

## 6. AMPLIFICATOARE OPERAȚIONALE (AO)

### 6.1. Probleme generale

Amplificatoarele operaționale (AO) sunt amplificatoare de curent continuu cu amplificare foarte mare de tensiune destinate să funcționeze cu reacție negativă puternică. Ca urmare amplificarea totală va depinde în general doar de proprietățile rețelei de reacție. Deși în realizări mai vechi se întâlnesc și în variante discrete, acum sunt cunoscute sub formă integrată.

AO este elementul principal al familiei circuitelor integrate analogice, pentru care semnalul de ieșire are o variație continuă în timp urmărind după o lege anumită semnalul (sau semnalele) de intrare. De asemenea AO face parte din categoria circuitelor liniare, care au relații liniare între mărimile de ieșire și cele de intrare. Inițial au fost folosite ca operatori (sumator, integrator) în calculatoarele analogice, de unde denumirea de AO. Simbolul de circuit al AO este prezentat în figura 6.1.

AO are de obicei două intrări (intrare diferențială), una notată cu semnul plus (+) numită intrare neinversoare, cealaltă notată cu semnul minus (-) numită intrare inversoare.

În majoritatea cazurilor AO este alimentat de la două surse de tensiuni egale, una pozitivă și una negativă. Bornele de alimentare nu se figurează de obicei în schemele de principiu. În general AO nu au punct de masă propriu, originea potențialelor fiind punctul comun al surselor de alimentare (figura 6.2).

Relația între mărimile de intrare și ieșire în curent continuu sau la frecvențe joase este:

$$A = \frac{U_O}{U_P - U_N} = \frac{U_O}{U_I} \quad (6.1)$$

unde A este amplificarea de tensiune fără reacție sau amplificarea în buclă deschisă, având valori foarte mari (zeci – sute de mii). O dată cu creșterea frecvenței mărimile devin complexe.

Dacă  $U_P = 0$ , atunci  $U_O = -AU_N$  și tensiunea de ieșire este defazată cu  $180^\circ$  (inversată) de unde denumirea de bornă inversoare.

Dacă  $U_N = 0$  atunci  $U_O = AU_P$ , tensiunea de ieșire având același semn cu cea de intrare de unde și denumirea de bornă neinversoare.

Principalele cerințe pe care trebuie să le îndeplinească un AO sunt următoarele :

- amplificare de tensiune cât mai mare (a semnalului diferențial);
- rezistență de intrare cât mai mare ;
- rezistență de ieșire cât mai mică ;
- caracteristica de transfer cât mai apropiată de cea ideală pentru amplificatoarele de cc (figura 1.43)
- bandă de frecvență (începând de la frecvența zero) cât mai mare ;
- amplificare cât mai mică a semnalului de mod comun  $(U_P + U_N)/2$ .

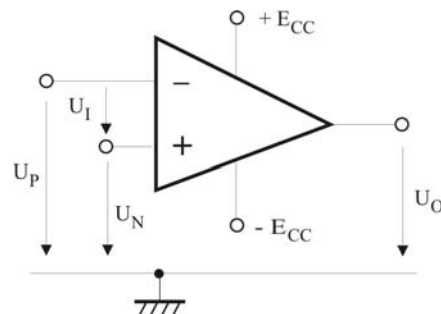


Fig. 6.1. Simbolul AO

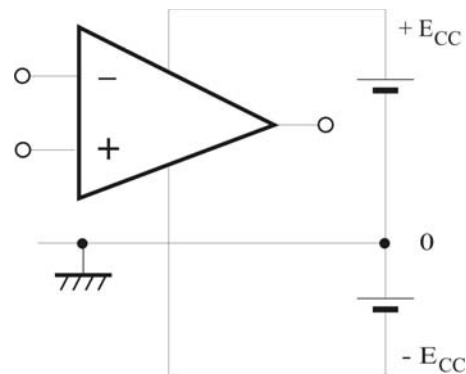


Fig. 6.2. Alimentarea AO

AO sunt astfel realizate încât majoritatea aplicațiilor pot fi considerate, cu erori neglijabile, ca ideale. Un AO ideal are schema echivalentă din figura 6.3 și următoarele proprietăți :

- amplificare de tensiune infinită (sau tensiune zero de intrare) ;
- rezistență de intrare infinită ;
- rezistență de ieșire zero ;
- caracteristică ideală de transfer ;
- bandă infinită ;
- amplificare de mod comun zero.

Prin urmare un amplificator ideal are atât curenții de intrare cât și tensiunea de intrare zero, precizare de care se ține cont în analiza schemelor cu AO din paragraful următor în se va considera AO ideal.

