

AMPLIFICATORUL OPERAȚIONAL IDEAL

2.1 Noțiuni generale

Definiție. Amplificatorul operațional (AO) este un amplificator electronic de curent continuu, cu câștig mare, realizat sub formă de circuit integrat (CI), care amplifică diferența tensiunilor aplicate pe cele două intrări și este capabil să realizeze o gamă largă de funcții liniare, neliniare și de procesare de semnal.

Alimentarea cu tensiune a AO. Majoritatea AO se alimentează de la o sursă dublă de tensiune, cu polarități opuse, valorile uzuale fiind de +15V și -15V. O sursă dublă se obține prin legarea în serie a două surse simple E_1 și E_2 (fig.2.1).

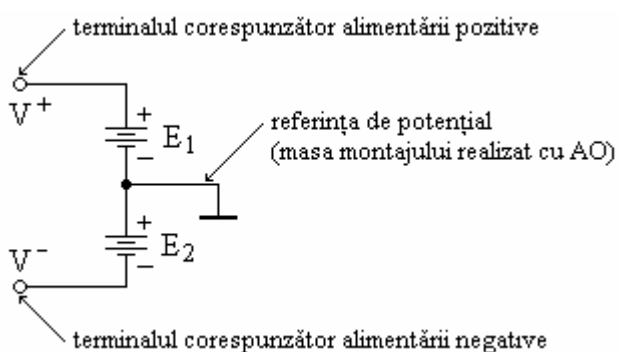


Fig. 2.1. Ilustrarea modului de conectare a sursei duble de tensiune cu care se alimentează AO

Plusul sursei E_1 devine plusul alimentării duble și se conectează la pinul corespunzător alimentării pozitive a AO (notat cu V^+ în catalog, litera V provenind de la cuvântul *voltage*, care înseamnă tensiune în limba engleză). Minusul sursei E_2 devine minusul alimentării duble și se conectează la pinul corespunzător alimentării negative a AO (notat cu V^- în catalog). Punctul de înseriere devine **referința de potențial** (masa montajului) și nu este conectat de obicei la AO propriu-zis, dar se conectează obligatoriu la montajul realizat cu AO. Toate semnalele de intrare în circuitul realizat cu AO au punctele de masă conectate la această referință de potențial. La ieșirea montajului, rezistența de sarcină se conectează între pinul de ieșire al AO și aceeași referință de potențial.

Tensiunile de saturație reprezintă valorile maxime, pozitive sau negative, ale tensiunilor de ieșire. Tensiunile de saturație depind de valoarea tensiunilor de alimentare și au, în general, valoarea cu aproximativ 2V mai mică decât tensiunile de alimentare.

Simbolul și terminalele AO. Un AO trebuie să aibă cel puțin cinci terminale (pini), dintre care trei de semnal și două de alimentare (fig.2.2). Unele AO mai sunt prevăzute cu încă două borne pentru anularea tensiunii de decalaj (offset) și cu 1-2 borne pentru compensarea în frecvență.

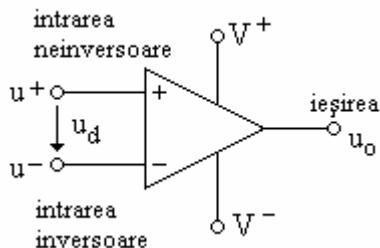


Fig. 2.2. Simbolul și terminalele amplificatorului operațional

Uzual, pentru desenarea simplificată a circuitelor cu AO, conexiunile surselor de alimentare nu se trec pe scheme. Totuși, trebuie să se rețină că, totdeauna, pentru ca circuitele să lucreze, sursele de alimentare trebuie să fie conectate la montaj.

Terminalele de intrare sunt cele din stânga figurii și au denumirea de **intrare inversoare** și **intrare neinversoare**.

Intrarea inversoare este notată cu semnul (-) iar cea neinversoare cu semnul (+). *Aceste semne nu au nici o legătură cu polaritatea tensiunilor individuale, u^+ și u^- , care se pot aplica pe aceste terminale*, deoarece ambele semnale pot fi, în raport cu masa, atât pozitive cât și negative. Aceste semne au în schimb legătură cu relația de fază dintre semnalele de intrare și cel de ieșire. Astfel, dacă intrarea neinversoare se leagă la masă iar pe intrarea inversoare se aplică un semnal cu variație crescătoare, la ieșire se obține un semnal cu variație descrescătoare. Din acest motiv intrarea (-) se numește inversoare. Similar, dacă intrarea inversoare este conectată la masă și se aplică un semnal cu variație crescătoare pe intrarea neinversoare, la ieșire se obține un semnal tot cu variație crescătoare. Din această cauză intrarea (+) se numește neinversoare.

Așa cum se va vedea mai departe, aceste semne au legătură cu semnul câștigului în tensiune. Terminalul de ieșire este cel din dreapta figurii 2.2.

Modelul de circuit. Deoarece AO este un circuit complex, care conține zeci de componente (tranzistoare, rezistoare), pentru a se putea studia montajele realizate cu el, AO se înlocuiește cu un circuit electric echivalent, pe care se pot aplica ușor teoremele lui Kirchhoff. Acest circuit care văzut din exterior se comportă ca și AO pe care îl înlocuiește, se numește model de circuit.

Modelul de circuit cel mai apropiat pentru AO este cel de amplificator de tensiune (fig.2.3). Conform acestui model, circuitul conectat la bornele de intrare ale AO “vede” o rezistență, notată r_d și numită *rezistență de intrare*.

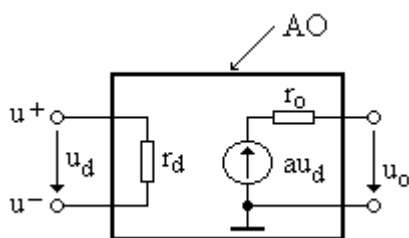


Fig. 2.3. Modelul de circuit al amplificatorului operațional

La borna de ieșire, AO se face “cunoscut” circuitului care urmează prin sursa de tensiune controlată în tensiune, notată cu au_d și rezistența internă a acesteia, r_o , numită *rezistența de ieșire* a AO.

Tensiunile evidențiate pe modelul din fig.2.3 și care sunt identice cu cele de la intrarea AO au următoarea semnificație:

- u^+ - tensiunea individuală aplicată la intrarea neinversoare;
- u^- - tensiunea individuală aplicată la intrarea inversoare;
- u_d - tensiunea diferențială de intrare, care reprezintă, prin definiție, diferența dintre semnalul aplicat pe intrarea neinversoare și cel aplicat pe intrarea inversoare:

$$u_d = u^+ - u^- \quad (2.1)$$

- u_o - tensiunea de ieșire, măsurată în raport cu potențialul masei.

