



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Instrumente Structurale  
2007-2013



# Platformă de e-learning și curriculum e-content pentru învățământul superior tehnic

## Elemente de Electronică Analogică

### **27. Amplificatoare diferențiale cu AO**

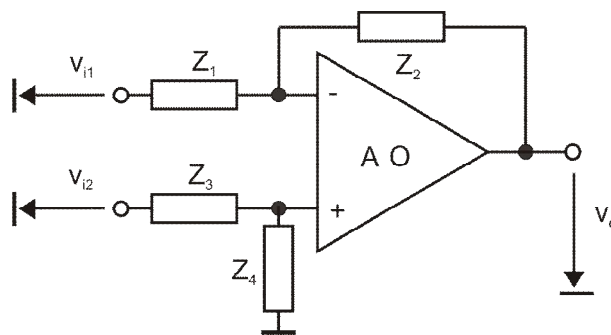
## AMPLIFICATOARE DIFERENȚIALE CU AO

### SCHEMA DE PRINCIPIU A UNUI AMPLIFICATOR DIFERENȚIAL CU AO

Structura de bază a unui AO este de tip diferențial, astfel încât este ușor de construit amplificatoare diferențiale cu AO având în vedere cele două intrări ale sale.

Așa după cum se știe, în cazul unui amplificator diferențial, tensiunea de ieșire trebuie să fie proporțională cu diferența dintre tensiunile de la cele două intrări și să depindă cât mai puțin de tensiunea de mod comun de la intrări.

În fig.3.31 este prezentată schema de principiu a celui mai simplu amplificator diferențial realizat cu AO, observând că se realizează comanda simultană a intrărilor inversoare și neinversoare ale AO cu două tensiuni de intrare diferite.



**Fig. 3.1.** Amplificator diferențial cu AO

Tensiunea de la ieșirea acestui circuit se poate determina prin superpoziție:

$$v_o = -\frac{Z_2}{Z_1} v_{i1} + \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} v_{i2}$$

Această expresie se poate prelucra în felul următor, punând în evidență raportul  $\frac{Z_2}{Z_1}$ :

$$v_o = -\frac{Z_2}{Z_1} \left[ v_{i1} - \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \frac{Z_1}{Z_2} \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} v_{i2} \right]$$

După simplificarea lui  $Z_1$ , pentru ca acest circuit să se comporte ca un amplificator diferențial, este necesară îndeplinirea condiției:

$$\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} = 1,$$

echivalentă cu relația:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad \text{sau:} \quad Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

Aceasta este condiția pe care impedanțele circuitului din fig.3.31 trebuie să le îndeplinească pentru ca să se comporte ca un amplificator diferențial, adică să rejeteze semnalul de mod comun de la intrare.

În această situație, tensiunea de la ieșirea amplificatorului va fi:

$$v_o = -\frac{Z_2}{Z_1} (v_{i1} - v_{i2})$$

adică tensiunea de ieșire este proporțională cu diferența tensiunilor de la cele două intrări, amplificarea de tensiune diferențială fiind:

$$A_{ud} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

Pe de altă parte, știind că impedanța  $Z_2$  se reflectă la intrarea inversoare a AO cu valoarea  $\frac{Z_2}{1 + A_0}$ , neglijabilă în comparație cu  $Z_1$  și că impedanța de intrare pe borna neinversoare a AO este foarte mare în comparație cu impedanța  $Z_4$ , impedanțele de intrare oferite pentru cele două surse de semnal vor fi:

$$Z_{int1} = Z_1$$

$$Z_{int2} = Z_3 + Z_4$$

Este ușor de înțeles că, pentru o funcționare cât mai simetrică din punct de vedere al încărcării surselor de semnal, este necesar ca:

$$Z_1 = Z_3 + Z_4$$

În cazurile, cele mai frecvent întâlnite, în care impedanțele din circuit sunt rezistențe, adică  $Z_k = R_k$ , condiția de compensare a mărimilor reziduale se scrie sub

forma:

$$R_1 \parallel R_2 = R_3 \parallel R_4$$

În plus, impedanțele din circuitul de reacție,  $Z_1$  și  $Z_2$ , trebuie să îndeplinească și cerințele generale pentru circuitele cu AO, adică  $Z_2$  să nu fie prea mică pentru a nu încărca suplimentar AO la ieșire, iar  $Z_1$  trebuie să asigure impedanță de intrare în amplificator în limite rezonabile.