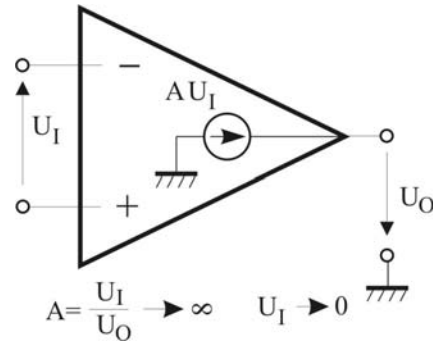


Fig. 6.3. AO ideal

## 6.2. Configurații de bază

În aplicații AO este utilizat în configurații cu reacție negativă, fiind valabilă relația de bază a acestor amplificatoare :

$$A_R = \frac{A}{1 + AF}, \quad (6.2)$$

$A_R$  fiind amplificarea amplificatorului reacție și  $F$  amplificarea rețelei de reacție. În general reacția este suficient de puternică pentru ca  $AF \gg 1$  și atunci  $A_R \approx 1/F$  cu o precizie ridicată.

În analiza configurațiilor principale se poate utiliza și conceptul de reacție, dar configurațiile fiind simple o metodă directă ținând cont de proprietățile AO ideale este mai potrivită.

### Amplificator inversor.

Este configurația de bază cea mai des întâlnită în aplicații. Schema este prezentată în figura 6.4. Din inspecția directă a schemei rezultă :

$$U_1 = R_1 I_1 ;$$

$$U_O = -R_F I_F = -R_F I_1$$

și deci amplificarea de tensiune:

$$A_R = \frac{U_O}{U_1} = -\frac{R_F}{R_1}. \quad (6.3)$$

Rezistența de intrare în amplificatorul inversor:

$$R_I = \frac{U_1}{I_1} = R_1, \quad (6.4)$$

este relativ mică.

Rezistența de ieșire este rezistența AO ideal

$$R_O = 0 \quad (6.5)$$

Se observă, după cum era de așteptat, că amplificarea de tensiune depinde doar de valorile componentelor pasive externe  $R_1$  și  $R_F$  și este negativă, adică tensiunea de ieșire este în antifază cu tensiunea de intrare.

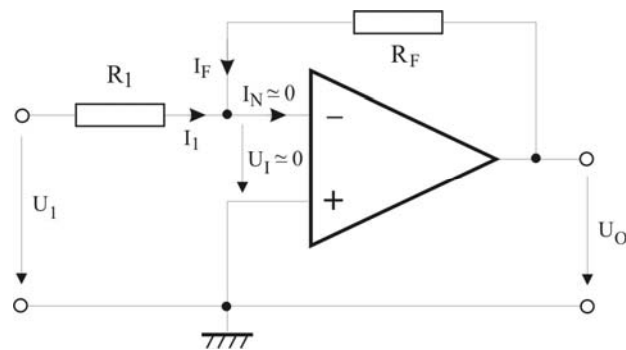


Fig. 6.4. Amplificator inversor cu AO

### Amplificator neinversor.

Are schema din figura 6.5.

Rezultă imediat :

$$U_O = R_F I_F + R_1 I_1 = (R_F + R_1) I_1$$

$$U_P = U_N = R_1 I_1$$

și atunci amplificarea de tensiune :

$$A_R = \frac{U_O}{U_P} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (6.6)$$

Rezistența de intrare și rezistența de ieșire ținând cont de schema echivalentă a AO ideal (fig. 6.3) sunt :

$$R_I - \text{infinită} \quad (6.7)$$

$$R_O = 0 \quad (6.8)$$

Amplificarea de tensiune depinde de asemenea doar de componentele passive externe și este pozitivă, tensiunea de ieșire fiind în fază cu tensiunea de intrare.

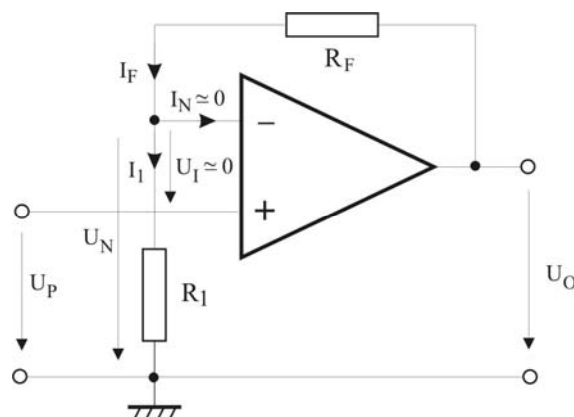


Fig. 6.5. Amplificator neinversor cu AO

### Amplificator repetor.

Are schema prezentată în figura 6.6 și este un caz particular al amplificatorului neinversor, pentru care  $R_1 \rightarrow \infty$  și  $R_F = 0$ .

Rezultă :

$$A_R = \frac{U_O}{U_P} = 1 \quad (6.9)$$

$$R_I \rightarrow \infty \quad (6.10)$$

$$R_O = 0 \quad (6.11)$$

Tensiunea de ieșire este egală cu tensiunea de intrare, de aici numele de repetor.