Ațiunea complexă a AO rezultă din amplificarea tensiunii de intrare diferențiale cu un factor de amplificare foarte mare, notat cu a pe modelul de circuit din fig.2.3. Relația tensiunii de ieșire în raport cu masa este:

$$u_o = a u_d = a(u^+ - u^-) \quad (2.2)$$

Observație: amplificarea a este o amplificare în buclă deschisă și se numește astfel deoarece nu s-a conectat nici o componentă de circuit între ieșirea AO și vreuna dintre intrări. Ea este o amplificare utilă, numită amplificare diferențială.

2.2 Conceptul de AO ideal și consecințele acestui concept

Deși AO ideale nu există, cele reale sunt destul de apropiate de acest concept. Pentru o aplicație dată, proiectantul de circuit trebuie să selecționeze acel AO ale cărui imperfecțiuni (abateri de la idealitate) nu degradează semnificativ performanțele ce s-ar obține cu un AO ideal. Este de dorit, deci, ca AO folosit într-o anumită aplicație să fie cât mai aproape de AO ideal.

Se presupune că AO ideal se caracterizează prin:

- rezistență de intrare, văzută între cele două intrări, infinită, $r_d \rightarrow \infty$;
- rezistență de ieșire, văzută între terminalul de ieșire și masă, nulă, $r_o = 0$, deci nu apare nici o rezistență în serie cu sursa dependentă de tensiune;
- amplificare diferențială în buclă deschisă infinită, $a \rightarrow \infty$.

Cu aceste presupuneri, modelul de circuit al unui AO ideal este cel din fig.2.4.

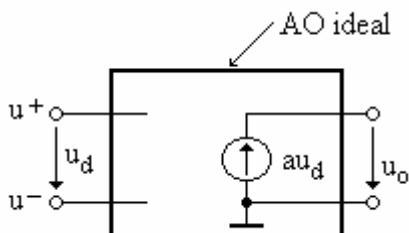


Fig. 2.3. Modelul de circuit al amplificatorului operațional ideal

Conceptul de AO ideal are următoarele **consecințe**, prezentate în ordinea presupunerilor de idealitate:

- rezistență de intrare infinită înseamnă că prin niciuna dintre terminalele de intrare nu curge curent. Atunci când la intrările AO se conectează un anumit circuit, la aplicarea teoremelor lui Kirchhoff curenții prin cele două intrări se consideră egali cu zero;
- presupunerea că rezistența de ieșire este zero implică faptul că tensiunea de ieșire nu se modifică la conectarea unei sarcini față de situația fără sarcină. Deci AO furnizează aceeași tensiune de ieșire, indiferent de valoarea curentului de sarcină;
- consecința celei de a treia presupuneri este cea mai importantă. Din relația (2.2) rezultă că tensiunea de intrare diferențială se poate scrie

$$u_d = u^+ - u^- = \frac{u_o}{a} \quad (2.3)$$

Dacă circuitul lucrează liniar (adică tensiunea de ieșire este mai mică decât cea de saturație) și este stabil (adică circuitul nu oscilează), atunci u_o va avea o valoare finită și dacă $a \rightarrow \infty$ va rezulta că

$$\lim_{a \rightarrow \infty} u_d = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{u_o}{a} = 0 \quad (2.4)$$

adică tensiunea diferențială u_d se apropie de zero. Se poate deci scrie:

$$u_d = u^+ - u^- = 0 \quad (2.5)$$

sau

$$u^+ = u^- \quad (2.6)$$

Concluzia foarte importantă care se desprinde din relația (2.6) constă în aceea că **AO lucrează astfel încât tensiunile individuale de la cele două intrări sunt forțate să fie egale.**

Apare firesc întrebarea: de ce tensiunea u_o este diferită de zero dacă $u_d=0$ iar $u_o=au_d$?

Răspunsul este următorul: tensiunea diferențială u_d nu este chiar zero ci are o valoare foarte mică, astfel că atunci când este multiplicată cu valoarea foarte mare a amplificării în buclă deschisă, rezultă pentru u_o o valoare diferită de zero.

De exemplu, valorile tipice pentru o funcționare liniară a unui AO sunt: $a=10^5$ și $u_d=20\mu\text{V}$, valori pentru care rezultă $u_o=au_d=10^5 \times 20 \times 10^{-6}=2\text{V}$, o valoare rezonabilă și mai mică decât tensiunea de saturație. Astfel, la un AO real, tensiunea diferențială u_d nu este niciodată zero iar amplificarea a nu este niciodată infinită, dar cele două presupuneri $a \rightarrow \infty$ și $u_d=0$ sunt utile pentru analiza circuitelor realizate cu AO.

Chiar dacă presupunerea că tensiunea diferențială de intrare este zero conduce la ideea că pe cele două intrări ale AO se aplică tensiuni de valori egale, *nu este voie niciodată, ca într-un circuit realizat cu AO, să se unească cele două intrări.* Așa cum s-a arătat mai sus, pentru ca AO să lucreze normal, între cele două intrări trebuie să existe o mică diferență de potențial, situație care nu se poate obține dacă intrările se unesc negativă.

2.3 Conceptul general de reacție

În realizarea amplificatoarelor, reacția negativă se utilizează deoarece, prin aplicarea sa, rezultă câteva **consecințe favorabile** importante și anume:

- reacția negativă stabilizează câștigul amplificatorului față de modificările parametrilor dispozitivelor active determinate de variațiile surselor de alimentare, de variațiile de temperatură și de efectele de îmbătrânire;
- reacția negativă permite proiectantului să modifice impedanțele de intrare și de ieșire ale circuitului așa cum dorește;
- datorită reacției negative se reduc distorsiunile formei de undă produse de amplificatorul fără reacție;
- reacția negativă determină creșterea benzii de frecvență a amplificatorului.

La aceste avantaje se asociază și două **dezavantaje**:

- câștigul circuitului se reduce aproape direct proporțional cu mărimea avantajelor ce se obțin;
- poate să apară tendința de oscilație a circuitului dacă montajul nu este realizat cu atenție.

