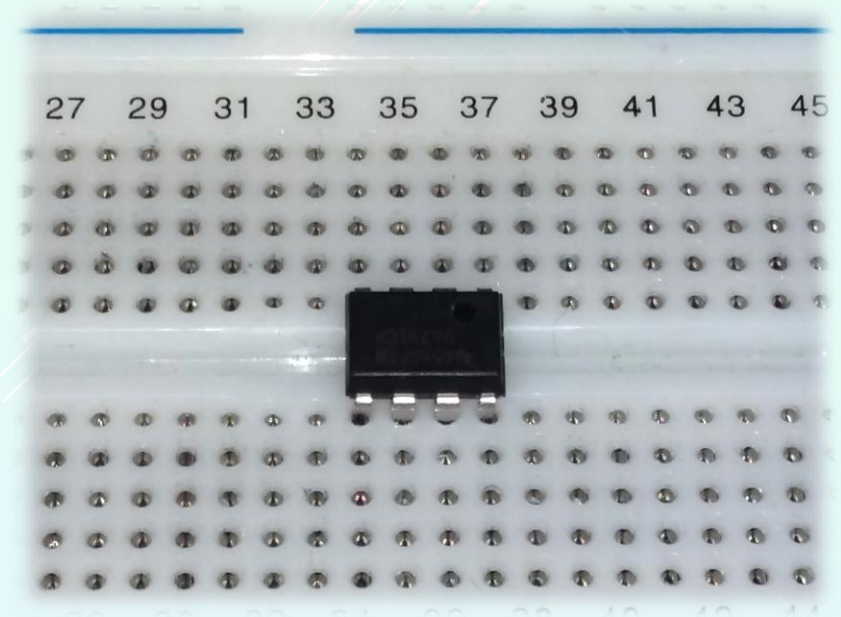




# Curs 9

## APLICAȚII CU AO



## CUPRINS

- Convertoare de domeniu de tensiune
- Circuitele de integrare și diferențiere – filtre active
- Redresoare de precizie monoalternanță și dublă alternanță
- Detector de vârf de precizie
- Amplificatoare cu cuplaj capacitiv
- Amplificatoare alimentate unipolar
- Amplificatoare logaritmice și exponențiale
- Circuite de înmulțire și împărțire
- Surse de curent

- Aplicații fundamentale ale AO cu reacție negativă: amplificatoare inversoare, neinversoare și diferențiale, sumatoare inversoare și neinversoare, etc.
- Alte aplicații, liniare și neliniare:
  - ☐ Convertoare de domeniu de tensiune
  - ☐ Circuitele de integrare și diferențiere – filtre active
  - ☐ Redresoare de precizie monoalternanță și dublă alternanță
  - ☐ Detector de vârf de precizie
  - ☐ Amplificatoare cu cuplaj capacitiv
  - ☐ Amplificatoare alimentate unipolar
  - ☐ Amplificatoare logaritmice și exponențiale
  - ☐ Circuite de înmulțire și împărțire
  - ☐ Surse de curenți

## Conversia domeniului de tensiune

$$v_{cd} \in [v_{cd_{\min}}; v_{cd_{\max}}] \longrightarrow v_O \in [v_{O_{\min}}; v_{O_{\max}}]$$

- Soluții posibile
  - Amplificator cu AO în configurația inversoare

$$v_{cd_{\min}} \longrightarrow v_{O_{\max}} \qquad v_{cd_{\max}} \longrightarrow v_{O_{\min}}$$

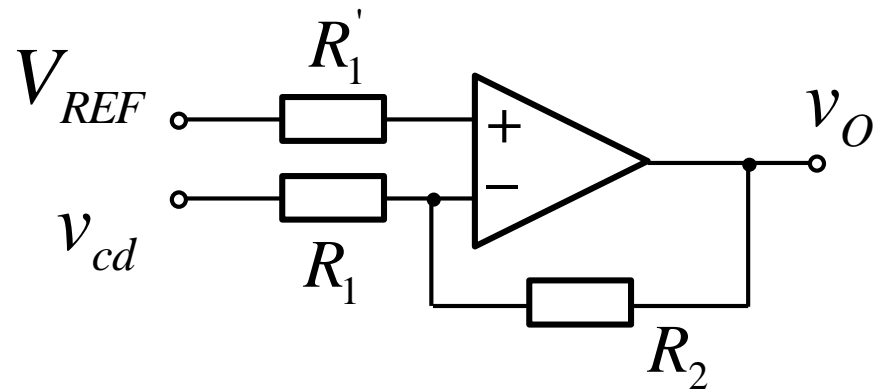
- Amplificator cu AO în configurația neinversoare

$$v_{cd_{\max}} \longrightarrow v_{O_{\max}} \qquad v_{cd_{\min}} \longrightarrow v_{O_{\min}}$$

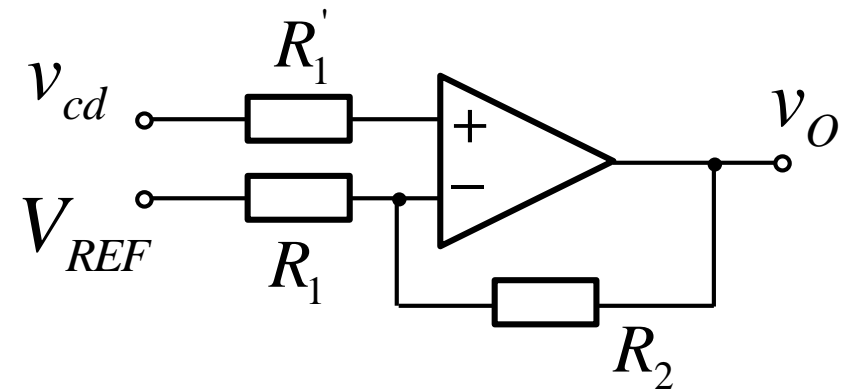
Exemplu

$$v_{cd} \in (2; 7)V \quad v_O \in (-1; 6)V$$

Circuit inversor



Circuit neinversor



# DE Convertoare de domeniu de tensiune

C9

Exemplu

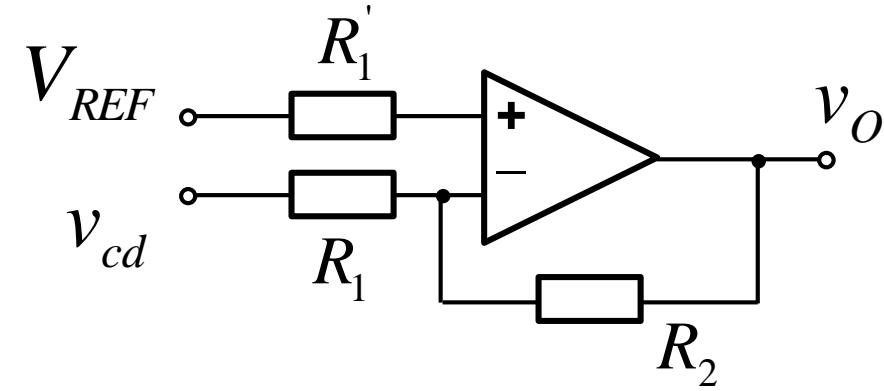
Circuit inversor

- valori rezistențe
- tensiune de referință

$$v_O = -\frac{R_2}{R_1} v_{cd} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{REF}$$

$$v_{O\max} = -\frac{R_2}{R_1} v_{cd\min} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{REF}$$