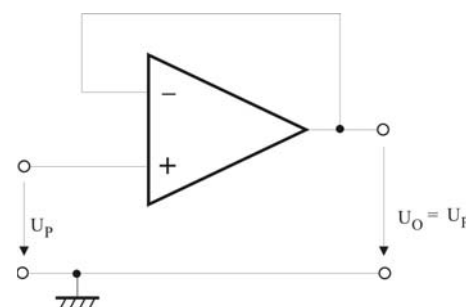


Fig. 6.6. Amplificator repetor cu AO

### Amplificator diferențial.

Este un circuit în care se aplică semnale diferite pe cele două intrări și are schema generală prezentată în figura 6.7.

Aplicând teorema superpoziției se poate scrie direct tensiunea de ieșire :

$$U_O = \frac{R_F}{R_2} U_2 + \left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right) U_P, \text{ sau :}$$

$$U_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right) \frac{R_3}{R_1 + R_3} U_1 - \frac{R_F}{R_2} U_2 \quad (6.12)$$

deci amplificarea nu are aceeași amplitudine pentru cele două semnale de intrare.

Rezistența de ieșire este ca și în cazul schemelor anterioare :

$$R_O = 0. \quad (6.13)$$

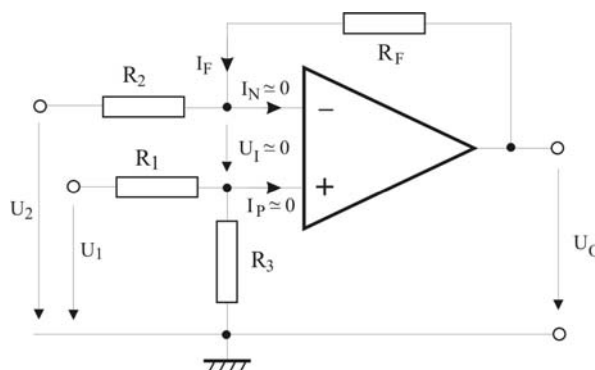


Fig. 6.7. Amplificator diferențial cu AO

Rezistențele de intrare sunt diferite pentru cele două canale și anume :

$$R_{I1} = R_1 + R_2 \quad (6.14)$$

$$R_{I2} = R_3 \quad (6.15)$$

pentru cazul în care a doua ieșire este în scurtcircuit și AO este ideal .

Cu acest amplificator se pot obține amplificări egale pentru semnalele de intrare dacă :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_F} \quad (6.16)$$

Într-adevăr, în acest caz :

$$U_0 = \frac{R_F}{R_3} (U_1 - U_2) \quad (6.17)$$

fiind amplificată chiar diferența tensiunilor de intrare. Amplificarea depinde doar de valorile componentelor passive. Rezistențele de intrare sunt relative mici și în cazul general neegale.

### 6.3. Erorile și parametrii amplificatoarelor operaționale reale

AO reale au performanțele limitate, dar erorile față de cazul utilizării unor AO ideale sunt în multe cazuri neglijabile. În aplicațiile de precizie erorile nu mai sunt neglijabile și trebuie cunoscute. Ele pot fi împărțite în trei grupe, erori statice sau de curent continuu, erori de calcul și erori dinamice, fiind caracterizate de parametri specifici.

**Erorile statice** privesc modificările nivelului de zero la ieșire în curent continuu atunci când tensiunea de intrare diferențială  $U_I$  este zero. Cauzele erorilor statice sunt decalajul și polarizarea la intrare precum și influența tensiunii de mod comun și a tensiunilor de alimentare.

**Erorile de calcul** apar în formulele amplificării de tensiune și ale rezistențelor de intrare și ieșire pentru circuitele de bază cu AO real și sunt datorate amplificării de tensiune fără reacție finite, rezistenței de intrare finite și rezistenței de ieșire diferită de zero în cazul AO real.

**Erorile dinamice** apar în comportarea la frecvențe ridicate sau în impulsuri ale AO și se datorează capacităților interne ale AO. Tot la erori dinamice este prezent și zgomotul AO real.

#### 6.3.1. Decalajul și polarizarea la intrare

Dacă AO din figura 6.8 ar fi ideal, atunci tensiunea de ieșire ar fi zero fiindcă ambele intrări sunt conectate la masă și tensiunea de intrare este zero.

În cazul AO real tensiunea de ieșire este diferită de zero, situația fiind ca și când pentru un AO ideal am avea o tensiune de intrare. Aceasta poartă numele de **tensiune de decalaj la intrare**  $U_{DI}$  și este un parametru specific amplificatoarelor de curent continuu (vezi și figura 1.43).