Fie configurația idealizată de reacție negativă din fig.2.5, unde S_i și S_o sunt semnalele de intrare, respectiv ieșire, care pot fi tensiuni sau curenți. Rețeaua de reacție, care în mod obișnuit este liniară și pasivă, are o funcție de transfer notată cu b ; ea trimite înapoi spre intrare un semnal S_b . La intrare se face diferența între semnalul de intrare S_i și cel de reacție S_b . Semnalul de eroare, S_e , dat de diferența între S_i și S_b este trimis către amplificatorul de bază care are funcția de transfer a .

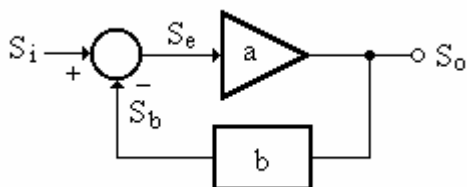


Fig. 2.5. Configurație idealizată de reacție negativă

În practică, amplificatoarele cu reacție negativă fac diferența între semnalele S_i și S_b (există un nod/ochi de intrare în/pe care cele două semnale se scad).

Din fig.2.5 rezultă:

$$S_o = aS_e \quad (2.7)$$

presupunând că rețeaua de reacție nu încarcă amplificatorul de bază.

De asemenea

$$S_b = bS_o \quad (2.8)$$

$$S_e = S_i - S_b \quad (2.9)$$

Înlocuind (2.8) în (2.9) se obține

$$S_e = S_i - bS_o \quad (2.10)$$

Înlocuind (2.10) în (2.7) se găsește

$$S_o = aS_i - abS_o \quad (2.11a)$$

sau

$$\frac{S_o}{S_i} = A = \frac{a}{1+ab} \quad (2.11b)$$

Ecuția (2.11b) este ecuația fundamentală a circuitelor cu reacție negativă, A fiind amplificarea în buclă închisă a circuitului.

Considerând AO ideal, relația (2.11b) se scrie la limită:

$$\lim_{a \rightarrow \infty} A = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{a}{1+ab} = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{a} + b} = \frac{1}{b} \quad (2.12)$$

Această relație arată că pentru valori mari ale amplificării în buclă deschisă, câștigul global al amplificatorului este determinat de funcția de transfer a circuitului de reacție. Deoarece rețeaua de reacție este în mod uzual formată din elemente stabile, pasive, valoarea lui b este bine definită. În consecință este bine definită și valoarea amplificării globale.

Este util să se introducă mărimea T , denumită câștigul pe buclă și definită astfel:

$$T = ab \quad (2.13)$$

Ținând cont de această mărime relația (2.11b) se poate scrie:

$$A = \frac{1}{1 + \frac{1}{T}} \quad (2.14)$$

Aceeași observație de mai sus se poate reformula astfel: pentru valori mari ale câștigului pe buclă T , câștigul global al amplificatorului este determinat de funcția de transfer a circuitului de reacție.

Bucla de reacție operează astfel încât forțează semnalul S_b să fie aproape egal cu semnalul S_i . Această situație se obține amplificând diferența $S_e = S_i - S_b$, bucla de reacție făcând apoi ca semnalul de eroare să fie minim. Pentru a pune în evidență acest fapt se înlocuiește (2.11b) în (2.10) obținându-se:

$$S_e = S_i - b \frac{aS_i}{1+ab} \quad (2.15)$$

care se rescrie:

$$\frac{S_e}{S_i} = \frac{1}{1+ab} = \frac{1}{1+T} \quad (2.16)$$

Pe măsură ce câștigul pe buclă devine mult mai mare ca unitatea, S_e devine mult mai mic decât S_i . În plus dacă se înlocuiește (2.11b) în (2.8) se obține:

$$S_b = bS_i \frac{a}{1+ab} \quad (2.17)$$

sau

$$\frac{S_b}{S_i} = \frac{T}{1+T} \quad (2.18)$$

deci dacă $T \gg 1$, atunci S_b este aproximativ egal cu S_i . Aceasta înseamnă că semnalul de reacție este practic o replică a semnalului de intrare.

Deoarece semnalele S_b și S_o sunt direct legate prin relația (2.8), rezultă că în cazul în care $|b| < 1$, semnalul S_o este o replică amplificată a semnalului S_i ceea ce constituie, de fapt, scopul unui amplificator cu reacție.

2.4 Configurații de bază realizate cu AO

Cele mai importante configurații realizate cu amplificatoare operaționale, de a căror cunoaștere depinde înțelegerea funcționării tuturor celorlalte circuite construite cu AO, sunt:

- configurația inversoare și
- configurația neinversoare.

2.4.1 Configurația inversoare

Amplificatorul inversor reprezintă una dintre configurațiile utilizate cel mai des și are structura din fig.2.6.

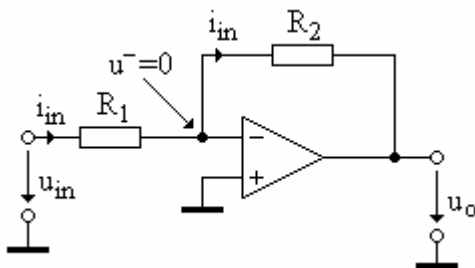


Fig. 2.6. Structura configurației inversoare, realizată cu amplificator operațional

Observație: în montajele practice, în serie cu intrarea neinversoare se conectează un rezistor care are rolul să reducă influența curenților de polarizare a intrărilor AO. Subiectul se va detalia mai târziu. Montajul poate lucra foarte bine și fără acest rezistor, în această formă simplă fiind mai ușor de studiat.

Ne propunem să determinăm funcția de transfer a circuitului, adică să calculăm relația amplificării în buclă închisă. Circuitul este în buclă închisă, deoarece între borna de ieșire și cea corespunzătoare intrării inversoare s-a conectat rezistorul R_2 .

Presupunând funcționarea liniară și stabilă, tensiunea de intrare diferențială este forțată să fie egală cu zero și astfel $u^- = u^+$.

Dar intrarea neinversoare este conectată la masă, deci $u^+ = 0$, astfel că și intrarea inversoare va avea tot potențialul zero al masei. Se spune că în cazul amplificatorului inversor intrarea inversoare este punct virtual de masă. S-a folosit atributul “virtual” deoarece în realitate intrarea inversoare nu este legată direct la masă ci are doar potențialul masei.

Important: chiar dacă potențialul intrării inversoare este egal cu cel al masei, este interzis să se lege intrarea inversoare la masă, deoarece, așa cum s-a mai arătat, pentru ca AO să lucreze normal, între cele două intrări trebuie să existe o mică diferență de potențial.

