

5. AMPLIFICATOARE OPERAȚIONALE

5.1. Generalități

Cele mai răspândite circuite integrate analogice liniare în aparatura electronică sunt amplificatoarele operaționale (acronimul AO sau OA = Operational Amplifier) și stabilizatoarele de tensiune continuă. Amplificatorul operațional este un circuit versatil, ceea ce a determinat utilizarea sa în fiecare domeniu al electronicii: prelucrarea semnalelor, reglatoarele de tensiune, filtre active, generatoare de funcții, instrumentație, controlul proceselor, convertoare analog-digitale și digital-analogice etc. AO este un amplificator integrat, cu o amplificare de tensiune în buclă deschisă deosebit de mare; această performanță scade foarte mult și devine predictibilă în condițiile închiderii unei bucle de reacție negativă. De cele mai multe ori, AO se folosește prevăzută cu o reacție negativă, condiții în care circuitul rezultat este mai stabil, iar performanțele lui depind practic numai de elementele circuitului de reacție, nu și de dispozitivele active și componentele pasive conținute de circuitul integrat.

Amplificatorul operațional este un amplificator de tensiune, de c.c., cu o structură complexă, cu intrare simetrică (două borne calde de intrare) și ieșire asimetrică (o singură bornă caldă de ieșire), destinat lucrului cu reacție externă. Borna de intrare, notată cu semnul(-), se numește *bornă inversoare*, iar aceea notată cu semnul (+) este denumită *bornă neinversoare*. Circuitul poate fi alimentat

- simetric, de la două surse de tensiune, una pozitivă (+V) și cealaltă negativă (-V),
- asimetric, de la o singură sursă de tensiune pozitivă (+V).

Două simboluri folosite pentru AO (alimentat simetric, respectiv asimetric) sunt date în fig. 5.1.1.a.

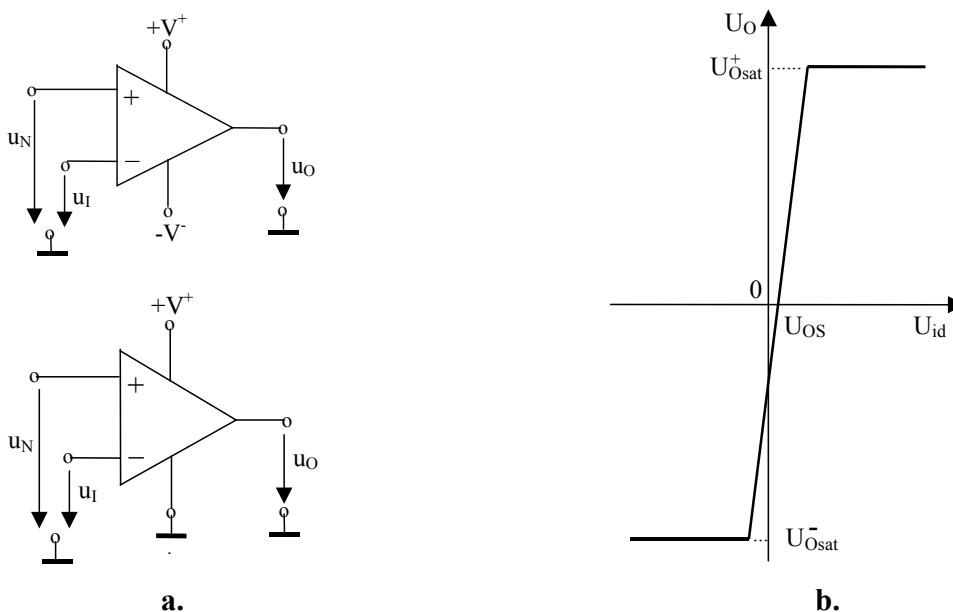


Fig. 5.1.1. Amplificatoare operaționale: a. Simboluri; b. Caracteristica statică de transfer

La un AO se definesc:

- tensiunea diferențială de intrare (u_{id}) și tensiunea comună de intrare (u_{ic}),

$$u_{id} = u_N - u_I, \quad u_{ic} = \frac{u_I + u_N}{2}; \quad (5.1.1)$$

➤ amplificarea de tensiune diferențială (A_{Ud}) și amplificarea de tensiune de mod comun (A_{Uc}),

$$A_{Ud} = \left. \frac{u_0}{u_{id}} \right|_{u_{ic}=0}, \quad A_{Uc} = \left. \frac{u_0}{u_{ic}} \right|_{u_{id}=0}. \quad (5.1.2)$$

a) Parametrii AO

Un AO este caracterizat de mai mulți parametri statici și dinamici, precizați în foile de catalog ale circuitului integrat. În cele ce urmează, vor fi definiți cei mai importanți dintre acești parametri.

Parametri statici

- *Tensiunea de offset la intrare* este tensiunea diferențială continuă care trebuie aplicată la intrare pentru anularea tensiunii de ieșire,

$$U_{OS} = U_{id} \Big|_{U_O=0V} \quad (5.1.3)$$

și are valori cuprinse între 0,2 și 40mV. Caracteristica statică de transfer a AO, din fig.5.1.1.b, evidențiază acest parametru static.

- *Curentul de offset la intrare* este definit ca diferența celor doi curenți de polarizare ai intrărilor, pentru care tensiunea de ieșire este nulă,

$$I_{OS} = (I_{B1} - I_{B2}) \Big|_{U_O=0V} \quad (5.1.4)$$

și are valori cuprinse între 0,05pA și 100 nA.

- *Curentul de polarizare la intrare* se definește ca valoarea medie a celor doi curenți de polarizare de la intrare, corespunzătoare unei tensiuni nule de ieșire,

$$I_B = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2}) \Big|_{U_O=0} \quad (5.1.5)$$

și are valori tipice cuprinse între 1pA și 100 nA.

Parametri dinamici

- *Amplificarea de tensiune diferențială, în buclă deschisă, cu ieșirea în gol* (A_{Ud0} sau A_0), reprezintă raportul dintre variațiile de semnal mic ale tensiunii de ieșire și tensiunii diferențiale de intrare, la frecvențe joase și medii,

$$A_{Ud0} = A_0 = A_{Ud} \Big|_{R_L \rightarrow \infty}, \quad (5.1.6)$$

cu valori cuprinse între 10^4 și 10^{14} . Dacă se consideră, pe rând, câte o bornă de intrare conectată la masă și se calculează u_0 , se justifică denumirile celor două borne de intrare.

Amplificarea A_0 reprezintă panta segmentului de dreaptă din jurul originii caracteristicii statice de transfer (fig. 5.1.1.b), ce corespunde unei dependențe liniare intrare-ieșire; circuitul funcționează liniar numai pentru valori foarte mici (sub 1mV) ale U_{id} . În cazurile în care U_N și U_I sunt mult mai mari decât 1mV, se poate considera că bornele inversoare și neinversoare sunt la același potențial. Amplificarea A_{Ud0} scade la frecvențe înalte, din cauza efectelor capacităților joncțiunilor.

- *Banda de amplificare unitară* (f_t) este definită ca frecvența la care câștigul în buclă deschisă se anulează.
- *Frecvența limită de sus* (f_{-3dB}) și *produsul amplificare - bandă* (P) sunt definite ca la amplificatorul de semnal mic (Capitolul 2.5).

- *Factorul de rejecție a modului comun* este definit ca raportul dintre A_{Ud} și A_{Uc} , calculate la frecvențe joase și medii, raport exprimat în decibeli,

$$CMRR = 20 \cdot \lg \left| \frac{A_{Ud0}}{A_{Uc0}} \right|; \quad (5.1.7)$$

valorile tipice sunt în domeniul $70 \div 160$ dB.