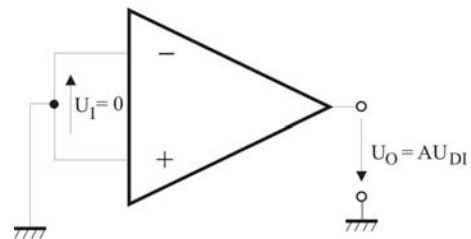


Fig. 6.8. Eroare datorată tensiunii de decalaj la intrare

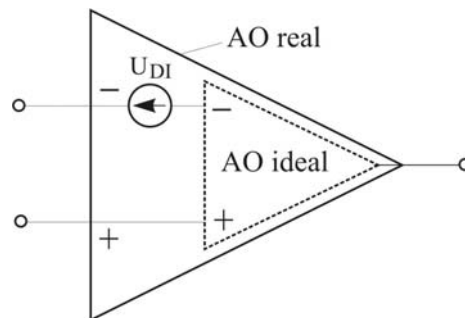


Fig. 6.9. Schemă echivalentă a AO ideal și generator de eroare de decalaj

Luând în considerare tensiunea de decalaj un AO real poate fi modelat, după cum este arătat în figura 6.9, dintr-un AO ideal și un generator de tensiune de valoare  $U_{DI}$  (generator echivalent de eroare la intrare).

Pentru a readuce ieșirea la zero (compensarea generatorului de eroare), trebuie aplicat un generator extern la una din intrări (figura 6.10). Se definește  $U_{DI}$  ca fiind tensiunea care trebuie aplicată la una din intrările AO, a doua intrare fiind la potențial zero, pentru a aduce ieșirea la nivel zero.

Considerăm în continuare un AO real, pentru care  $U_{DI} = 0$ . Dacă legăm intrările direct la masă,  $U_O = 0$ . Dacă legăm intrările prin rezistențe atunci se observă că  $U_O$  este diferit de zero. Mai mult, dacă modificăm rezistențele se modifică și  $U_O$ . Cauza este existența unor curenți de polarizare la fiecare intrare,  $I_{B+}$  și  $I_{B-}$  diferiți de zero, care duc la apariția unei tensiuni de intrare diferită de zero chiar dacă intrările sunt ambele la potențial zero (fig. 6.11).

Se definește **curentul de polarizare la intrare**,  $I_B$ , valoarea medie a curenților de polarizare a intrărilor:

$$I_B = \frac{I_{B+} + I_{B-}}{2} \quad (6.18)$$

Dacă curenții de polarizare ar fi egali, alegând  $R_1 = R_2$  se obține  $U_I = 0$  și se elimină eroarea pe care o produc. Curenții nu sunt egali, diferența lor fiind alt parametru al AO numit

$$I_{DI} = \frac{I_{B+} - I_{B-}}{2} \quad \text{curent de decalaj la intrare:} \quad (6.19)$$

și care este mult mai mic decât  $I_B$

Existența curenților de polarizare impune ca în toate schemele de utilizare să se asigure un circuit de curent continuu închis pentru fiecare dintre cei doi curenți de polarizare.

Curenții de polarizare adaugă o eroare suplimentară, efectul putând fi modelat prin introducerea la intrările unui AO a două generatoare de curent egale cu  $I_{B+}$  și  $I_{B-}$  (tot generatoare de eroare la intrare). Modelul luând în considerare și tensiunea de decalaj și curenții de polarizare este prezentat în figura 6.12.

Folosind acest model se poate determina influența generatoarelor de eroare la intrare într-o schemă de AO cu reacție. Se va lua ca exemplu amplificatorul inversor, concluziile fiind valabile și pentru configurația neinversoare.

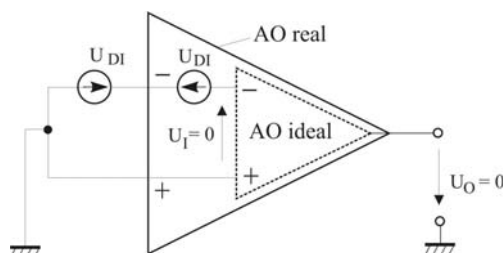


Fig. 6.10. Compensarea erorii de decalaj

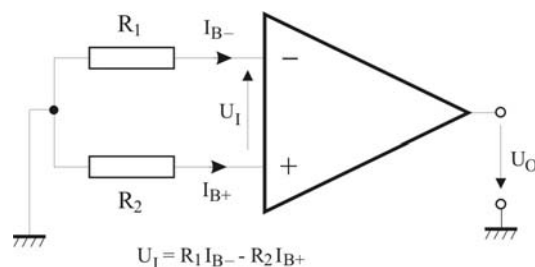


Fig. 6.11. Eroarea datorată curenților de intrare

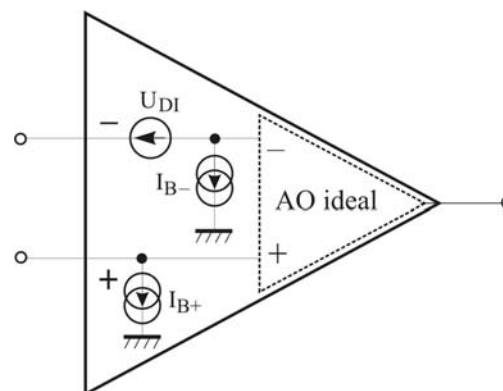


Fig. 6.12. Model AO real cu generatoarele de eroare de decalaj și polarizare

Schema amplificatorului este prezentată în figura 6.13. Tensiunea de intrare în amplificator este considerată zero. Teorema Kirchhoff pentru tensiuni conduce la ecuațiile:

$$U_0 = R_F(I_1 + I_{B-}) + R_1 I_1$$

$$I_1 R_1 = U_{DI} - U_I (=0, \text{AO ideal}) - R I_{B+}$$

De unde rezultă valoarea tensiunii de ieșire produsă de generatoarele de eroare:

$$U_O = \frac{R_F + R_1}{R_1} U_{DI} + R_F I_{B+} - R \frac{R_1 + R_F}{R_1} I_{B-} \quad (6.20)$$