După cum se observă, condițiile impuse impedanțelor (rezistențelor) din circuit sunt numeroase și este dificil să se facă o proiectare optimă, mai ales dacă amplificarea diferențială este impusă.

În cazul în care condiția de funcționare ca amplificator diferențial nu este îndeplinită cu strictețe (ceea ce este dificil având în vedere toleranțele de fabricație ale componentelor pasive), în semnalul de la ieșire apare și o componentă determinată de tensiunea de mod comun de la intrare. Dacă se notează:

$v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$ , tensiunea diferențială (de amplificat) și

$v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$ , tensiunea de mod comun de la intrare (care trebuie rejectată),

din expresia (3.72), se deduce:

$$v_o = -\frac{Z_2}{Z_1} \left( 1 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} \right) v_{id} + \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{Z_1 (Z_3 + Z_4)} v_{ic}$$

Expresia amplificării de tensiune pe mod comun, determinată de neîndeplinirea condiției (3.74), va fi:

$$A_{uc1} = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{Z_1 (Z_3 + Z_4)}$$

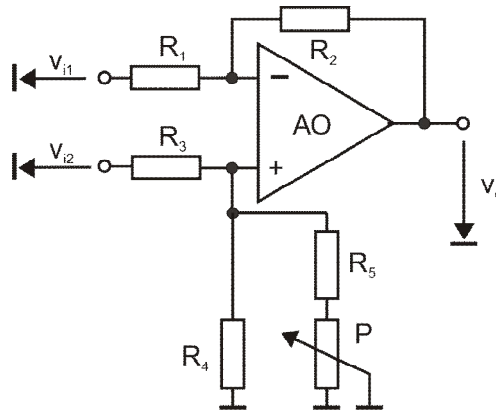
În același timp, este evident faptul că factorul de rejecție a modului comun al AO, va determina o amplificare a tensiunii de mod comun de la intrare de valoare:

$$A_{uc2} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{CMMR}$$

Rezultă că factorul de rejecție a modului comun (raportul amplificărilor diferențiale și de mod comun) va fi:

$$\text{CMMR (Amplificator diferential)} = \frac{A_{ud}}{A_{uc1} + A_{uc2}}$$

Pentru mărirea factorului de rejecție a modului comun, prin îndeplinirea cât mai bună a condiției (3.74), se poate folosi un circuit de reglaj al rezistenței  $R_4$ , rezistența  $R_5$  fiind în serie cu o rezistență reglabilă,  $P$ , ca în fig.3.32:



**Fig. 3.2.** Amplificator diferențial cu factor de rejecție mărit

Un alt parametru al amplificatorului diferențial este impedanța de intrare pe modul comun (considerând  $\text{CMMR} \rightarrow \infty$ ) care, pentru cazul unui circuit cu rezistențe, se poate determina cu relația:

$$Z_{\text{int (mod comun)}} = (R_1 + R_2) \parallel (R_3 + R_4)$$

Tensiunea de decalaj obținută la ieșirea amplificatorului va fi dependentă de amplificarea diferențială și se poate calcula cu relația:

$$V_{\text{odecalaj}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_D + R_2 I_D$$

relație dedusă în condițiile:  $R_1 = R_3$  și  $R_2 = R_4$ .

În afara observațiilor de până acum, care pun în evidență dificultatea unei proiectări optime a circuitului prin satisfacerea tuturor condițiilor de funcționare corectă, mai rezultă că, pentru amplificatorul diferențial realizat cu schema de principiu (și electrică) din fig.3.31, impedanțele de intrare pe cele două intrări sunt de valoare mică,  $\leq 20\text{k}\Omega$ ; mărirea rezistențelor  $R_1 = R_3$  duce, la amplificare

diferențială impusă, la mărirea impedanțelor  $R_2$  și  $R_4$ , ceea ce se poate face numai în anumite limite. Pe de altă parte, rezistențele  $R_1$  și  $R_3$  includ și rezistențele generatoarelor de semnale ale căror valori nu sunt, uneori, precizate și pot depinde de condițiile reale de funcționare.