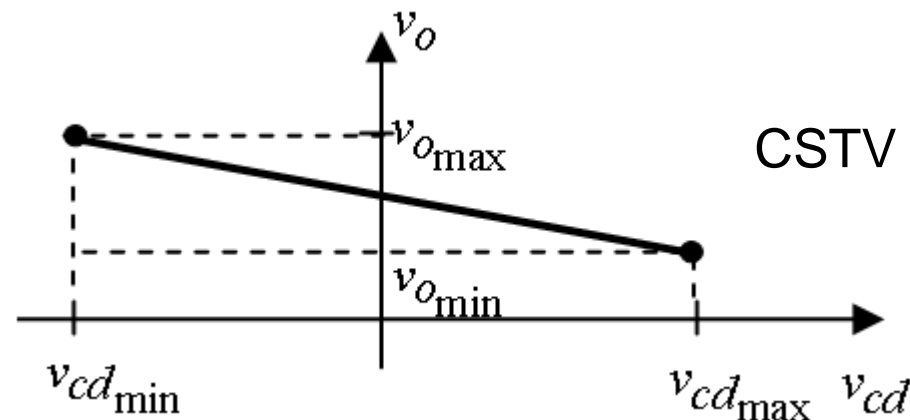
$$v_{O\min} = -\frac{R_2}{R_1} v_{cd\max} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{REF}$$



$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{v_{O\max} - v_{O\min}}{v_{cd\max} - v_{cd\min}}$$

$$R_1' = R_1 \parallel R_2$$

$$V_{REF} = \frac{v_{O\min} + \frac{R_2}{R_1} v_{cd\max}}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$



Exemplu numeric

$$v_{cd} \in (2; 7)\text{V} \qquad v_O \in (-1; 6)\text{V}$$

Proiectați circuitul inversor de conversie a domeniului de tensiune

## DE Convertoare de domeniu de tensiune

C9

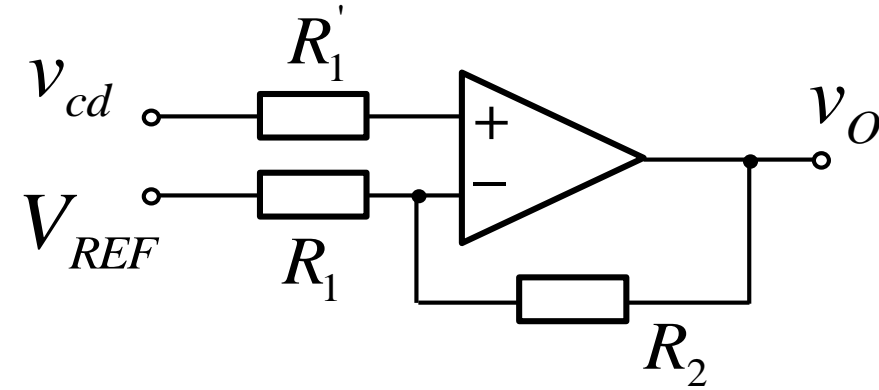
### Circuit neinversor

- valori rezistențe
- tensiune de referință

$$v_O = -\frac{R_2}{R_1} V_{REF} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{cd}$$

$$v_{O\max} = -\frac{R_2}{R_1} V_{REF} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{cd\max}$$

$$v_{O\min} = -\frac{R_2}{R_1} V_{REF} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{cd\min}$$



$$\frac{R_2}{R_1} = ?$$

$$R'_1 = R_1 \parallel R_2$$

$$V_{REF} = ?$$

CSTV ?



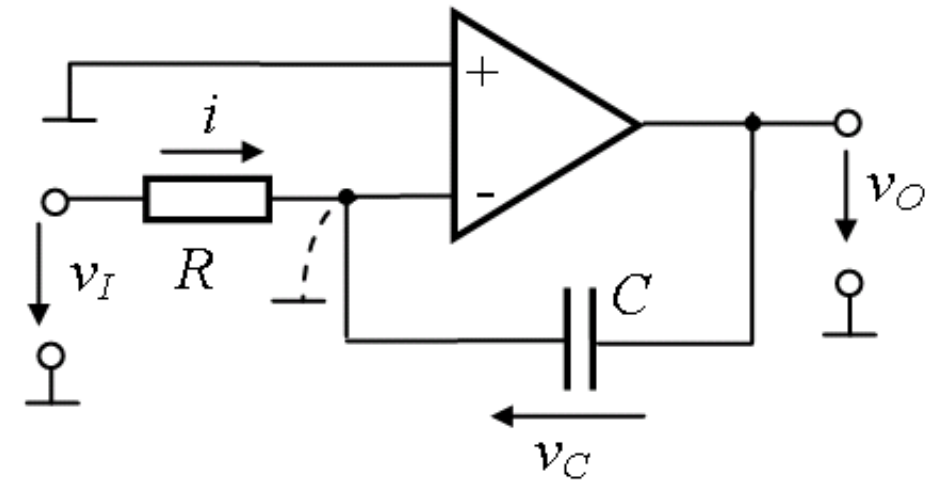
## Integrator

- Analiza în domeniul timp

$$i(t) = \frac{v_I(t)}{R} \quad Cdv_c = -idt$$

$$v_o(t) = v_c(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + v_c(0)$$

$$v_o(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{v_I(t)}{R} dt + v_c(0)$$



$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_I(t) dt + v_c(0)$$

$RC$  – constanta de integrare

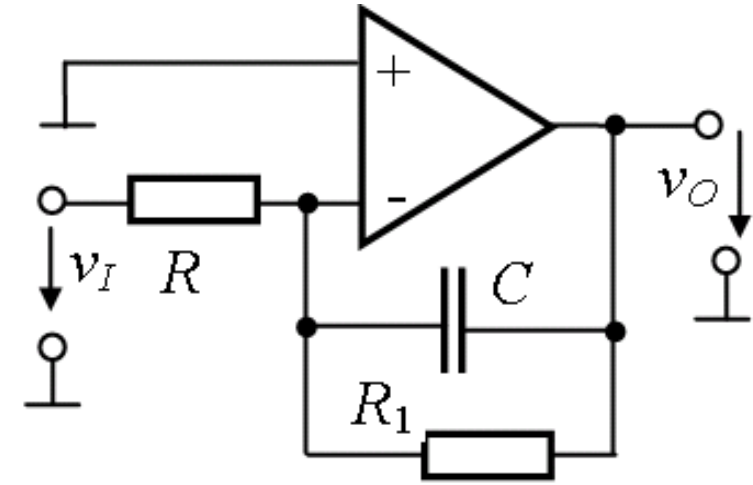
**Problema:** în cc AO se poate satura datorită tensiunii de dezechilibru și / sau curentului de polarizare, deoarece în cc impedanța condensatorului este infinit și AO nu mai are reacție negativă.

