$$i_2 = \frac{u_e - u_o}{R_2} \quad (4.48)$$

Dacă se neglijează căderea internă de tensiune pe rezistența de ieșire, relația tensiunii de ieșire,  $u_o$  se poate scrie:

$$u_o = au_d = -au_e \quad (4.49)$$

Inlocuind relația (4.49) în (4.48) rezultă:

$$i_2 = \frac{u_e - (-au_e)}{R_2} = \frac{(1+a)u_e}{R_2} \quad (4.50)$$

și valoarea totală a curentului de intrare este:

$$i_{in} = i_1 + i_2 \quad (4.51)$$

În practică, componenta de curent  $i_2$  este mult mai mare decât  $i_1$ , astfel că utilizând presupunerea  $i_2 \gg i_1$  rezultă  $i_{in} \cong i_2$  sau

$$i_{in} \cong \frac{(1+a)u_e}{R_2} \quad (4.52)$$

și rezistența de intrare văzută la borna inversoare devine:

$$R_{in} = \frac{u_e}{i_{in}} = \frac{R_2}{1+a} \quad (4.53)$$

Se poate determina acum rezistența totală de intrare :

$$R_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = R_1 + \frac{R_2}{1+a} \quad (4.54)$$

Se observă că dacă  $a \rightarrow \infty$  atunci  $R_{in} = R_1$ , adică rezultatul obținut pentru AO ideal în configurație inversoare. Pentru valori finite ale amplificării în buclă deschisă, rezistența de intrare crește, deoarece crește și potențialul bornei inversoare în concordanță cu cerința de a menține astfel tensiunea diferențială la valoarea necesară funcționării AO. Totuși efectul cel mai important asupra mărimii rezistenței de intrare nu îl are valoarea finită a amplificării în buclă deschisă, ci rezistența externă de reacție  $R_2$ .

#### 4.4.3 Rezistența de ieșire

Pentru a determina rezistența de ieșire a circuitului, intrarea se pasivizează, la ieșire se aplică o sursă de tensiune de test,  $u_x$  și rezultă un circuit identic cu cel din fig.4.6. Din această cauză și expresia rezistenței de ieșire este identică cu cea de la configurația neinversoare.

**Exemplul 4.4.** AO din Exemplul 4.2 se folosește într-o configurație inversoare, unde  $R_1=10k\Omega$  iar  $R_2=240k\Omega$ . In c.c. și la joasă frecvență să se determine: a) factorul de reacție **b**; b) câștigul buclei; c) valoarea reală a amplificării în buclă închisă; d) rezistența de intrare și cea de ieșire în buclă închisă; e) să se compare rezultatele de la punctele c) și d) cu cele obținute pentru un AO ideal.

**Rezolvare:** Parametrii AO din exemplul 4.2 sunt:  $a=5 \times 10^4$ ,  $r_d=0,3M\Omega$  și  $r_o=120\Omega$ .

a) Factorul de reacție este:

$$b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{10k}{10k + 240k} = 0,04$$

b) Câștigul buclei este:

$$ab = 5 \times 10^4 \times 0,04 = 2000$$

c) Amplificarea reală în buclă închisă este:

$$A_{re} = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{ab}} = \frac{-\frac{240k}{10k}}{1 + \frac{1}{2000}} = -23,99$$

d) Rezistența de intrare în buclă închisă este:

$$R_{in} = R_1 + \frac{R_2}{1+a} = 10k + \frac{240k}{1+5 \times 10^4} = 10004,8\Omega$$

Rezistența de ieșire în buclă închisă este:

$$R_o = \frac{r_o}{1+ab} = \frac{120}{1+2000} = 0,06\Omega$$

e) Dacă se presupune AO ideal, atunci  $A_{id} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{240k}{10k} = -24$ , iar  $R_{in} = R_1 = 10k\Omega$  și se observă că valorile ideale sunt foarte apropiate de cele reale.