- *Rezistența de intrare sau rezistența diferențială de intrare* (R_{Id}) este definită ca raportul dintre variația tensiunii diferențiale de intrare și variația corepunzătoare a curentului de intrare, la frecvențe joase și medii; valorile tipice sunt cuprinse între $100k\Omega$ și $70M\Omega$.
- *Rezistența de ieșire* (R_O) se definește ca raportul dintre variația tensiunii de ieșire și variația corespunzătoare a curentului de ieșire, pentru semnal diferențial de intrare nul; valorile tipice sunt cuprinse între $0,1 \Omega$ și $10^3 \Omega$.
- *Viteza maximă de variație a tensiunii de ieșire*, SR (Slew-Rate), reprezintă un parametru important al AO funcționând la frecvențe înalte:

$$SR = \left(\frac{du_O}{dt} \right)_{\max}, \quad (5.1.8)$$

cu valori în domeniul $0,1 \div 1.500$ V/ μ s.

b) Modelul amplificatorului operațional ideal

Parametrii statici și dinamici ai unui AO au valori mai mici sau mai mari, în funcție de structura internă și tehnologia de realizare a circuitului. În modelul AO ideal (frecvent folosit în analizele simplificate ale aplicațiilor), parametrii U_{OS} , I_{OS} , I_B , R_O au valori nule, în timp ce parametrii A_0 , R_{Id} , $CMRR$, f_{-3dB} , P , f_t , SR sunt infiniți. Modelul AO ideal este desenat în fig. 5.1.2. Cele două simplificări importante, folosite ulterior în analiza circuitelor cu AO, sunt următoarele:

- curenții prin cele două borne de intrare ale AO sunt nuli;
- cele două borne de intrare au același potențial electric, dacă AO funcționează în zona liniară a caracteristicii statice de transfer.

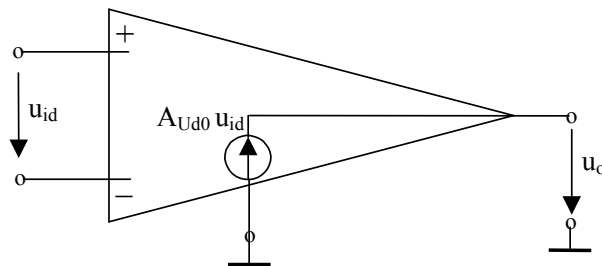


Fig. 5.1.2. Modelul AO ideal

Amplificatoarele operaționale pot fi împărțite în două mari categorii;

- AO de uz general, caracterizate prin preț de cost scăzut și performanțe moderate; un circuit integrat poate conține unul, două sau patru AO complet independente într-o capsulă;
- AO care, la cel puțin o specificație de catalog, se apropie de AO ideal, mult mai bine decât circuitele de uz general; îmbunătățirea performanțelor se obține prin creșterea prețului de cost.

Perfecționarea proceselor de fabricație a condus la obținerea unor circuite care aproximează foarte bine proprietățile dispozitivului ideal.

Pentru marea majoritate a AO, structura corespunde unui amplificator de c.c., cu mai multe etaje de amplificare: un etaj diferențial de intrare, urmat de un etaj diferențial cu ieșire asimetrică, etaje intermediare (pentru deplasarea nivelului de c.c. și realizarea valorii necesare a amplificării) și etajul de ieșire (prevăzut cu circuit de limitare a curentului de ieșire).

5.2. Aplicații ale amplificatoarelor operaționale

5.2.1. Amplificatorul inversor

Schema de principiu a unui amplificator liniar de tensiune, de c.c., de tip inversor este prezentată în fig. 5.2.1 (mărimile electrice au fost notate ca amplitudini complexe). La intrarea circuitului s-a conectat un generator de tensiune (u_s), iar la ieșire – un rezistor (R_L). AO are prevăzută o buclă de reacție negativă, asigurată prin intermediul rezistorului R_2 . Considerând AO ideal (cele două borne de intrare sunt la același potențial și curenții prin aceste borne sunt nuli), se constată că borna neinversoare este conectată la masa montajului și transmite potențialul 0V și intrării inversoare, care devine o “masă virtuală”.