**Soluție:**      Introducerea unei căi de RN in cc

## DE Circuite de integrare și diferențiere – filtre active

C9

### Integrator cu RN în cc



$R_1$  suficient de mare, să poată fi neglijat față de impedanța echivalentă a condensatorului la frecvența de lucru

La frecvențe mici (cc),  $C$  este întrerupere  $\Rightarrow$  amplificator inversor

La frecvențe mari,  $C$  este scurtcircuit, RN totală,  $v_d=0$ ,  $v_-=0$ ,  $v_o=0 \Rightarrow$  FTJ

*Acesta este circuitul recomandat pentru utilizarea în practica cu rol de integrator (cu pierderi)*

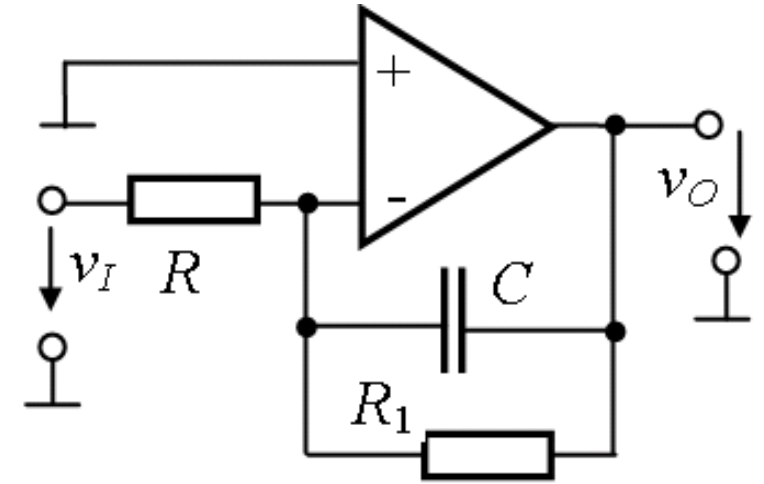
## DE Circuite de integrare și diferențiere – filtre active

C9

### Integrator cu RN în cc

- Analiza în domeniul frecvență

$$A_v(j\omega) = \frac{v_o(j\omega)}{v_I(j\omega)} = -\frac{Z_{ech}}{R} \quad Z_{ech} = R_1 \parallel \frac{1}{j\omega C} = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C}$$



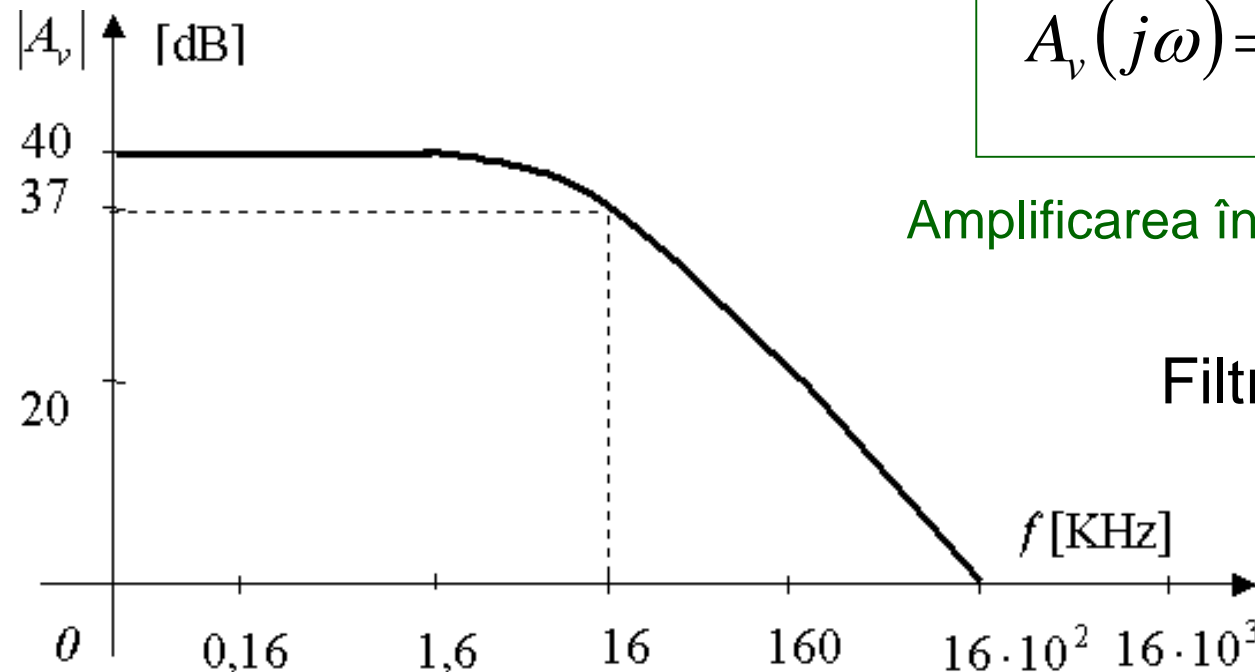
$$A_v(j\omega) = -\frac{R_1}{R} \frac{1}{1 + j\omega R_1 C}$$

Amplificarea în banda (inclusiv în cc)

Filtru activ trece jos

Exemplu:

$R = 1\text{K}\Omega$   
 $R_1 = 100\text{K}\Omega$   
 $C = 100\text{pF}$



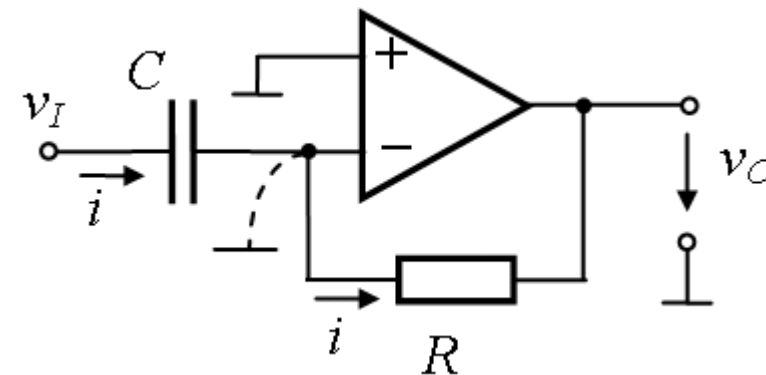
## DE Circuite de integrare și diferențiere – filtre active

C9

### Derivator

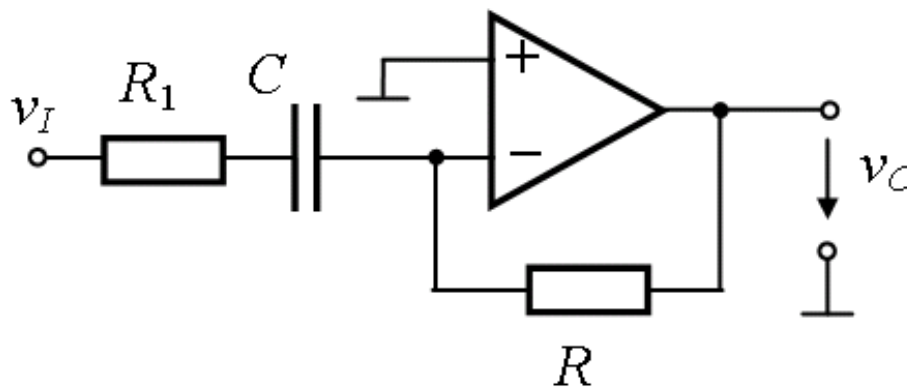
$$i(t) = C \frac{dv_I(t)}{dt} \quad v_O(t) = -Ri = -RC \frac{dv_I(t)}{dt}$$

$$A_v(j\omega) = \frac{v_O(j\omega)}{v_I(j\omega)} = \frac{R}{Z_C} = j\omega RC \quad |A_v(j\omega)| = \omega RC \quad \text{Filtru activ trece sus} \quad f_0 = \infty$$



Circuitul se poate comporta ca un “amplificator de zgomot” datorită derivării semnalului de intrare.