Faptul că intrarea inversoare are potențialul egal cu cel al masei conduce la concluzia că tensiunea de intrare se regăsește integral la bornele rezistorului R_1 . Astfel curentul de intrare i_{in} se poate determina cu ajutorul legii lui Ohm și este:

$$i_{in} = \frac{u_{in}}{R_1} \quad (2.19)$$

Aplicând presupunerea că prin terminalele de intrare ale AO nu curge curent, rezultă că în nodul corespunzător intrării inversoare nu are loc divizarea curentului i_{in} și că prin rezistorul de reacție R_2 va circula același curent i_{in} . Căderea de tensiune de la bornele rezistorului R_2 va fi:

$$u_r = R_2 i_{in} = \frac{R_2}{R_1} u_{in} \quad (2.20)$$

Deoarece intrarea inversoare este punct virtual de masă, tensiunea de ieșire este egală cu căderea de tensiune de pe rezistorul R_2 , dar are sensul opus tensiunii de reacție și se poate scrie:

$$u_o = -u_r = -\frac{R_2}{R_1} u_{in} \quad (2.21)$$

Amplificarea în buclă închisă a circuitului se notează cu A și reprezintă raportul dintre tensiunea de ieșire și cea de intrare:

$$A = \frac{u_o}{u_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.22)$$

Din relația (2.22) se observă că amplificarea în buclă închisă depinde de raportul a două rezistențe și este independentă de valoarea amplificării în buclă deschisă, care poate varia de la un exemplar de AO la altul, chiar dacă amplificatoarele operaționale sunt de același tip.

Dacă se selecționează rezistoare de precizie, atunci și valoarea amplificării în buclă închisă se poate controla cu precizie mare.

Rezistența de intrare a circuitului, R_{in} reprezintă prin definiție raportul dintre tensiunea de intrare, u_{in} și curentul de intrare, i_{in} . Luând din nou în considerare faptul că tensiunea de intrare apare la bornele rezistorului R_1 , rezultă:

$$R_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = R_1 \quad (2.23)$$

Este foarte important să nu apară confuzie între rezistența de intrare a amplificatorului operațional, care s-a presupus infinită și rezistența de intrare a circuitului compus din AO și rezistoarele R_1 și R_2 , dată de relația (2.23).

Rezistența de ieșire a circuitului este egală cu zero.

2.4.2 Configurația neinversoare

Amplificatorul neinversor reprezintă cea de-a doua configurație foarte importantă realizată cu AO și are schema desenată în fig.2.7.

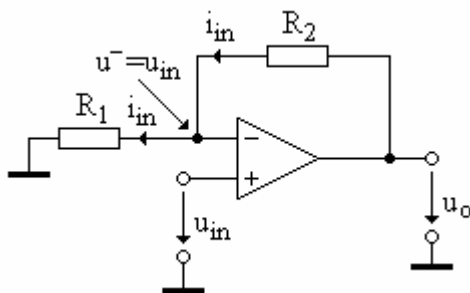


Fig. 2.6. Structura configurației neinversoare, realizată cu amplificator operațional

Observație: în montajele practice, în serie cu intrarea neinversoare se introduce un rezistor cu rolul de a reduce influența curentilor de polarizare a intrărilor. Circuitul poate să lucreze și fără acest rezistor, astfel fiind mai ușor de analizat.

Semnalul se aplică direct la intrarea neinversoare. Presupunând funcționarea liniară și stabilă, tensiunea de intrare diferențială este forțată să fie egală cu zero și deci:

$$u^- = u^+ = u_{in} \quad (2.24)$$

Această tensiune apare chiar la bornele rezistorului R_1 astfel că expresia curentului prin R_1 se poate scrie:

$$i_{in} = \frac{u_{in}}{R_1} \quad (2.25)$$

Deoarece prin intrarea inversoare nu circulă curent, i_{in} va curge prin rezistorul R_2 , având sensul de la borna de ieșire a AO, prin R_2 și R_1 spre masă. La bornele rezistorului R_2 apare căderea de tensiune:

$$u_{R2} = R_2 i_{in} = R_2 \frac{u_{in}}{R_1} \quad (2.26)$$

Aplicând teorema a II-a lui Kirchhoff pe ochiul format de tensiunile u_{in} , u_{R2} și u_o rezultă:

$$u_o = u_{in} + u_{R2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)u_{in} \quad (2.27)$$

astfel că amplificarea în buclă închisă se scrie:

$$A = \frac{u_o}{u_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.28)$$

Ca și în cazul circuitului inversor, amplificarea în buclă închisă a configurației neinvertoare este o funcție numai de un raport de rezistențe și este independentă de amplificarea în buclă deschisă.

Rezistența de intrare a amplificatorului neinvertor este infinită, ceea ce înseamnă că această configurație nu absoarbe curent de la sursa de semnal.

Rezistența de ieșire a circuitului este egală cu zero.

Repetorul de tensiune reprezintă un caz particular de circuit neinvertor, la care amplificarea este unitară (fig.2.8).

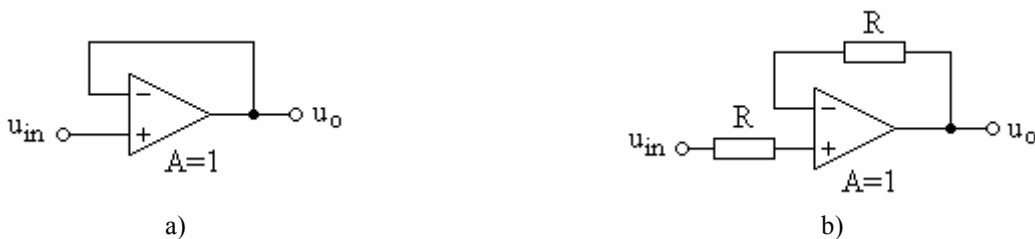


Fig. 2.8. Structura repetorului de tensiune, realizat cu amplificator operațional. (a) Schema simplă de repetor. (b) Schema de repetor care utilizează rezistoare de compensare a efectului curenților de polarizare a intrărilor AO

Amplificarea în buclă închisă se poate determina dacă în relația (2.28) se fac înlocuirile $R_2=0$ și $R_1 \rightarrow \infty$, rezultând:

$$A = 1 \quad (2.29)$$

Amplificarea în buclă închisă este egală cu unitatea și astfel ieșirea „repetă” tensiunea de la intrare.