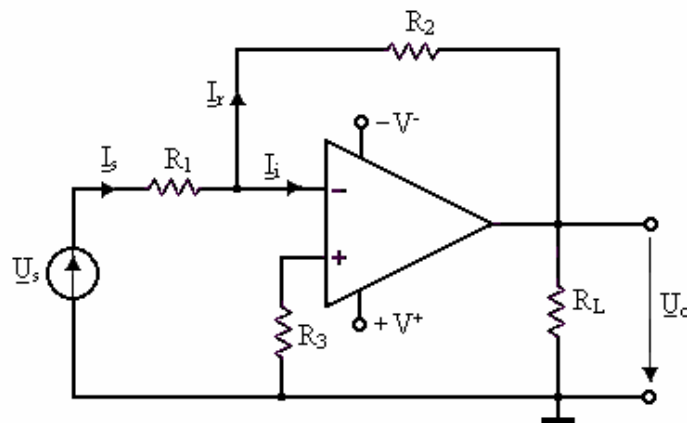


Fig. 5.2.1. Amplificator de tensiune, de tip inversor

Din egalitatea curenților i_s și i_r ,

$$\frac{u_s}{R_1} = -\frac{u_o}{R_2}, \quad (5.2.1)$$

rezultă că amplificarea de tensiune, în banda de trecere, este fixată de raportul rezistențelor rezistorilor conectați pe calea de reacție (R_2) și la intrarea AO (R_1),

$$A_{U0} = \frac{u_o}{u_s} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (5.2.2)$$

Deci, amplificarea este predictibilă și independentă de parametrii și caracteristicile AO. Semnul minus, din expresia amplificării, arată că ieșirea este defazată cu 180° față de intrare (amplificator de tip inversor).

5.2.2. Amplificatorul neinversor

Schema de principiu a unui amplificator liniar de tensiune, de c.c., de tip neinversor este prezentată în fig. 5.2.2. Amplificarea de tensiune în banda de trecere este stabilită de rezistențele rezistorilor R_1 și R_2 . Folosind conceptul de AO ideal, din egalitatea curenților prin cei doi rezistori,

$$\frac{u_o - u_s}{R_2} = \frac{u_s}{R_1}, \quad (5.2.3)$$

se obține amplificarea de tensiune în bandă,

$$A_{U0} = \frac{u_o}{u_s} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (5.2.4)$$

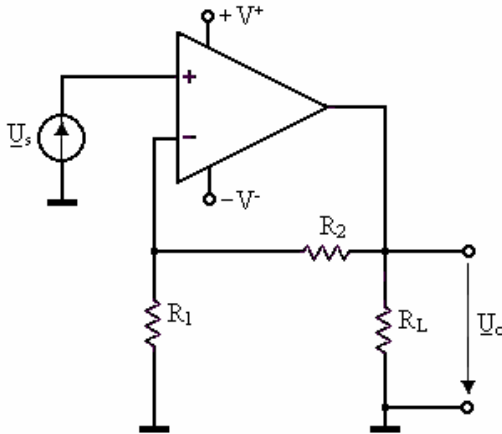


Fig. 5.2.2. Amplificator de tensiune, de tip neinvertor

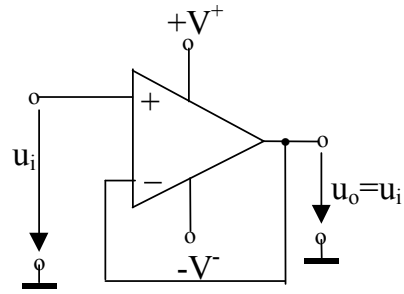


Fig. 5.2.3. Repetor de tensiune

În cazul eliminării rezistorului R_1 din circuit ($R_1 = \infty$), amplificarea devine unitară, circuitul fiind numit *repetor de tensiune*, pentru că tensiunea de ieșire repetă (amplitudine și fază) tensiunea aplicată de la generator. Rezultatul se menține și în cazul eliminării rezistorului R_2 (fig. 5.2.3).

Amplificatorul neinvertor se apropie cel mai mult de un amplificator ideal de tensiune: $R_1 \rightarrow \infty$ și $R_o \cong 0$. Din aceste motive, repetorul de tensiune cu AO este folosit adesea ca adaptor de impedanță pentru transfer maxim în tensiune.

5.2.3. Amplificatorul sumator

Un amplificator invertor sau neinvertor cu mai multe intrări efectuează funcția de sumare ponderată a tensiunilor aplicate la intrări. Circuitul din fig. 5.2.4 este un sumator de tip invertor.