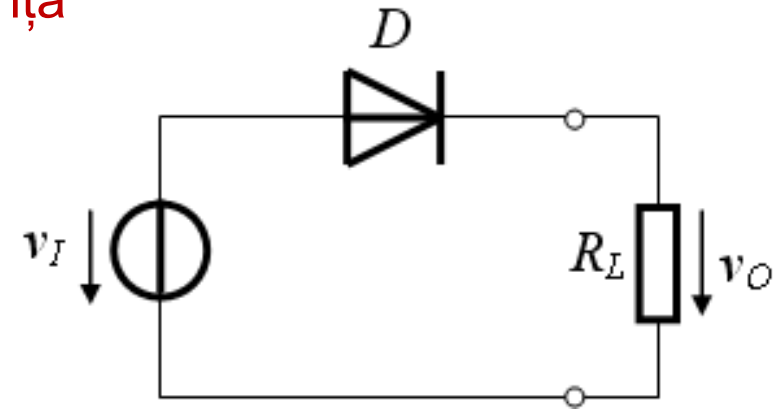
La utilizarea practică a derivatorului este necesară conectarea unei rezistențe de valoare scăzută, în serie cu condensatorul.



$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

### Redresor monoalternanță

- Nu poate redresa semnale mici
- Se pierde căderea de tensiune pe dioda în conducție

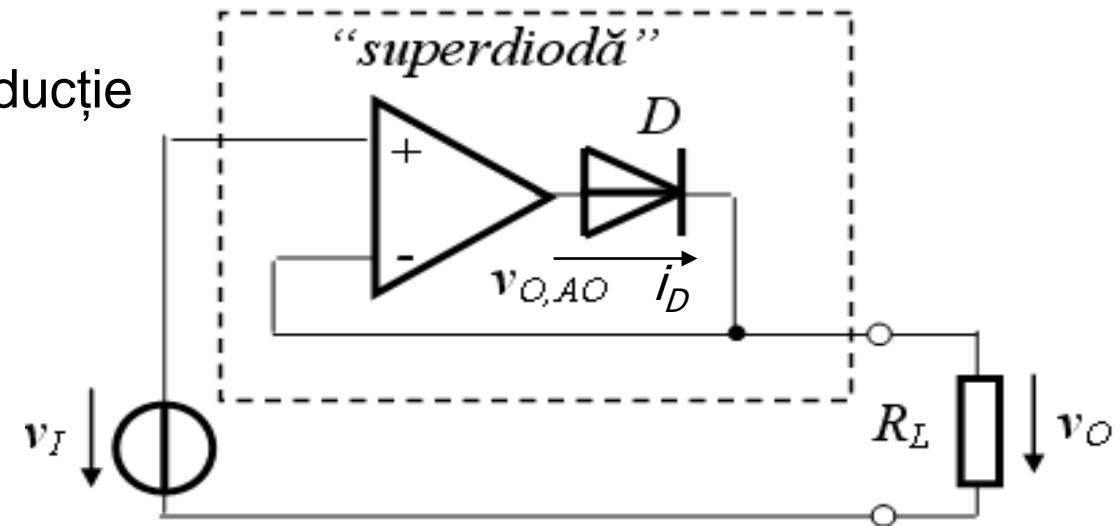


### Redresor de precizie:

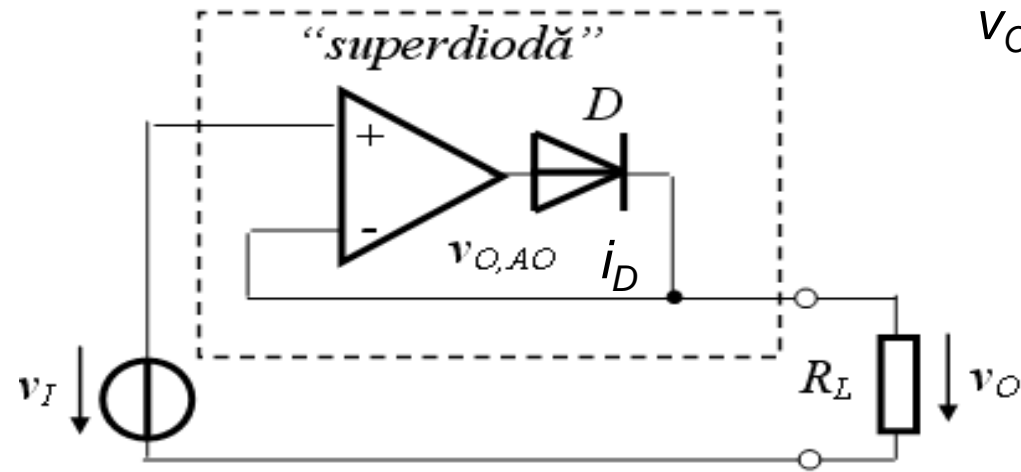
Pentru alternanța redresată  $v_O = v_I$

Superdioda – cădere de tensiune (aproape) zero în conducție

AO cu RN + D



## Redresor monoalternanță



$v_O$  - nu poate deveni negativă

$$i_D \geq 0$$

- redresare monoalternanță pentru alternanța pozitivă
- redresarea alternanței negative?

$$v_I > 0$$

$$v_{O,AO} > 0.6V, D-(c)$$

Există legătură între ieșirea AO și intrarea inversoare deci avem RN

$$v_I = v^- = v^+ = v_O$$

În concluzie:

$$v_I > 0; \quad v_O = v_I$$

$$v_I < 0$$

$$v_{O,AO} < 0.6V, D-(b)$$

Nu există legătură între ieșirea AO și intrarea inversoare, deci AO nu are RN. Prin  $R_L$  nu poate circula curent așadar:

$$v_O = 0$$

$$v_{O,AO} = v_{OL}$$

În concluzie:

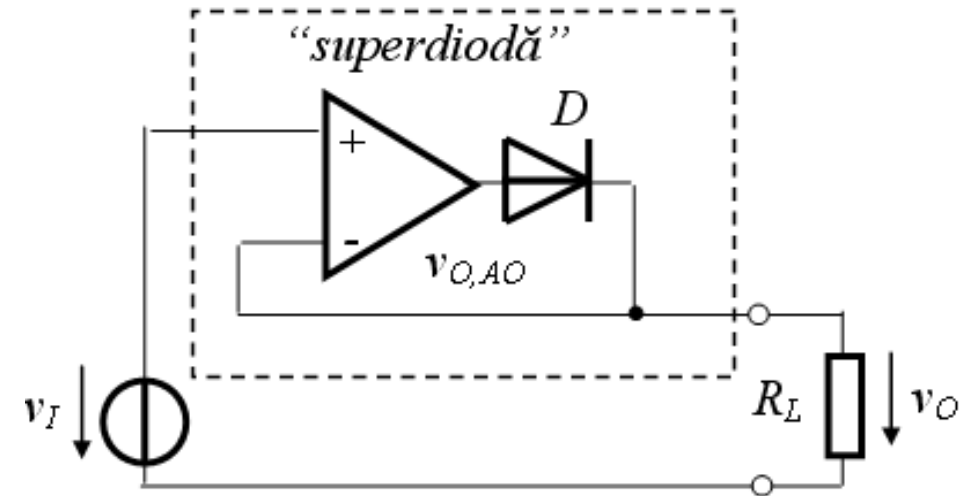
$$v_I < 0; \quad v_O = 0$$

OPȚIONAL

## Redresor monoalternanță

## Dezavantaj:

- $v_I < 0$ ,  $D - (b)$ , nu exista RN, AO comparator simplu,  $v_{O,AO} = V_{OL}$  AO – saturație
- Reduce viteza de funcționare a circuitului (limitează frecvența de lucru)



Soluție: evitarea intrării în saturație ???