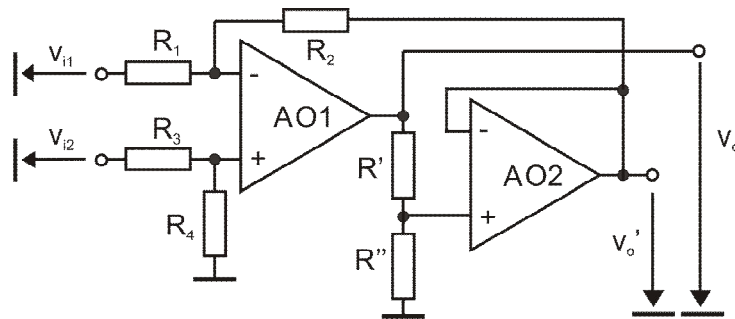
Banda de trecere a amplificatorului diferențial este limitată, pe de o parte, de către AO, limitarea făcându-se la valoarea  $f_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ , iar pe de altă parte, de capacitatea parazită,  $C_p$ , (ordinal de mărime fiind 1-10 pF), la valoarea  $\frac{1}{2\pi C_p R_2}$ , remarcându-se importanța rezistențelor din circuit.

În cazul în care este necesar un reglaj al amplificării de tensiune, acesta se poate face numai modificând simultan două dintre rezistențele din circuit pentru menținerea permanentă a condiției de amplificator diferențial, ceea ce este dificil deoarece presupune folosirea unui potențiomtru dublu performant.

Dezavantajele structurii diferențiale de bază din fig.3.31 se pot corecta cu alte scheme de amplificatoare diferențiale. Există mai multe variante practice de amplificatoare diferențiale care satisfac mai bine restricțiile prezentate anterior.

## **AMPLIFICATOR DIFERENȚIAL CU AMPLIFICARE MĂRITĂ**

Mărirea amplificării diferențiale se poate face, conform relației (3.76), fie prin micșorarea rezistenței  $R_1$ , fie prin mărirea rezistenței  $R_2$ , cu menținerea condiției de amplificator diferențial (3.74). Dar, rezistența  $R_1$  nu poate fi micșorată oricât, deoarece se micșorează impedanța de intrare diferențială, (3.77), iar rezistența  $R_2$  nu se poate mări oricât din cauza efectului curentului de decalaj,  $I_D$ , (3.86). În această situație, se poate folosi schema din fig.3.33, cu divizor de tensiune pe ieșirea AO (ca și în fig.3.9). De această dată, pentru păstrarea aceluiași condiții de comportare a circuitului ca amplificator diferențial, se folosește un repetor pe emitor care preia funcția de adaptare între circuitul de ieșire modificat și circuitul de reacție.



**Fig. 3.3.** Amplificator diferențial cu amplificare mărită

Se observă că, între cele două borne de intrare și ieșirea celui de al doilea AO, se obține un amplificator diferențial care preia toate performanțele amplificatorului diferențial din schema de principiu (mai puțin elementele relative la mărimile reziduale pentru că intervin și parametrii celui de al doilea AO). Ca urmare, tensiunea la ieșirea sa va fi:

$$v_o' = -\frac{R_2}{R_1}(v_{i1} - v_{i2})$$

În același timp, tensiunea de la ieșirea circuitului,  $v_o'$ , se poate determina din tensiunea de la ieșirea circuitului,  $v_o$ , prin divizorul de tensiune format de  $R'$  și  $R''$  sub forma:

$$v_o' = \frac{R''}{R' + R''} v_o$$

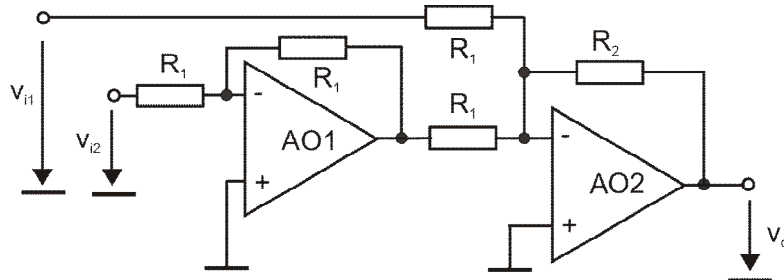
Se deduce amplificarea de tensiune diferențială sub forma:

$$A_{ud} = -\left(1 + \frac{R'}{R''}\right) \frac{R_2}{R_1}$$

Amplificarea de tensiune diferențială se poate mări prin modificarea raportului rezistențelor  $R'$  și  $R''$ , pastrând valori rezonabile pentru celelalte rezistențe din circuit. Este evident că unele performanțe ale amplificatorului diferențial vor fi afectate de mărirea suplimentară a amplificării diferențiale (banda de trecere, influența mărimilor reziduale).

O problemă foarte importantă este asigurarea unei funcționări cât mai convenabile pentru ambele surse de semnal.

Pentru a obține impedanțe de intrare egale pe cele două intrări ale amplificatorului diferențial, se poate folosi schema din fig.3.34.