Ce rol ar putea să aibă un astfel de circuit care nu modifică amplitudinea semnalului? Nu trebuie uitat că repetorul provine dintr-un amplificator neinvertor care are impedența de intrare infinită. Dacă, în cazul ideal, se consideră că impedența de ieșire este zero, se poate afirma că repetorul de tensiune realizează o amplificare de putere. Repetorele de tensiune se folosesc ca elemente de izolare între sursele de semnal și sarcinile acestora, atunci când se cere menținerea nealterată a unui anumit nivel al semnalului de intrare.

Așa cum se observă în fig.2.8, b, în serie cu intrarea neinvertoare mai apare un rezistor, care poate fi chiar rezistența internă a sursei de semnal. Pentru reducerea influenței curenților de polarizare a intrărilor, pe calea de reacție se conectează un rezistor, de valoare egală cu cea a rezistorului serie din intrarea neinvertoare. Circuitul care rezultă este tot un repetor de tensiune, la care $A=1$. În cazul ideal, neexistând circulație de curent prin intrări, nu apar căderi de tensiune pe rezistențele notate cu R și amplificarea în tensiune nu este afectată. Chiar dacă R_2 nu este egal cu zero, deoarece condiția $R_1 \rightarrow \infty$ este indeplinită, relația (2.28) dă în continuare rezultatul $A=1$.

Exemplul 2.1 Se presupune amplificatorul inversor din fig.2.9, a.

- Să se determine valoarea amplificării în buclă închisă, $A=u_o/u_{in}$;
- Considerând că tensiunile de alimentare sunt de $\pm 15V$ iar cele de saturație, $\pm U_{sat}=\pm 13V$, să se determine valoarea maximă (de vârf) a semnalului de intrare pentru care AO mai lucrează liniar;
- Să se determine valorile tensiunii de ieșire u_o pentru fiecare din următoarele valori ale tensiunii de intrare: $0V$; $-0,5V$; $0,5V$; $1V$; $-2V$;

d) Dacă între borna de ieșire și masă se conectează o rezistență de sarcină $R_L=2k\Omega$, să se determine curentul de ieșire al AO pentru $u_{in}=-1V$ și apoi pentru $u_{in}=1,3V$.

Rezolvare:

a) amplificarea în buclă închisă este:

$$A = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{100k}{10k} = -10 \quad (2.30)$$

Semnul minus arată faptul că tensiunea de ieșire este de semn opus față de cea de intrare (între cele două tensiuni există un defazaj de 180°).

b) Valoarea maximă a tensiunii de intrare pentru care ieșirea AO se saturează este:

$$\hat{u}_{in} = \frac{U_{sat}}{|A|} = \frac{13V}{10} = 1,3V \quad (2.31)$$

Rezultatul este valabil pentru ambele polarități ale semnalului de intrare. Deci funcționarea liniară are loc dacă amplitudinea semnalului de intrare se modifică între $-1,3V$ și $+1,3V$.

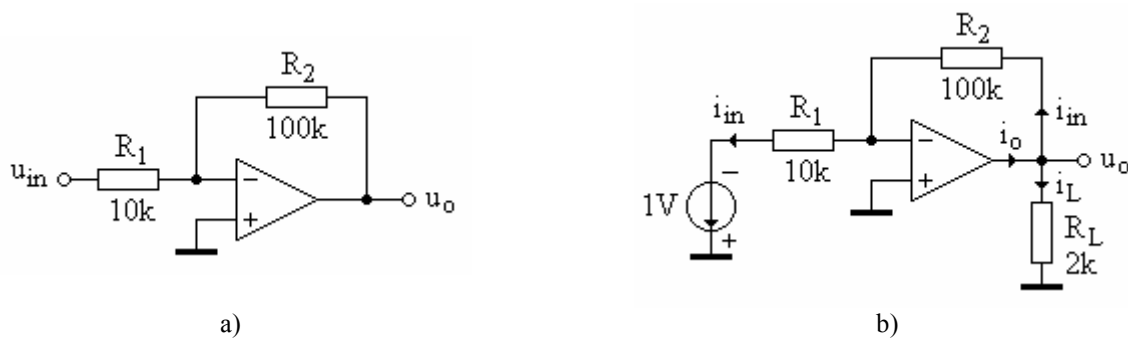


Fig. 2.9. Circuitul pentru exemplul 2.1. (a) Schema circuitului. (b) Circuitul utilizat pentru determinarea curentului de ieșire al AO, când $U_{in}=-1V$

c) Pentru a calcula valorile tensiunii de ieșire în funcție de diferitele valori ale tensiunii de intrare se înmulțește fiecare valoare a tensiunii de intrare cu valoarea amplificării în buclă închisă:

$$u_o = Au_{in} = -10u_{in} \quad (2.32)$$

Rezultatele pentru primele patru valori ale tensiunii de intrare se trec în tabelul de mai jos:

u_{in} (V)	u_o (V)
0	0
-0,5	+5
0,5	-5
1	-10

Se observă că $u_o=0$ când $u_{in}=0$, deoarece s-a presupus AO ideal.

Pentru alte valori ale tensiunii de intrare, la ieșire se obține o tensiune de 10 ori mai mare, dar cu semn schimbat. Această schimbare de semn este elementul caracteristic amplificatorului inversor.

Pentru $u_{in}=-2V$, dacă se folosește relația (2.32), ar trebui să găsim la ieșire valoarea de $+20V$. Această valoare nu se poate atinge deoarece AO se saturează iar tensiunea de saturație este de $+13V$. În această situație tensiunea de intrare a depășit valoarea de vârf corespunzătoare funcționării liniare iar ecuația (2.32) nu mai este valabilă. Dacă circuitul se folosește în aceste condiții, rezultatele vor fi nemulțumitoare. Semnalul de ieșire va fi distorsionat, adică limitat la valoarea de aproximativ $+13V$.

d) Pentru $R_L=2k\Omega$ și $u_{in}=-1V$, circuitul are aspectul din fig.2.9,b.

Curentul total de ieșire al AO, i_o , are două componente: curentul prin sarcină și cel prin rețeaua de reacție.

Curentul de sarcină este:

$$i_L = \frac{u_o}{R_L} = \frac{10V}{2k} = 5mA \quad (2.33)$$

A doua componentă a curentului i_o curge spre masă, prin rețeaua de reacție. Deoarece tensiunea de intrare este negativă, sensul pozitiv al acestui curent este spre masă. Tensiunea u_{in} apare la bornele rezistorului R_1 , astfel că se obține:

$$i_{in} = \frac{|u_i|}{R_1} = \frac{1V}{10k} = 0,1mA \quad (2.34)$$

și curentul total de ieșire devine:

$$i_o = i_L + i_{in} = 5 + 0,1 = 5,1mA \quad (2.35)$$

Pentru $u_{in}=1,3V$, condițiile de circuit se prezintă în fig.2.9, c.