OPȚIONAL

## Redresor inversor cu evitarea saturației

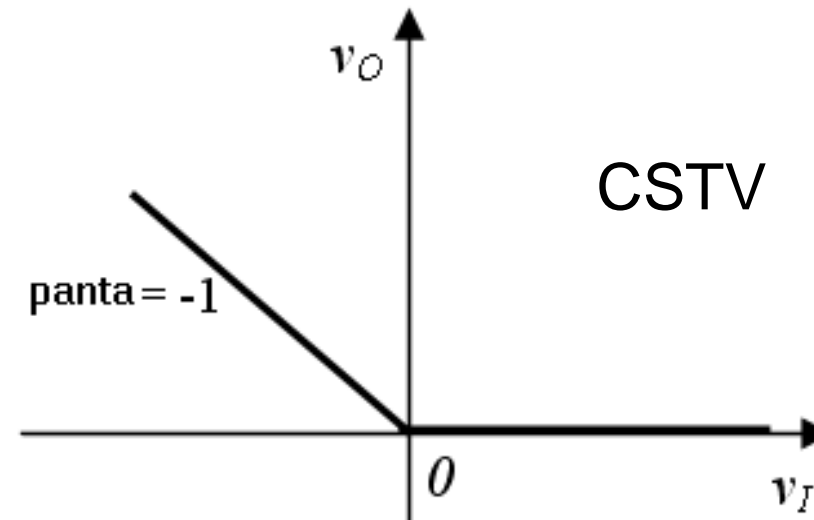
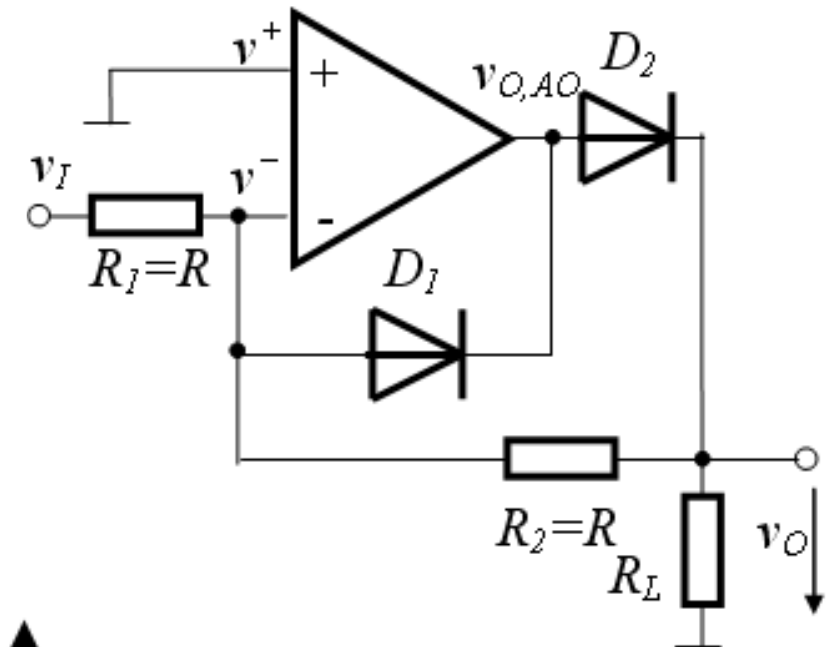
$v_I < 0$ ;  $D_2$  – (c);  $D_1$  – (b) avem RN prin  $D_2$  și  $R_2$ ;  $v_O = -v_I$

$v_{O,AO} = v_O + 0.7V$  AO - regiunea activă

$v_I > 0$ ;  $D_2$  – (b);  $D_1$  – (c)

avem RN prin  $D_1$ ;  $v_O = 0$

$v_{O,AO} = -0.7V$  AO - regiunea activă





## Redresor bialternanță

## • Principiul

$$v_I > 0, D_1-(c), D_2-(b), v_O = v_I$$

$$v_I < 0, D_1-(b), D_2-(c), v_O = -v_I$$

## • Redresor de precizie

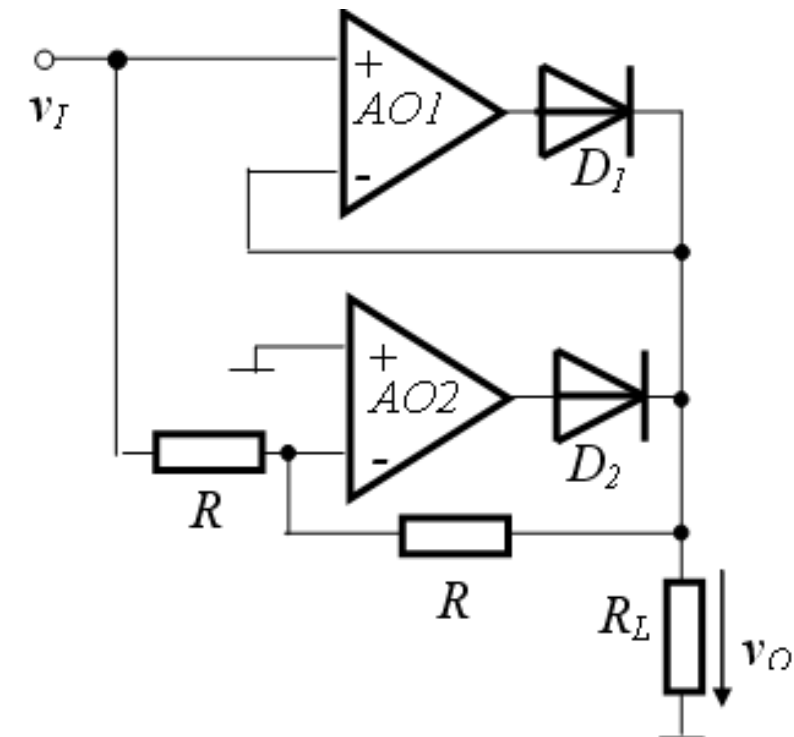
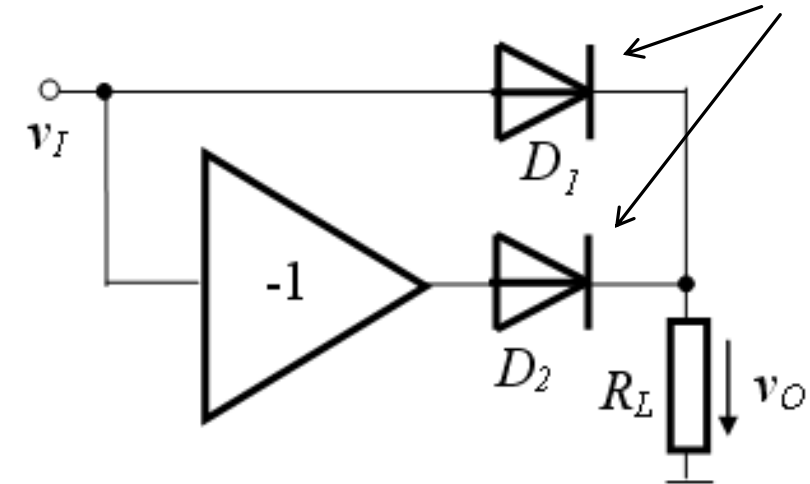
Cum arată circuitul?