**Fig. 3.4.** Amplificator diferențial cu impedanțe de intrare egale

Tensiunea de intrare  $v_{i2}$  se aplică unui inversor de tensiune format cu AO1 și, apoi, se aplică, împreună cu tensiunea de intrare  $v_{i1}$ , unui circuit sumator inversor realizat cu AO2. Se obține, la ieșirea circuitului, tensiunea:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}(v_{i1} - v_{i2})$$

Impedanțele de intrare pe cele două intrări vor fi egale cu  $R_1$  și se vor alege de valori relativ mici pentru a se obține și o bandă de trecere mare a amplificatorului.

Pentru a avea un factor de rejecție cât mai bun este necesară o împerechere foarte bună a celor patru rezistențe  $R_1$ .

Tensiunea de decalaj de la ieșirea circuitului se calculează cu relația:

$$v_{o \text{ decalaj}} = 2\frac{R_2}{R_1}V_{D1} + \left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right)V_{D2}$$

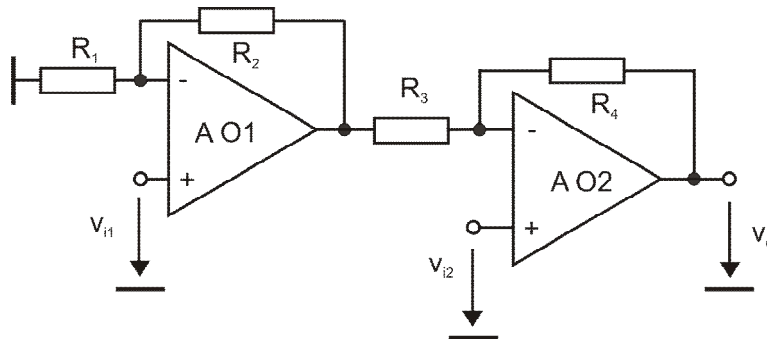
Pentru compensarea efectului curentului de polarizare, pe intrările neinversoare ale celor două AO se introduc rezistențe de compensare,  $\frac{R_1}{2}$ , respectiv  $\frac{R_1}{2} \parallel R_2$ .

### **AMPLIFICATOARE DIFERENȚIALE CU IMPEDANȚE DE INTRARE MARI**

Pentru a obține impedanțe de intrare mari pe cele două intrări ale amplificatorului diferențial, se poate folosi comanda pe intrările neinversoare ale



AO așa cum se vede în schema din fig.3.35.



**Fig. 3.5.** Amplificator diferențial cu impedanțe de intrare foarte mari

Impedanțele de intrare diferențiale rezultate sunt chiar impedanțele de intrare pe modul comun ale celor două AO, foarte mari, pentru orice aplicație, dar nu neapărat egale (cele două AO nu pot fi strict identice).

Tensiunea de ieșire se obține ușor, prin superpoziție, sub forma:

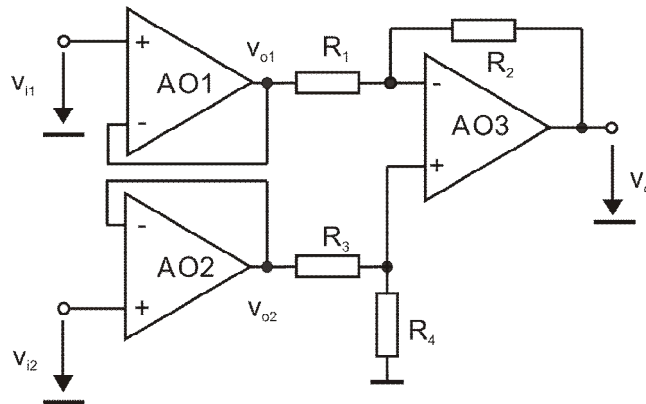
$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(-\frac{R_4}{R_3}\right) v_{i1} + \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) v_{i2} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) (v_{i2} - v_{i1})$$

dacă se îndeplinește condiția:

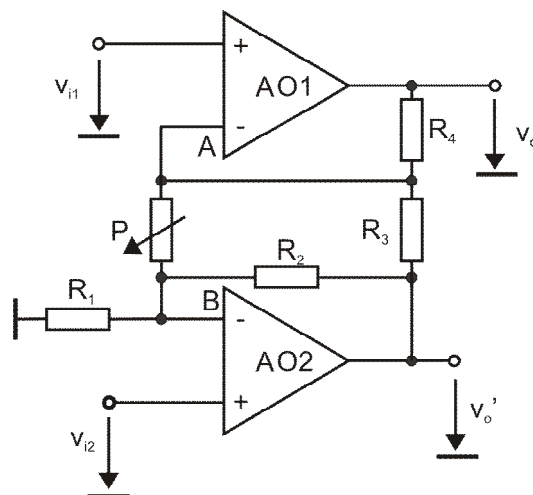
$$\frac{R_1 R_3}{R_2 R_4} = 1$$

asemănătoare cu condiția pentru schema de principiu din fig.3.31.