Calculând asemănător ca mai sus se găsește:

$$i_o = 6,63mA \quad (2.36)$$

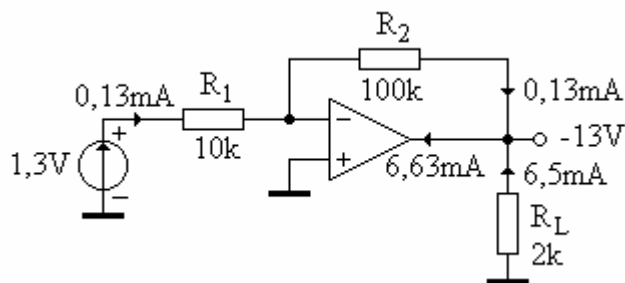


Fig. 2.9, c. Circuitul utilizat pentru determinarea curentului de ieșire al AO, dacă $U_i=1,3V$

Analizând cele două situații de la subpunctul d), se observă că pentru o valoare dată a tensiunii de intrare cele două componente ale curentului de ieșire al AO au același sens în raport cu borna de ieșire a AO și că amplitudinea lor crește odată cu mărirea amplitudinii semnalului de intrare. Astfel se poate estima valoarea maximă a curentului de ieșire al AO în funcție de valoarea de vârf a tensiunii de intrare.

Dacă semnalul de intrare este simetric atunci se obțin curenți de ieșire care au sensuri opuse și valori egale pentru cele două semialternanțe ale semnalului de intrare. Dacă semnalul de intrare este nesimetric, atunci valoarea maximă a curentului de ieșire se apreciază pentru semialternanța cu amplitudinea mai mare. **Pentru ca AO să nu se distrugă este important să nu se depășească valoarea maximă admisă a curentului de ieșire pentru AO utilizat.**

În acest exemplu valoarea curentului prin rețeaua de reacție este mică și este bine să fie așa. Dacă rezistențele din circuitul de reacție au valori mici, atunci componenta curentului de ieșire a AO, corespunzătoare rețelei de reacție, poate deveni excesiv de mare și poate bloca AO (intră în acțiune circuitele de limitare a curentului debitat de etajul de ieșire al AO). În acest fel valoarea curentului de ieșire nu mai corespunde situației reale, de funcționare liniară, ci este curentul de limitare.

Exemplul 2.2. Se presupune același AO, alimentat cu $\pm 15V$ dar în configurație neinversoare (fig.2.10, a). Să se repete analiza din Exemplul 2.1.

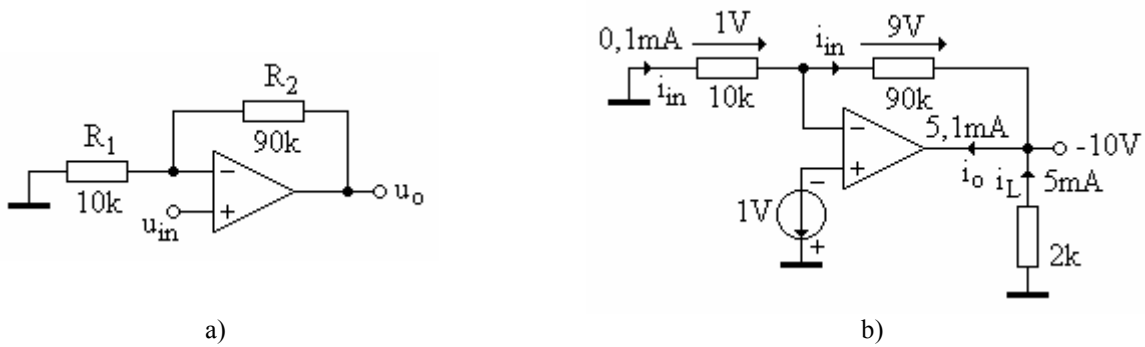


Fig. 2.10. Circuitul pentru exemplul 2.2. (a) Schema circuitului.
 (b) Circuitul utilizat pentru determinarea curentului de ieșire al AO, când $U_{in} = -1V$

Rezolvare:

a) Amplificarea în buclă închisă este

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{90k\Omega}{10k\Omega} = 10 \quad (2.37)$$

Mărimea amplificării este aceeași ca în Exemplul 2.1 dar R_2 este de valoare mai mică decât în cazul analizat anterior.

b) Deoarece mărimea amplificării este identică iar tensiunile de saturație au aceleași valori, rezultă că valoarea maximă (de vârf) a semnalului de intrare pentru care AO mai lucrează liniar este identică cu cea din Exemplul 2.1, adică:

$$\hat{u}_{in} = \frac{U_{sat}}{|A|} = \frac{13V}{10} = 1,3V \quad (2.38)$$

c) Valorile tensiunii de ieșire se determină cu relația:

$$u_o = Au_{in} = 10u_{in} \quad (2.39)$$

și sunt trecute în tabelul de mai jos:

u_{in} [V]	u_o [V]	Observații
0	0	
-0,5	-5	
+0,5	+5	
+1	+10	
-2	-13	AO saturat

Primele patru cazuri corespund funcționării liniare și au mărimile egale cu cele din Exemplul 2.1, excepție făcând faptul că ieșirea nu mai este cu semn schimbat (ieșirea este în fază cu intrarea).

Pentru $u_{in} = -2V$, ieșirea se saturează, obținându-se $-13V$ (tensiunea negativă de saturație).

d) Pentru $R_L = 2k\Omega$ și $u_{in} = -1V$, condițiile de circuit se prezintă în fig.2.10, b.

Curentul de ieșire al AO se scrie:

$$i_o = i_L + i_{in} \quad (2.40)$$

unde

$$i_L = \frac{u_o}{R_L} = \frac{Au_{in}}{R_L} = \frac{10V}{2k\Omega} = 5mA \quad (2.41)$$

$$i_{in} = \frac{u_{in}}{R_1} = \frac{1V}{10k\Omega} = 0,1mA \quad (2.42)$$

și astfel, curentul total la ieșirea AO va avea valoarea:

$$i_o = 5 + 0,1 = 5,1mA \quad (2.43)$$

Pentru valoarea maximă a tensiunii de intrare pentru care AO mai lucrează liniar ($u_{in}=1,3V$), condițiile de circuit se prezintă în fig.2.10, c.