 $v_I > 0, D_1-(c), D_2-(b), \text{ exista RN doar pentru AO1,}$ 

$$v_O = v_I$$

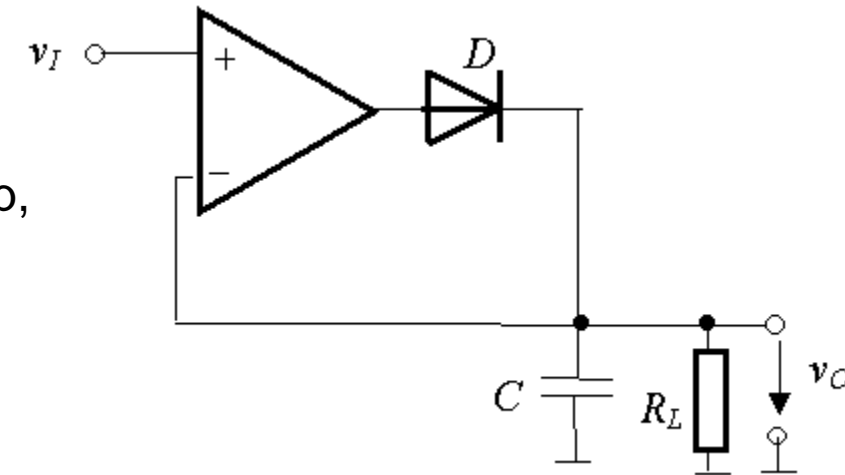
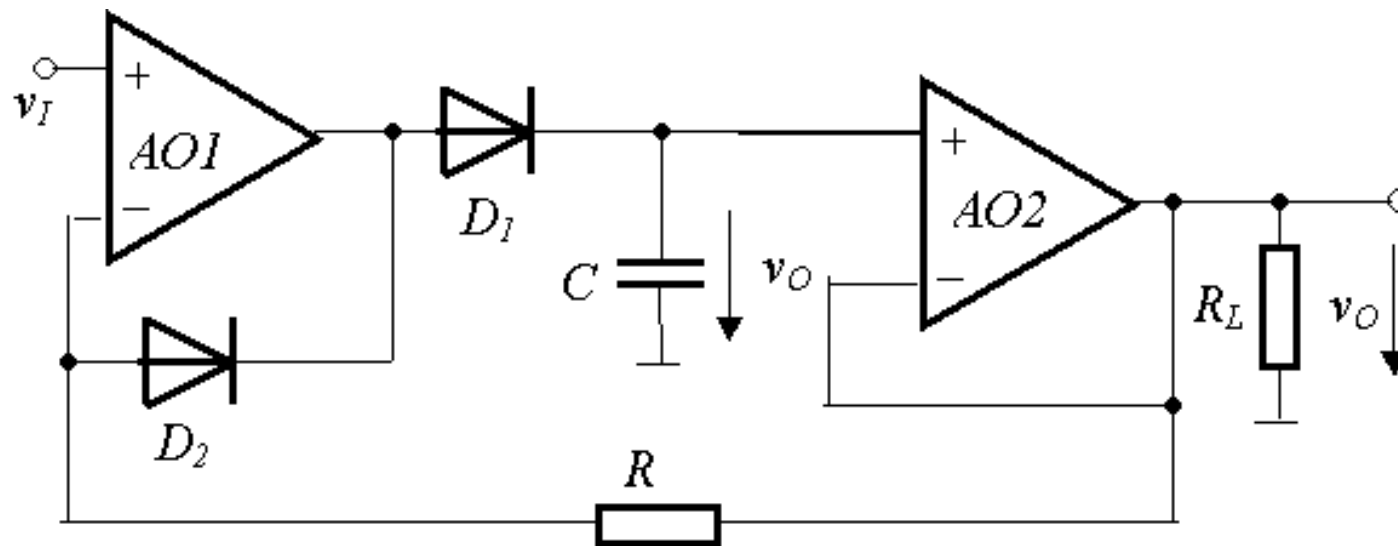
 $v_I < 0, D_1-(b), D_2-(c), \text{ exista RN doar pentru AO2,}$ 

$$v_O = -(R/R) \cdot v_I \quad v_O = -v_I$$



## Detector de vârf pozitiv de precizie cu menținerea tensiunii

Dacă este necesară menținerea tensiunii pe condensator pentru mai mult timp, condensatorul trebuie "buffer-at".



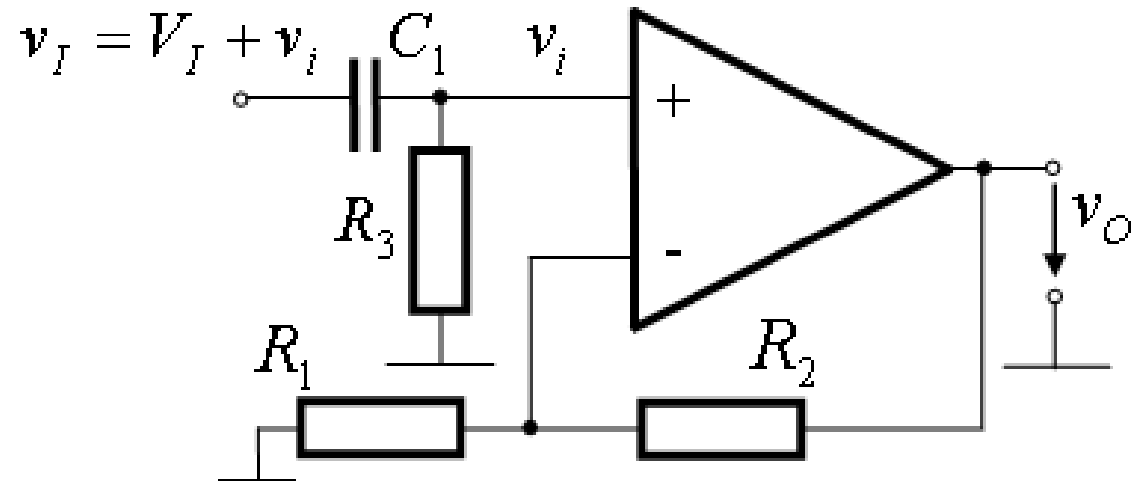
Rolul  $D_2$  ?

Rolul  $R$  ?

- AO2 este un repetor de tensiune.
- $D_1$  este dioda responsabilă cu redresarea alternantei pozitive.
- $D_2$  previne saturația negativă pentru AO1. AO1 are RN locală prin  $D_2$  în conducție, astfel ieșirea AO1 este limitată la  $(v_I - 0.7)V$ .
- $R$  este necesară pentru a asigura un curent mic prin  $D_2$ .