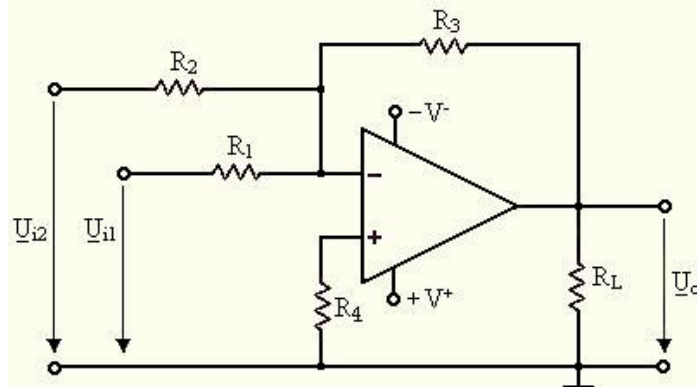


Fig. 5.2.4. Sumator de tip invertor

Curenții care intră în nodul bornei inversoare (masă virtuală) sunt cei care circulă prin R_1 , R_2 și R_3 :

$$i_1 = \frac{u_{i1}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{u_{i2}}{R_2}, \quad i_3 = \frac{u_o}{R_3}. \quad (5.2.5)$$

Aplicând teorema I a lui Kirchhoff în nodul respectiv ($i_1 + i_2 + i_3 = 0$), se obține

$$u_o = -\left(\frac{R_3}{R_1}u_{i1} + \frac{R_3}{R_2}u_{i2}\right). \quad (5.2.6)$$

Pentru rezistențe egale ($R_1 = R_2 = R_3$), circuitul furnizează la ieșire suma tensiunilor de intrare, cu semnul minus.

5.2.4. Amplificatorul diferențial

Amplificatorul cu configurația din fig. 5.2.5 poate amplifica diferența celor două tensiuni de intrare, $u_{id12} = u_{i1} - u_{i2}$. Acest amplificator cu două intrări este o combinație de două amplificatoare cu câte o intrare: un amplificator neinversor pentru tensiunea u_{i1} , divizată cu factorul $R_2/(R_1+R_2)$, și un amplificator inversor pentru tensiunea u_{i2} . Aplicând principiul superpoziției, se obține

$$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_{i1} - \frac{R_2}{R_1} \cdot u_{i2} = \frac{R_2}{R_1} (u_{i1} - u_{i2}) = \frac{R_2}{R_1} \cdot u_{id12}. \quad (5.2.7)$$

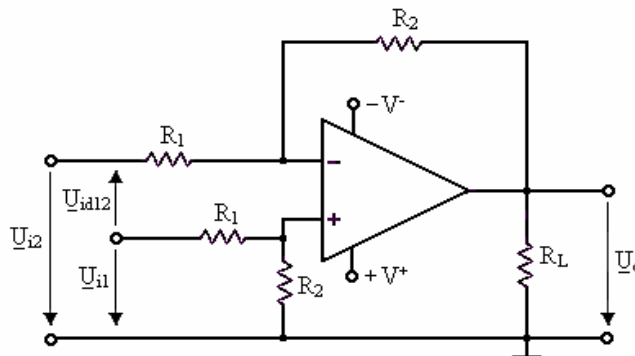


Fig. 5.2.5. Amplificator diferențial

Rezultatul (5.2.7) arată că amplificatorul diferențial multiplică diferența a două tensiuni de intrare, cu o constantă pozitivă.

5.2.5. Comparatorul de tensiuni cu histerezis

Comparatorul cu histerezis (numit și *trigger Schmitt*) este un element de memorare, realizat ca un sistem cu reacție pozitivă. O intrare a AO este utilizată pentru aplicarea semnalului, cealaltă intrare fiind menținută la un potențial constant. Schema de principiu a unui *comparator inversor cu histerezis* este reprezentată în fig. 5.2.6.a; AO este presupus ideal. În regim staționar, ieșirea comparatorului este fie în starea U_{OH} (High), fie în starea U_{OL} (Low), valori care corespund nivelurilor de saturație ale ieșirii AO. Pentru alimentare simetrică a comparatorului ($V^+ = V^-$), $U_{OH} = -U_{OL}$. Într-un astfel de sistem, instabilitatea se manifestă pe durata tranzițiilor (de la U_{OH} la U_{OL} , respectiv de la U_{OL} la U_{OH}), care se produc la valori date ale mărimii de intrare, numite praguri: U_{PH} și U_{PL} . Caracteristica de transfer a circuitului este dată în fig. 5.2.6.b.