În acest caz AO furnizează un curent de ieșire cu amplitudinea $i_o=6,63\text{ mA}$.

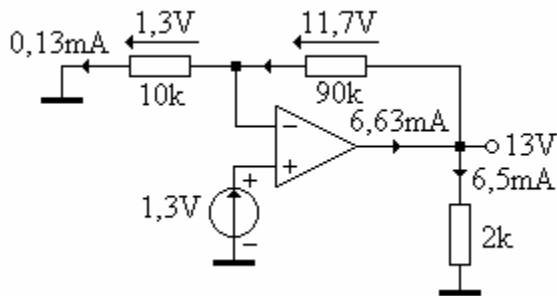


Fig. 2.10, c. Circuitul utilizat pentru determinarea curentului de ieșire al AO, dacă $U_i=1,3V$

2.5 Considerații privind alegerea valorii rezistoarelor

Ambele configurații de bază realizate cu AO reprezintă exemple de surse de tensiune controlate în tensiune (STCU). În proiectarea unor astfel de circuite se pornește, de obicei, de la valoarea necesară a amplificării în buclă închisă, astfel încât pentru un nivel dat al semnalului de intrare să se obțină un semnal de ieșire nedistorsionat. Se presupune că s-au ales AO și tensiunile de alimentare astfel încât să se poată obține amplitudinea cerută pentru semnalul de ieșire. De exemplu, dacă alimentarea se face cu $\pm 15V$ atunci ne putem aștepta la un semnal maxim la ieșire de $\pm 13V$. Dacă presupunem că semnalul de intrare are amplitudinea de $\pm 200mV$ iar circuitul are amplificarea în buclă închisă $A=100$ ar trebui să obținem un semnal de ieșire cu amplitudinea de $\pm 0,2 \times 100 = \pm 20V$. Dacă alimentarea este cea uzuală de $\pm 15V$, utilizatorul va fi profund dezamăgit deoarece semnalul de ieșire va fi distorsionat și limitat la $\pm 13V$. În astfel de situații se crește valoarea tensiunii de alimentare a AO, iar dacă amplificatorul ales nu suportă mărirea tensiunii de alimentare, se schimbă cu un alt tip care poate lucra la o tensiune de alimentare mai mare.

a) Amplificarea în buclă închisă pentru ambele configurații depinde de raportul de rezistențe R_2/R_1 . Dacă se cere, de exemplu, ca acest raport să fie $R_2/R_1=10$, există o mulțime de combinații ale rezistențelor R_1 și R_2 care dau raportul 10. Se pune firesc întrebarea: care este raportul bun? Ca răspuns, se fac câteva comentarii cu caracter general:

- dacă valorile de rezistențe sunt prea mici, gradul de încărcare al AO și/sau al sursei de semnal poate deveni excesiv de mare și se ajunge la o funcționare neliniară (sau chiar mai rău);
- în contrast, dacă valorile de rezistențe sunt prea mari, crește zgomotul termic și apare la ieșire o tensiune de decalaj din cauza curenților de polarizare a intrărilor AO.

Astfel, din considerente practice se recomandă ca domeniul rezonabil de variație a valorilor de rezistențe, pentru majoritatea AO, să fie în limita $1k\Omega \div 100k\Omega$, cu cele mai multe valori în domeniul $10k\Omega \div 100k\Omega$. Se pot întâlni însă și excepții, ceea ce s-a prezentat având caracter orientativ.

b) Deoarece amplificarea în buclă închisă depinde de un raport de rezistențe, poate apare următoarea întrebare: se poate crește oricât acest raport pentru a se obține amplificări cât mai mari? Răspunsul este NU, motivele se vor înțelege mai târziu, dar iată câteva observații:

- pentru un circuit dat, cu cât valoarea amplificării în buclă închisă, A , se apropie de cea a amplificării în buclă deschisă, scade precizia cu care se determină A ;
- banda de frecvență a răspunsului în buclă închisă scade pe măsură ce A crește.

Din aceste motive, valorile amplificării în buclă închisă se aleg mult mai mici decât cele ale amplificării în buclă deschisă.

c) O altă problemă o constituie impedanța de intrare a circuitului. La configurația inversoare această impedanță este egală cu R_1 , astfel că trebuie luat în considerare eventualul efect de încărcare pe care această rezistență îl poate exercita asupra sursei de semnal. La configurația neinversoare, ideal, impedanța de intrare este infinită și nu apar fenomene de încărcare a sursei de semnal.

d) După proiectarea circuitului se verifică dacă valoarea curentului de ieșire a AO nu depășește valoarea maximă admisibilă pentru tipul de AO folosit, așa cum s-a procedat în exemplele 2.1 și 2.2.

În concluzie într-o proiectare „simplificată” a unui amplificator de semnal mic realizat cu AO trebuie să țină seama de următoarele:

1. Se verifică dacă în funcție de valorile tensiunilor de alimentare, domeniul dinamic al AO ales este suficient pentru a se obține nivelul necesar al semnalului de ieșire.
2. Ori de câte ori este posibil, valorile de rezistențe se aleg în domeniul $1\text{k}\Omega$ (uzual $10\text{k}\Omega$) ÷ $100\text{k}\Omega$.
3. Amplificarea în buclă închisă se limitează la valori mult mai mici decât amplificarea în buclă deschisă. Tipic, valoarea amplificării în buclă închisă se menține sub valoarea **100**.
4. Pentru cazul cel mai defavorabil se verifică dacă valoarea maximă a curentului de ieșire mai permite funcționarea liniară a AO.

Dacă în serie cu intrarea neinversoare se conectează rezistența de compensare a curenților de polarizare a intrărilor AO, valoarea acesteia trebuie să reprezinte rezultatul conectării în paralel a rezistențelor R_1 și R_2 . Problema se va detalia mai târziu. Pe moment este util de reținut că *este bine ca cele două intrări ale AO să “vadă” spre masă rezistențe de valori egale*. De aici derivă condiția ca rezistența de compensare să reprezinte, ca valoare, $R_1 \parallel R_2$.

Exemplul 2.3. Utilizând rezistoare cu toleranța de $\pm 5\%$ să se proiecteze un amplificator inversor STCU care să aibă amplificarea egală cu -10 . Pentru a nu se încărca sursa de semnal, se impune ca impedanța de intrare a montajului să nu fie mai mică de $10\text{k}\Omega$. Nivelul semnalului se presupune suficient de mare pentru ca zgomotul termic al rezistoarelor și curenții de polarizare a intrărilor AO să nu constituie o problemă, situație în care valorile de rezistențe pot fi de maxim $500\text{k}\Omega$.