Dorim sa amplificăm doar semnalul variabil  $v_i(t)$ ;  $v_I(t) = V_I + v_i(t)$

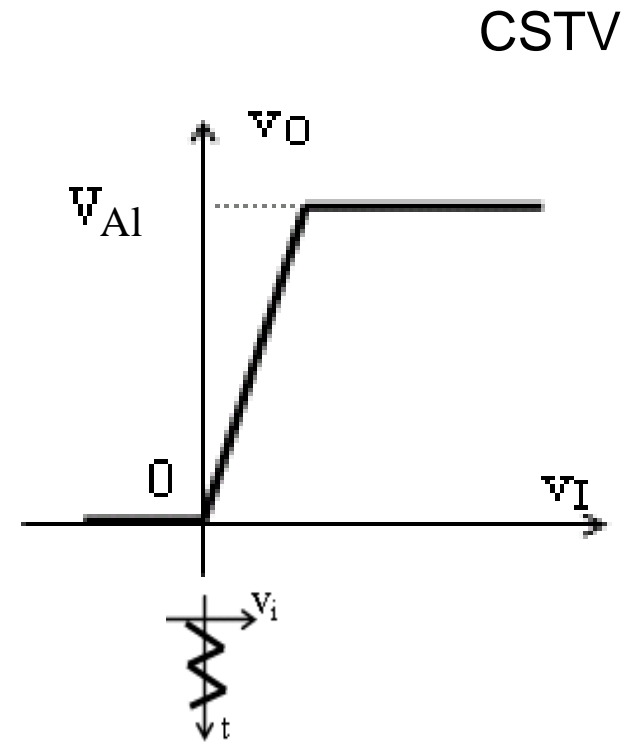
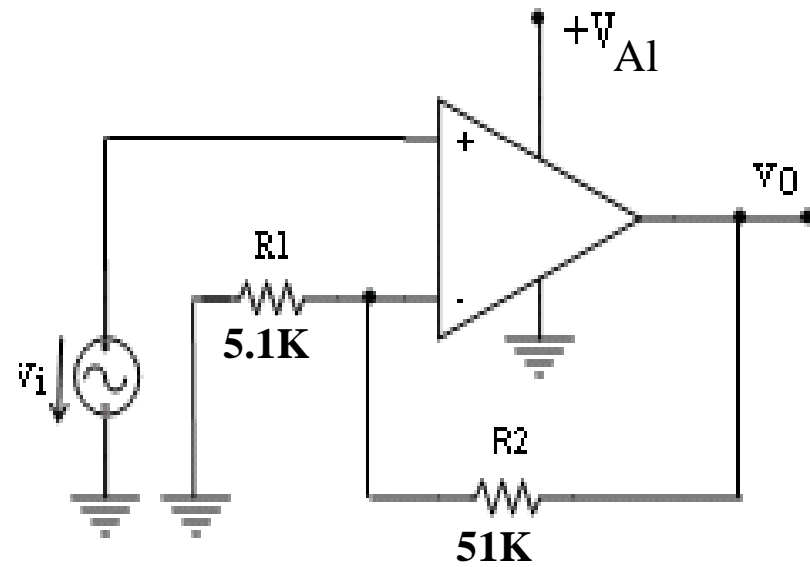
- Amplificator diferențial ☺
- Amplificator cu cuplaj capacitiv



De ce este necesar  $R_3$ ?

$$v_o(t) = v_i(t) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Amplificator neinversor

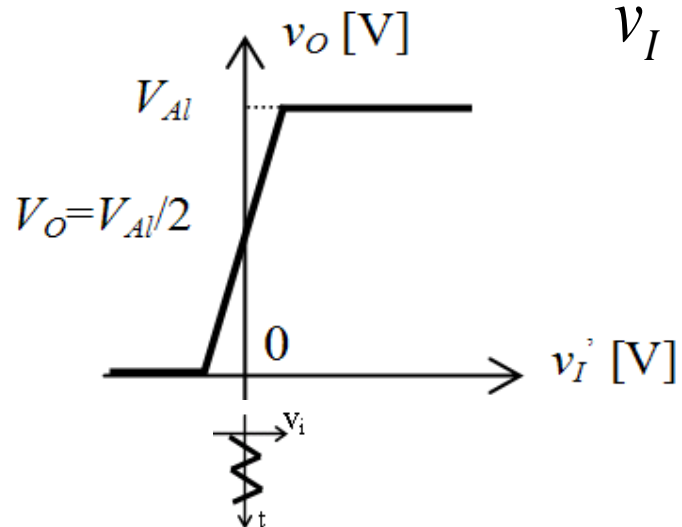


Cum amplificăm întreg  $v_i(t)$  dacă AO este alimentat unipolar?