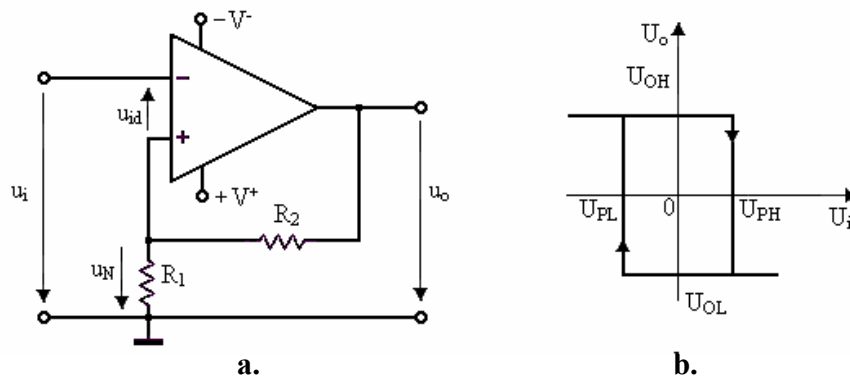


Fig. 5.2.6. Comparator inversor cu histerezis: a. Schema de principiu; b. Caracteristica statică de transfer

Tranzițiile se produc atunci când punctul de funcționare al comparatorului intră în zona de amplificare a caracteristicii de transfer, adică pentru $U_{id} = 0$:

$$U_{id} = U_N - U_I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_O - U_I = 0. \quad (5.2.8)$$

În relația (5.2.8), U_O este U_{OH} sau U_{OL} , în funcție de starea din care se produce tranziția. Valorile tensiunii de intrare la care ieșirea comută sunt cele două praguri de basculare U_{PH} și U_{PL} :

$$U_{PH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{OH}, \quad U_{PL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{OL}. \quad (5.2.9)$$

Dacă $U_{OH} = -U_{OL}$, cele două praguri de basculare vor fi simetrice.

5.2.6. Integratorul

Circuitul din fig. 5.2.7 este capabil să integreze, în raport cu timpul, o tensiune u_i , variabilă în timp. În practică, acest circuit se folosește ca mijloc de măsurare, deoarece ieșirea circuitului este proporțională cu aria cuprinsă de graficul tensiunii de intrare pe un interval dat de timp.

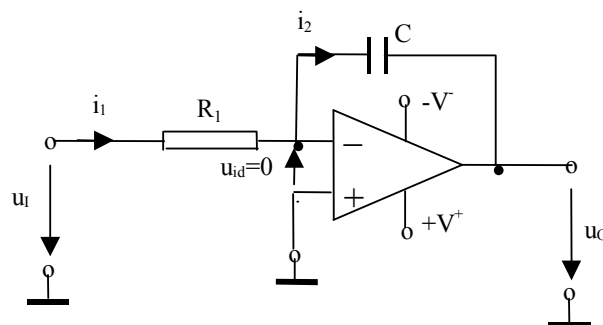


Fig. 5.2.7. Integratorul

Considerând AO ideal (curenți de intrare nuli și $u_{id} = 0$),

$$i_1 = i_2, \quad i_1 = \frac{u_i}{R_1}, \quad i_2 = -C \frac{du_o}{dt}. \quad (5.2.10)$$

Tensiunea de ieșire a circuitului are expresia

$$u_O(t) = u_C(0) - \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t u_I(\tau) \cdot d\tau, \quad (5.2.11)$$

unde $T_i = C \cdot R_1$ este constanta de timp de integrare, iar $u_C(0)$ este tensiunea la bornele condensatorului la $t=0$ (în condiții inițiale).