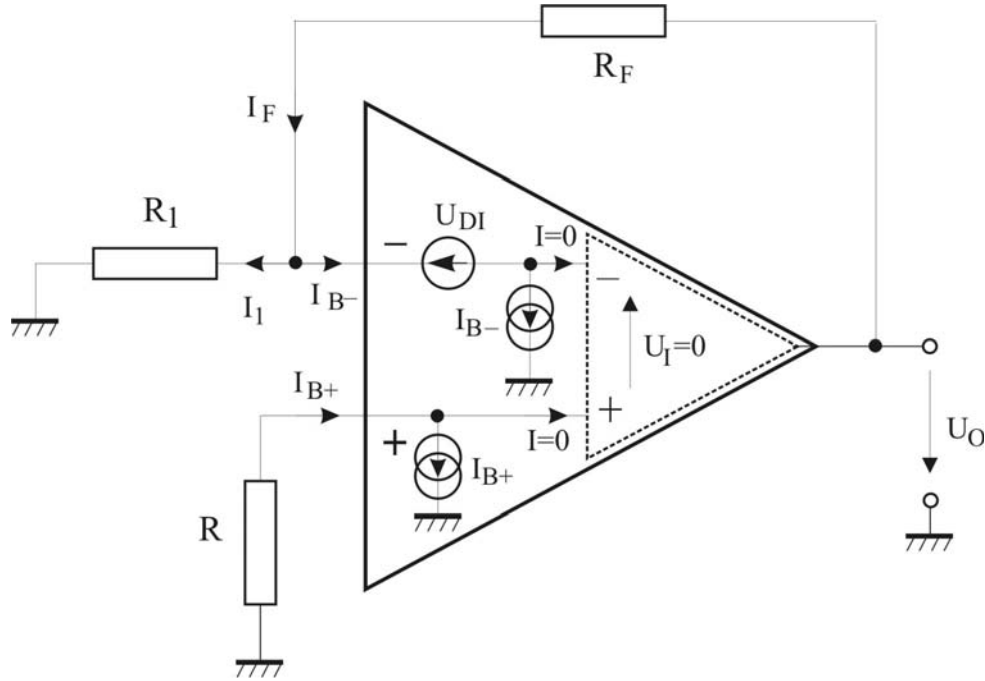


Fig. 6.13. Model de amplificator inversor cu generatoarele de eroare de decalaj și polarizare

Influența curenților de polarizare poate fi redusă la un termen care să depindă doar de curentul de decalaj. Într-adevăr, dacă :

$$R = R_1 \parallel R_F = \frac{R_1 R_F}{R_1 + R_F} \quad (6.21)$$

Atunci 
$$U_0 = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_{DI} + R_F I_{DI} \quad (6.22)$$

Condiția (6.21) poate fi generalizată pentru o schemă oarecare în felul următor: influența curenților de polarizare se reduce la influența curenților de decalaj atunci când dinspre cele două intrări ale unui AO se văd rezistențe egale. În schemele cu AO în general se ia măsura egalizării acestor rezistențe, prin adăugarea unor rezistențe la intrări care minimizează influența curenților de decalaj.

Relația (6.22) arată că micșorarea erorii date de curentul de decalaj se face prin micșorarea  $R_F$ . Dacă amplificarea este impusă trebuie alese rezistențe cât mai mici.

Eroarea dată de  $U_{DI}$ , care la amplificatorul fără reacție era  $A U_{DI}$ , în cazul unui amplificator cu reacție se micșorează ea fiind aproximativ egală cu  $A_R U_{DI}$ .

Relația (6.22) poate fi rearanjată ținând cont de relația (6.21) și se obține:

$$U_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)(U_{DI} + R I_{DI}) \quad (6.23)$$

Rezulta ca influența decalajului de tensiune și curent la intrare poate fi echivalată cu un singur generator de eroare,  $U_{DI} + R I_{DI}$ , iar eliminarea erorii se poate face cu un singur generator de compensare introdus la una dintre intrări.

Compensarea nu ridică probleme în cazul în cazul amplificatorului inversor. Este suficient să se introducă la intrarea neînversoare o tensiune reglabilă de corecție. Un circuit tipic este prezentat în figura 6.14. Rezistența  $R$  se alege din condiția de minimizare a influenței curenților de decalaj care impune rezistențe egale la intrări.