Rezolvare: Amplificarea cerută presupune $R_2/R_1=10$ și există mai multe valori standard de rezistențe care satisfac acest raport (Anexa 1).

Deoarece valoarea minimă a impedanței de intrare este de $10\text{k}\Omega$, valoarea rezistenței R_1 nu poate fi mai mică de $10\text{k}\Omega$. Valorile cele mai mici de rezistență care satisfac condițiile cerute sunt $R_1=10\text{k}\Omega$ și $R_2=100\text{k}\Omega$. Valorile maxime care răspund la constrângerile date sunt $R_1=47\text{k}\Omega$ și $R_2=470\text{k}\Omega$. Următoarele valori standard ar face ca R_2 să depășească valoarea maximă impusă de $500\text{k}\Omega$.

Cu o bună aproximație se poate alege setul de valori medii $R_1=22\text{k}\Omega$ și $R_2=220\text{k}\Omega$. Pentru rezistența de compensare a influenței curenților de polarizare a intrărilor AO rezultă valoarea:

$$R = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 20\text{k}\Omega \quad (2.44)$$

și se află între valorile standardizate și cu toleranța de 5% .

Utilizând rezistențe cu toleranța de 5% este posibil ca amplificarea reală să difere de cea cerută. Dacă se impune ca amplificarea să fie precisă există două posibilități:

1. să se utilizeze rezistențe cu toleranță mai mică (de exemplu 1%);
2. să se utilizeze combinații de rezistențe fixe și rezistențe ajustabile, valoarea exactă a amplificării stabilindu-se după efectuarea reglajelor. Pentru exemplul tratat, se poate înlocui R_2 cu o rezistență fixă legată în serie cu un potențiometru semireglabil.

Exemplul 2.4. Se presupune că un proiectant începător trebuie să proiecteze un amplificator la ieșirea căruia semnalul să aibă amplitudinea de 1V . Semnalul se preia de la un traductor care furnizează în gol o valoare de vârf de 50mV și are impedanța internă de $50\text{k}\Omega$. Nu contează dacă semnalul este inversat sau nu. Proiectantul nu cunoaște teorema lui Thévenin și realizează circuitul din fig. 2.11:

Să se determine valoarea reală a tensiunii de ieșire furnizată de acest circuit.

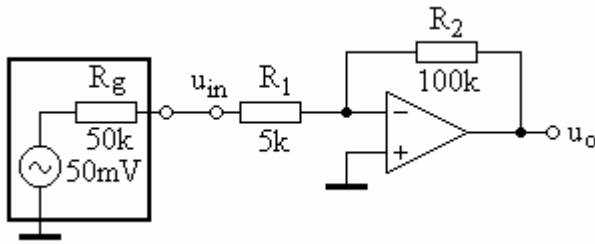


Fig. 2.11. Circuitul pentru exemplul 2.4

Rezolvare: amplificarea de tensiune în buclă închisă a circuitului inversor din fig.2.11 este:

$$A = \frac{u_o}{u_{in}} = -\frac{100}{5} = -20 \quad (2.45)$$

ceea ce înseamnă că la ieșire s-ar obține 1V dacă la intrare s-ar aplica $u_{in}=50\text{mV}$. Dar proiectantul nu a ținut seama de rezistența internă de $50\text{k}\Omega$ a sursei de semnal. Valoarea relativ mică a rezistenței de intrare a montajului inversor va încărca excesiv sursa de semnal. Tensiunea de intrare u_{in} nu va fi de 50mV ci mult mai mică, din cauza divizorului de tensiune format din rezistoarele R_g și R_1 , astfel că amplificarea reală va fi:

$$A_{real} = -\frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot \frac{R_2}{R_1} = -\frac{100k}{5k + 50k} = -1,818 \quad (2.46)$$

Problema nu se poate rezolva decât printr-o nouă proiectare în care rezistența sursei se consideră ca parte componentă a rezistenței totale de intrare a circuitului iar pentru R_2 se alege acea valoare care asigură amplificarea cerută.

O soluție și mai bună este să se utilizeze un amplificator neinversor la care efectul de încărcare al sursei de semnal este minim.

Exemplul 2.5. Se presupune că într-o anumită aplicație se cere un amplificator inversor cu amplificarea reglabilă între -2 și -12. Dacă se dispune de un potențiomtru cu valoarea de $100\text{k}\Omega$, să se proiecteze circuitul care îndeplinește condiția cerută.

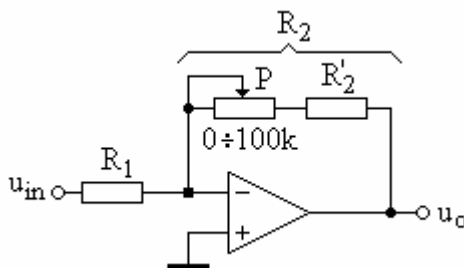


Fig. 2.12. Circuitul pentru exemplul 2.5

Rezolvare: Pentru a obține un amplificator inversor cu amplificare reglabilă, fie R_1 fie R_2 trebuie să fie reglabile (parțial sau în întregime). Dacă se alege rezistența R_1 reglabilă, atunci impedanța de intrare se modifică la schimbarea amplificării. Din acest motiv este mai corect să se aleagă rezistența R_2 reglabilă.

Rezultă astfel schema din fig.2.12, unde R_2 este format din potențiomtrul P și rezistența fixă R'_2 , adică $R_2 = P + R'_2$.

În general amplificarea este $A=-R_2/R_1$ și se modifică odată cu R_2 . Când cursorul potențiomtrului se află în capătul din dreapta, atunci $R_2 = R'_2$. Această situație va corespunde la o amplificare $A=-2$.

Când cursorul potențiomtrului se află în capătul celălalt (în stânga), atunci $R_2 = R'_2 + 100\text{k}\Omega$ și amplificarea va fi $A=-12$.

Se pot scrie astfel următoarele relații:

$$\frac{R_2'}{R_1} = 2 \quad (2.47)$$

$$\frac{R_2' + 10^5}{R_1} = 12 \quad (2.48)$$

soluția acestui sistem fiind: $R_1=10\text{k}\Omega$ și $R_2'=20\text{k}\Omega$.