O altă variantă, mai simplă, este aceea din fig.3.36, în care semnalele de amplificat se aplică, mai întâi, unor repetoare de tensiune realizate cu AO1 și AO2. Impedanțele de intrare care se obțin sunt foarte mari (chiar dacă nu egale) iar în privința celorlalte cerințe, se obțin aceleași condiții ca la amplificatorul din schema de principiu. De remarcat că, tensiunile reziduale ale primelor două AO vor fi și ele amplificate spre ieșire cu amplificarea de tensiune a amplificatorului diferențial.



**Fig. 3.6.** Amplificator diferențial cu impedanțe de intrare mari  
 Problema reglajului amplificării diferențiale cu ajutorul unui singur potențiomtru cu menținerea impedanțelor de intrare de valoare ridicată se poate face cu schema din fig.3.37 în care rezistența notată cu P este reglabilă.



**Fig. 3.7.** Amplificator diferențial cu amplificare variabilă

Pentru fiecare din cele două AO se închide o buclă de reacție negativă. Ca urmare, diferențele de potențial între bornele lor de intrare sunt nule astfel încât potențialul punctului A față de masă este  $v_{i1}$  iar cel al punctului B este  $v_{i2}$ .

Determinarea tensiunii de ieșire,  $v_o$ , se face aplicând metoda potențialelor la noduri în punctele A și B. Rezultă relațiile:

$$\frac{v_o - v_{i1}}{R_4} = \frac{v_{i1} - v_{i2}}{P} + \frac{v_{i1} - v_o}{R_3}$$

$$\frac{v_{i2}}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_{i1}}{P} + \frac{v_{i2} - v_o}{R_2} = 0$$

Din a doua relație se explicitează  $v_o = \frac{R_2}{R_1} v_{i2} + \frac{R_2}{P} (v_{i2} - v_{i1}) + v_{i2}$  și se introduce în prima. Se grupează în mod convenabil termenii ce conțin cele două tensiuni de intrare:

$$v_o = v_{i1} \left( 1 + \frac{R_4}{P} + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4 R_2}{R_3 P} \right) - v_{i2} \left( \frac{R_2 R_4}{R_3 R_1} + \frac{R_4}{P} + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4 R_2}{R_3 P} \right)$$

Pentru ca circuitul să funcționeze diferențial, este necesară egalitatea coeficienților celor două tensiuni:

$$1 + \frac{R_4}{P} + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4 R_2}{R_3 P} = \frac{R_2 R_4}{R_3 R_1} + \frac{R_4}{P} + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4 R_2}{R_3 P}$$

Se deduce condiția:

$$\frac{R_2 R_4}{R_3 R_1} = 1$$

Tensiunea de ieșire, din relația (3.93), devine:

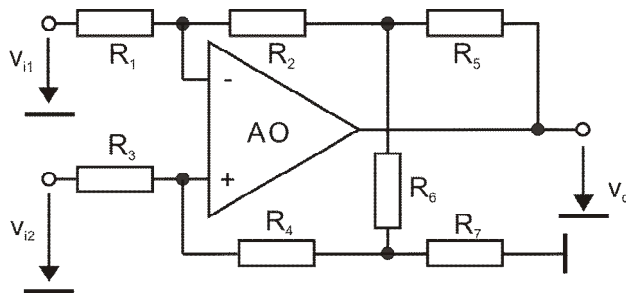
$$v_o = \left( 1 + \frac{R_4}{P} + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4 R_2}{R_3 P} \right) (v_{i1} - v_{i2})$$

În fig.3.38 este prezentată o altă schemă de amplificator diferențial cu amplificarea de tensiune reglabilă.