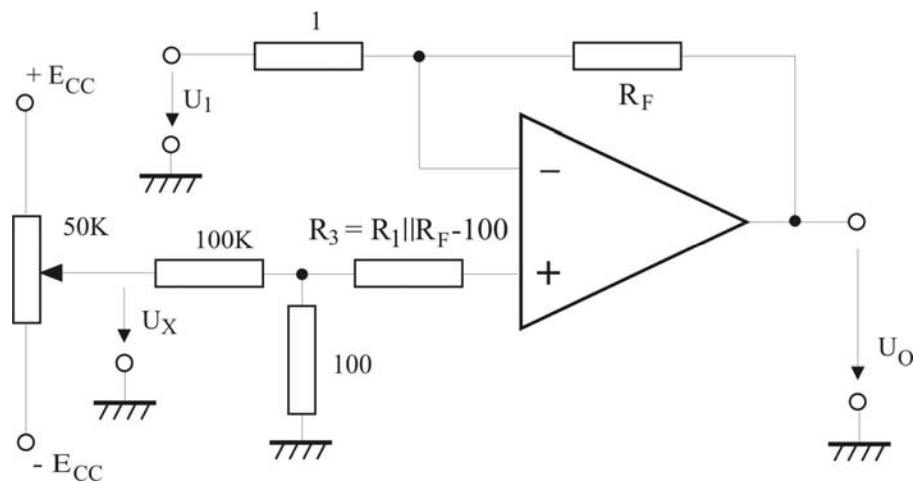


Fig. 6.14. Schemă de compensare decalaj și polarizare pentru amplificator inversor

Decalajul de curent și tensiune la intrare are drept cauză principală nesimetria amplificatorului diferențial de la intrarea AO.

Un alt principiu de compensare a generatoarelor de eroare de la intrare se bazează pe introducerea unui element ajustabil (rezistență reglabilă) la una din intrări pentru a simetriza amplificatorul de la intrare. Se obține pentru amplificatorul inversor o variantă simplă de compensare (figura 6.15).

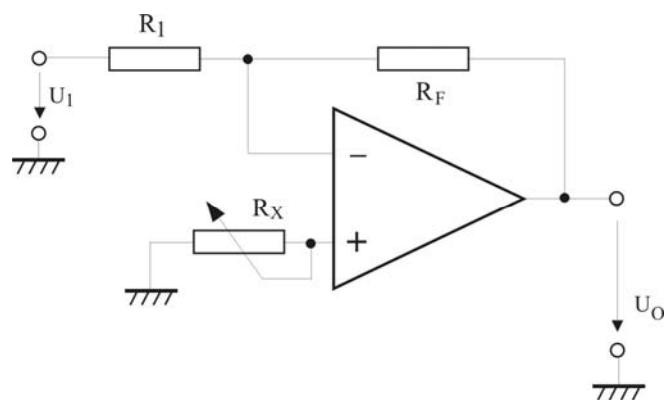


Fig. 6.15. Amplificator inversor cu variantă simplă de compensare

Compensarea este ceva mai delicată pentru montajul neînversor, în particular pentru circuitul repetor, deoarece modifică rețeaua de reacție și influențează nedorit amplificarea de tensiune.

O schema de compensare utilizata pentru circuitul neinversor este prezentata in figura

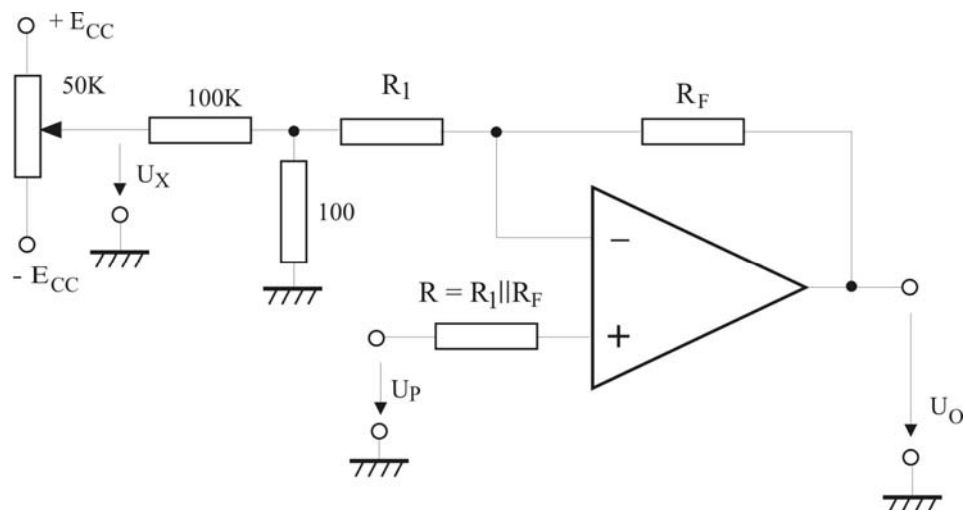


Fig. 6.16. Schema de compensare decalaj și polarizare pentru circuitul neinversor.