Diagrama modul-frecvență a funcției de transfer arată că circuitul este instabil (modulul funcției de transfer crește nelimitat) la frecvențe joase; acest dezavantaj poate fi eliminat prin conectarea unui rezistor pe calea de reacție negativă, în paralel cu condensatorul C . Procedându-se astfel, modulul amplificării la frecvențe joase va fi limitat superior la valoarea R_2 / R_1 .

5.2.7. Derivatorul

Circuitul care realizează operația de derivare se obține din circuitul integrator, prin schimbarea locului între rezistor și condensator (fig. 5.2.8). AO se consideră ideal.

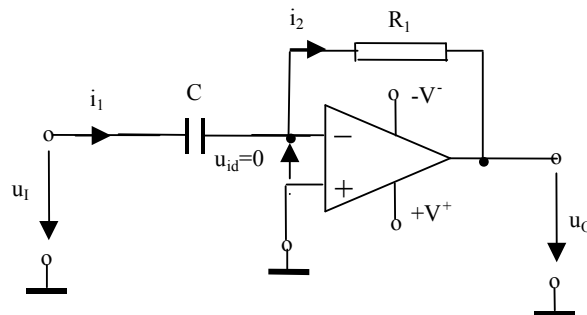


Fig. 5.2.8. Derivatorul

În condiții inițiale nule ($u_C(0) = 0$), se obține

$$u_O(t) = -i_2 R_1 = -R_1 C \frac{du_I(t)}{dt} = -T_d \frac{du_I(t)}{dt}. \quad (5.2.12)$$

Tensiunea de ieșire a circuitului este egală cu derivata tensiunii de intrare, în raport cu timpul (panta graficului), multiplicată cu o constantă ($-T_d$). Din diagrama modul-frecvență a funcției de transfer, se constată că circuitul derivator este instabil la frecvențe înalte. Pentru reducerea amplificării la frecvențe înalte, se conectează un rezistor R_2 în serie cu condensatorul. În aceste condiții, la pulsații mai mari decât $\frac{1}{R_2 C}$, modulul amplificării circuitului se limitează la valoarea R_1 / R_2 ; circuitul efectuează

operația de derivare pentru semnale de intrare cu $f_{i \max} < \frac{1}{2\pi R_2 C}$.

5.2.8. Amplificatorul logaritmic

Un tip special de amplificator nelinier îl reprezintă amplificatorul logaritmic care oferă la ieșire o tensiune proporțională cu logaritmul natural al tensiunii de intrare, de forma generală

$$u_O = K_1 \cdot \ln(K_2 \cdot u_I). \quad (5.2.13)$$

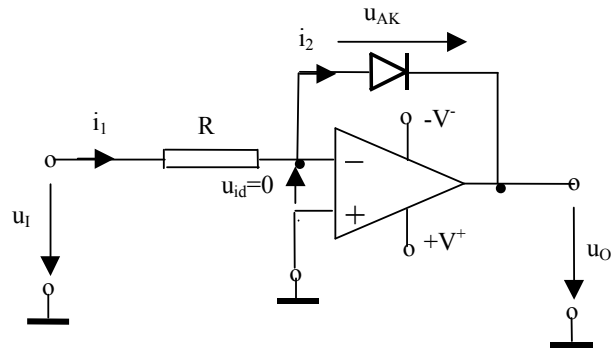


Fig. 5.2.9. Amplificatorul logaritmic

În configurația de bază, un amplificator logaritmic conține un AO, un rezistor R conectat la intrare și un tranzistor sau o diodă (fig. 5.2.9) pe calea de reacție. Considerând AO ideal, tensiunea de ieșire a circuitului este

$$u_O = -u_{AK} = -U_T \cdot \ln\left(\frac{i_2}{I_S}\right) = -U_T \cdot \ln\left(\frac{u_I}{R_1 \cdot I_S}\right). \quad (5.2.14)$$

Coeficienții K_1 și K_2 din relația (5.2.13) sunt puternic dependenți de temperatură. Pentru compensarea variației cu temperatura, se utilizează elemente neliniare de circuit, cu caracteristici dependente de temperatură (diode, rezistoare).

----- * -----