Condiția de funcționare ca amplificator diferențial este îndeplinită dacă:

$$R_3 = R_1, R_4 = R_2, R_7 = R_5$$

În aceste condiții, amplificarea diferențială se obține sub forma:



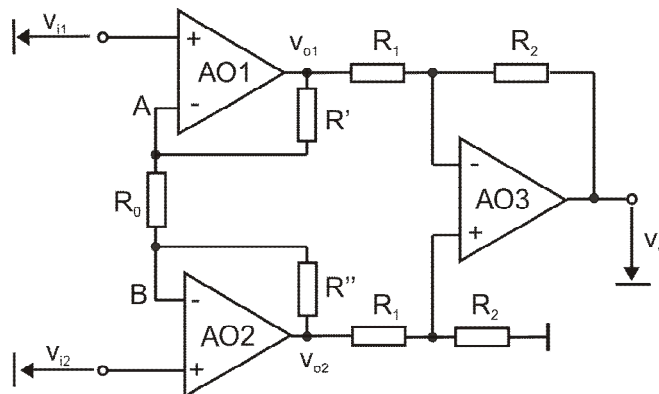
**Fig. 3.8.** Amplificator cu amplificare reglabilă

$$A_u = \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + 2 \frac{R_5}{R_6} \right) + \frac{R_5}{R_1}$$

Reglarea amplificării de tensiune diferențiale se face cu  $R_6$  fără să fie afectate condițiile de funcționare ca diferențial. Impedanțele de intrare se pot obține suficient de mari dar nu egale.

### AMPLIFICATOARE DIFERENȚIALE DE INSTRUMENTAȚIE

O variantă mai bună decât cele anterioare este prezentată în fig.3.39, numită și “amplificator de instrumentație”, foarte larg utilizată, în diferite variante, în aparatura de măsură.



**Fig. 3.9.** Amplificator diferențial de instrumentație

Semnalele de amplificat se aplică pe bornele neinversoare ale AO1 și AO2, astfel încât se asigură impedanțe de intrare de valoare foarte mare și pe modul diferențial de excitație. Tensiunile de la ieșirile acestora se aplică la intrările unui amplificator diferențial obișnuit, realizat cu AO3 cu aceleași rezistențe în circuitele celor două borne pentru îndeplinirea condiției de funcționare diferențială, iar tensiunea de ieșire va fi dată de relația:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} (v_{o1} - v_{o2})$$

Pentru fiecare din primele două AO se închide o buclă de reacție negativă.

Ca urmare, diferențele de potențial între bornele lor de intrare sunt nule astfel încât potențialul punctului A față de masă este  $v_{i1}$  iar cel al punctului B este  $v_{i2}$ .

Tensiunea de la ieșirea AO1,  $v_{o1}$ , se obține prin superpoziție; tensiunea  $v_{i1}$  este amplificată în schemă de amplificator neinversor (la anularea tensiunii de intrare  $v_{i2}$ , punctul B este un punct virtual de masă datorită reacției negative realizate prin rezistența  $R''$ ), iar tensiunea  $v_{i2}$ , prin  $R_0$ , într-o schemă de amplificator inversor:

$$v_{o1} = \left(1 + \frac{R'}{R_0}\right)v_{i1} - \frac{R'}{R_0}v_{i2}$$

În mod asemănător, cu aceleași argumente, se poate determina tensiunea de la ieșirea AO2,  $v_{o2}$ :

$$v_{o2} = \left(1 + \frac{R''}{R_0}\right)v_{i2} - \frac{R''}{R_0}v_{i1}$$

de unde:

$$v_{o1} - v_{o2} = (R' + R'' + R_0) \frac{v_{i1} - v_{i2}}{R_0}$$

Înlocuind expresiile (3.99) și (3.100) sau direct, relația (3.101) în relația (3.98), se obține tensiunea de ieșire a amplificatorului diferențial:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R' + R''}{R_0}\right) (v_{i1} - v_{i2})$$

Se constată că amplificarea de tensiune se poate regla cu ajutorul rezistenței  $R_0$  în limite foarte largi fără a afecta condiția de funcționare ca amplificator diferențial.

Amplificatorul diferențial din fig.3.39 se realizează și sub formă de circuit liniar integrat. În acest caz, rezistențele din amplificatorul diferențial de la ieșire, cu AO3, se realizează cu o precizie foarte bună, fiind prelucrate prin tehnici laser astfel încât factorul de rejecție a modului comun să fie cât mai mare. De asemenea, valoarea rezistenței  $R_0$  poate fi selectată la valori predeterminate pentru anumite valori ale amplificării de tensiune (1, 10, 100) sau poate fi conectată din exterior pentru a se obține valoarea necesară a amplificării. Impedanțele de intrare vor fi de valoare foarte mare.