6.16.

Pentru repetor, circuitul de compensare (fig. 6.17) conduce la o amplificare supraunitara.

Circuitele de compensare a generatoarelor de eroare la intrare descrise sunt aplicabile oricărui tip de AO. Dar cele mai multe AO au prevazute borne special pentru compensarea decalajului la intrare și care se leagă conform indicațiilor producătorului. Câteva tipuri, cu circuitul recomandat, sunt prezentate in fig. 6.18.

Anularea completă a erorilor de decalaj nu este posibilă datorită fenomenului de **derivă** prin care mărimile de decalaj variază cu

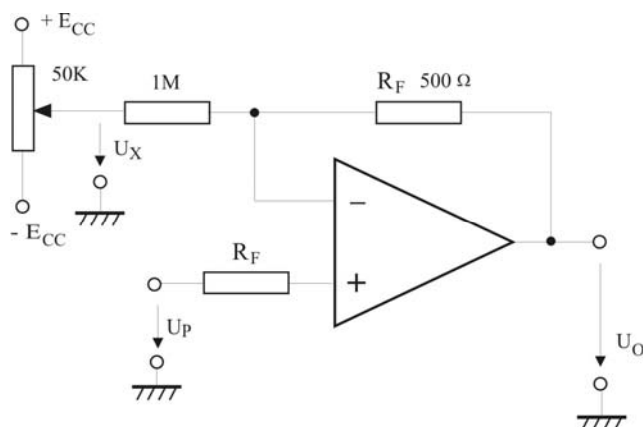


Fig. 6.17. Schema de compensare decalaj și polarizare pentru circuitul repetor.

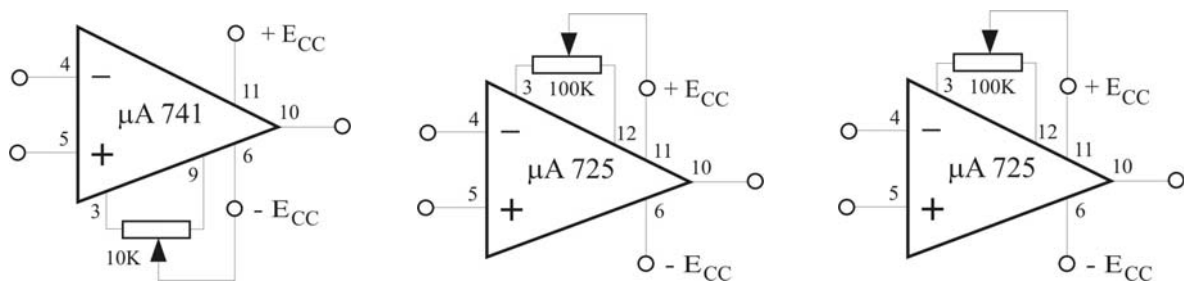


Fig. 6.18. Tipuri de AO și circuitele recomandate pentru compensare.



temperatura (în special), cu tensiunea de alimentare și în timp prin fenomenul de îmbătrânire. Chiar în condiții de laborator erorile nu pot fi reduse sub o valoare echivalentă cu variația acestor parametri la o diferență de aproximativ 2°C.

### 6.3.2. Factori de rejecție

Considerăm un amplificator cu generatoarele de eroare de decalaj compensate. Se leaga intrările împreună la aceeași tensiune, diferită de zero și se observă că tensiunea de ieșire este diferită de zero deși tensiunea diferențială la intrare  $U_I = 0$  (fig.6.19). Modificând tensiunea comună de intrare se modifică și tensiunea de ieșire. Deci amplificatorul real este sensibil și la semnalul comun, printr-un parametru denumit **amplificare de mod comun**,  $A_{MC}$ .

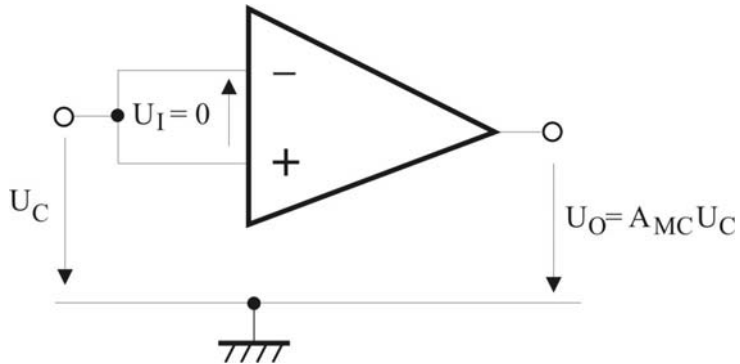


Fig. 6.19. Influența tensiunii comune pe intrările AO

Se mai definește **tensiunea de mod comun** ca fiind media aritmetică a tensiunilor la intrările AO:

$$U_C = \frac{U_P + U_N}{2} \quad (6.24)$$

Mai utilizat pentru caracterizarea AO funcție de comportarea la semnal comun este un parametru echivalent numit **factor de rejecție de mod comun**,  $CMR$ , definit de relația :

$$CMR = \frac{A}{A_{MC}} \quad (6.25)$$

$CMR$  este dat obisnuit in decibeli:

$$CMR_{dB} = 20 \log \frac{A}{A_{MC}} \quad (6.26)$$

Eroarea dată de tensiunea de mod comun  $\frac{U_C}{CMR}$  poate fi modelată printr-un generator de

eroare, (fig.6.20). Influența acestui generator este greu de compensat,  $CMR$  fiind o

funcție neliniară de  $U_C$  și temperatură.

Pentru configurația inversoare  $U_C = 0$  și nu apare nici o eroare provenită de la  $CMR$  finit. Erorile pot fi mari in cazul configuratiei neinversoare, in special când sunt cu câstig mic, repetorul fiind cel mai mult influențat .

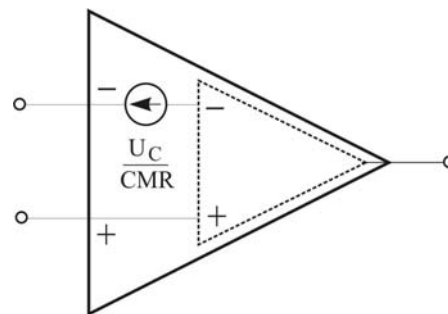


Fig. 6.20. Model ce ține cont de eroarea de mod comun

AO este sensibil și la modificarea unei surse de alimentare. Se poate observa o modificare a tensiunii de ieșire fără ca să existe sursă de semnal la intrare, ceea ce nu se întâmplă pentru un AO ideal. Influența variației tensiunii de alimentare asupra unui AO real se face prin parametrul **factor de rejecție al tensiunii de alimentare**,  $SVR$ . Acesta este raportul între variația unei tensiuni la intrarea AO și variația tensiunii de alimentare care conduc la un același rezultat la ieșire (sau aplicate concomitent nu modifică ieșirea) :

$$SVR = \frac{\Delta U_{IN}}{\Delta E_{CC}} \quad \text{pentru } U_O = \text{constant} \quad (6.27)$$

Pentru a ține cont și de erorile datorate factorilor de rejecție modelul amplificatorului real din figura 6.12 trebuie completat cu încă două generatoare de tensiune de eroare la

intrare,  $\frac{U_C}{CMR}$  și  $\Delta E_{CC} SVR$

### 6.3.3. Erori de calcul

Spre deosebire de A.O ideal un A.O real are amplificarea în buclă deschisă,  $A$ , finită, rezistență de intrare  $R_I$  finită și rezistență de ieșire  $R_O$  mai mare decât zero. Utilizat în configurațiile de bază un A.O real conduce la obținerea unor performanțe diferite de cele calculate anterior. Diferențele sînt considerate erori de calcul și trebuie cunoscute în cazul aplicațiilor de precizie.

La intrare un A.O real prezintă în afara rezistenței de intrare diferențiale (între intrări)  $R_I$ , și cîte o rezistență între fiecare intrare și masă, numită rezistență de intrare de mod comun,  $R_{IC}$ . Schema echivalentă la intrarea unui AO real este prezentată în figura 6..

Deoarece în general rezistența de intrare de mod comun este mult mai mare decât rezistența de intrare diferențială, prima se neglijează și se poate utiliza pentru evaluarea erorilor de calcul schema echivalentă din figura 6..

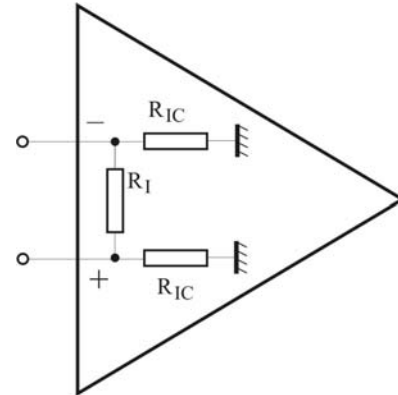


Fig. 6.21. Schema echivalentă la intrarea unui AO real

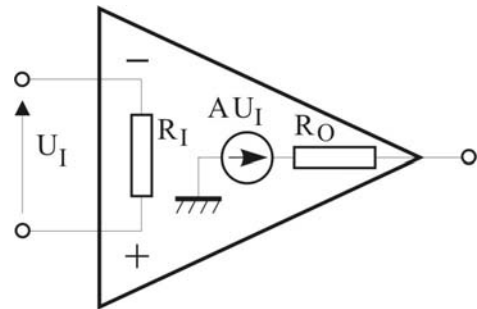


Fig. 6.22. Schema echivalentă a unui AO real cu rezistențele de intrare și ieșire