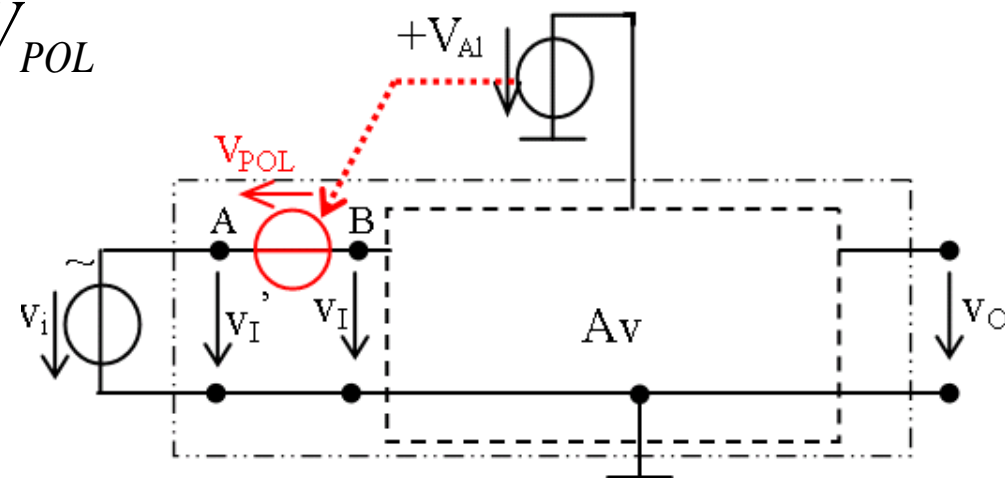
## Amplificator neinversor

**Soluție:**

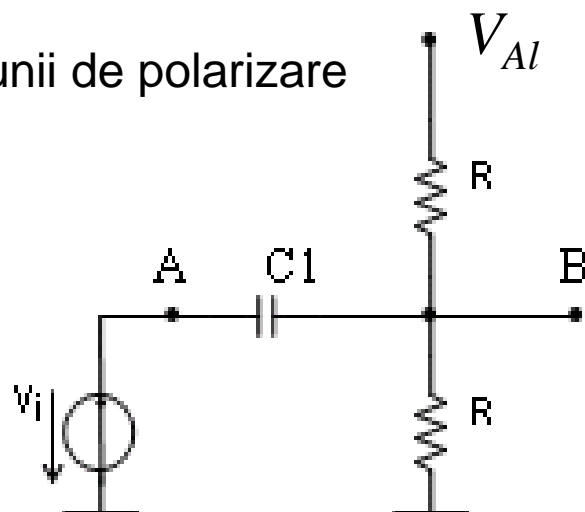
translatarea CSTV



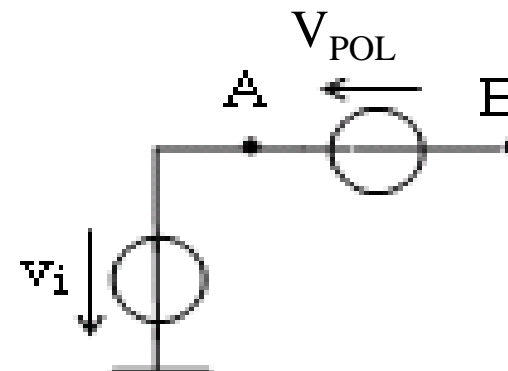
$$v_I = v_i + V_{POL}$$



- obținerea tensiunii de polarizare



- echivalența în regim permanent



## DE Amplificatoare alimentate unipolar

### Amplificator neinversor

**Soluție:** translatarea CSTV

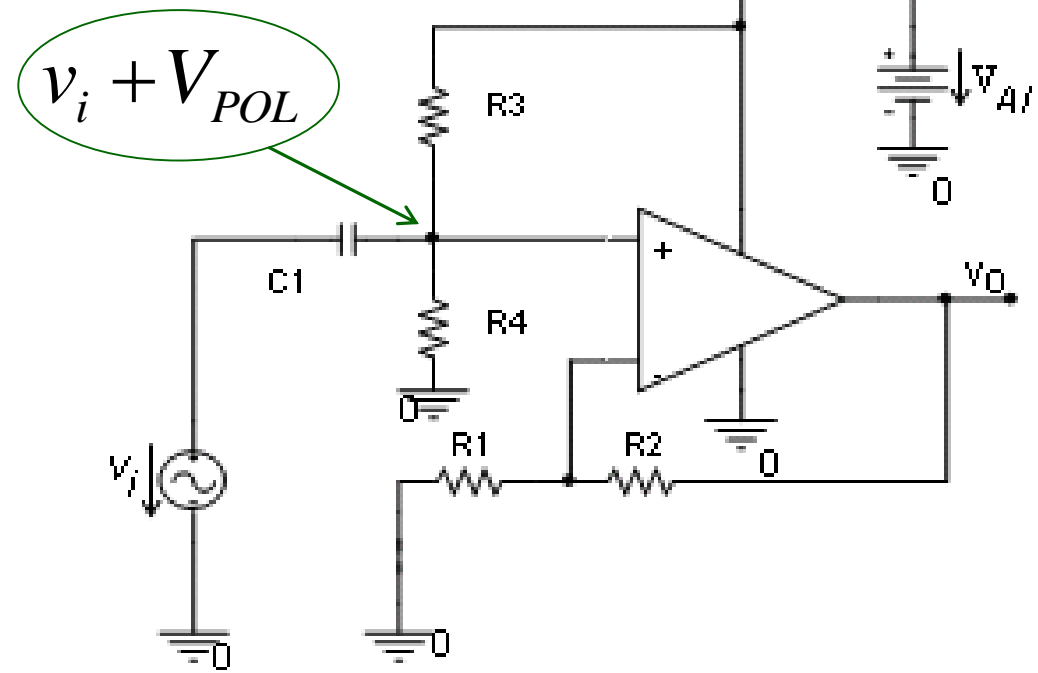
$$V_{POL} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} V_{Al}$$

$$v_O = (v_i + V_{POL}) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = v_i \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + V_{POL} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

- amplificare prea mare în cc
- cum se poate face unitară ?

Să implementăm relația:

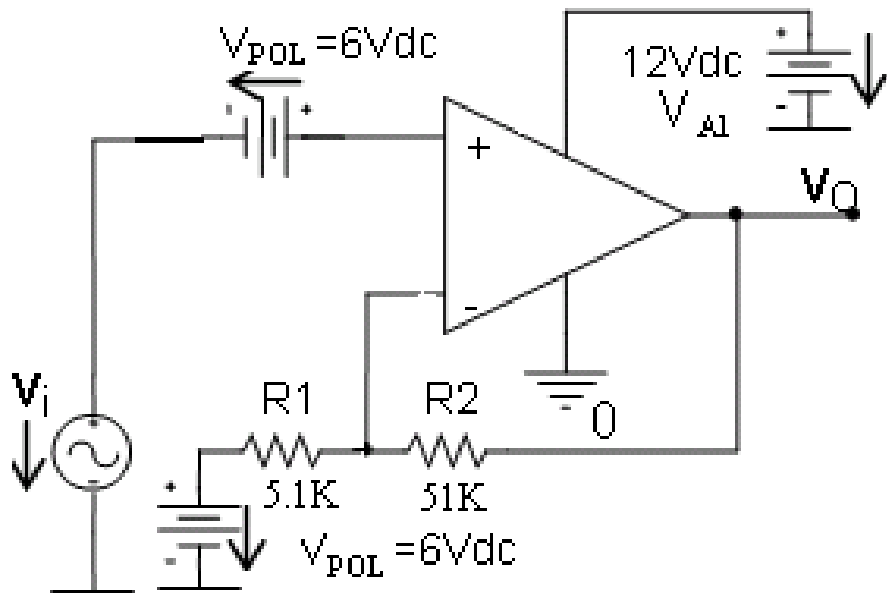
$$v_O = v_i \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + V_{POL} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_{POL} \frac{R_2}{R_1}$$



# DE Amplificatoare alimentate unipolar

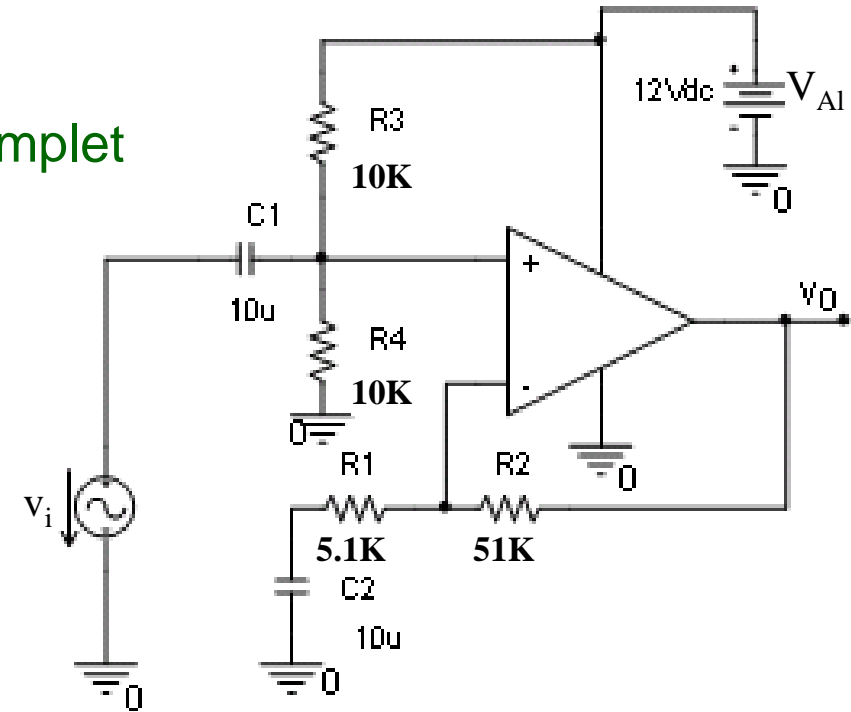
## Amplificator neinversor

Circuitul echivalent în regim permanent



- circuit echivalent în cc?
- circuit echivalent în ca?

Circuit complet



$$v_O = (v_i + V_{POL}) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_{POL} \frac{R_2}{R_1}$$

$$v_O = v_i \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + 1V_{POL}$$

$A_{vca}$   $A_{vcc}$

Care este circuitul final (complet) în cazul unui amplificator inversor alimentat unipolar ?

## DE Amplificatoare logaritmice și exponențiale

OPȚIONAL C9

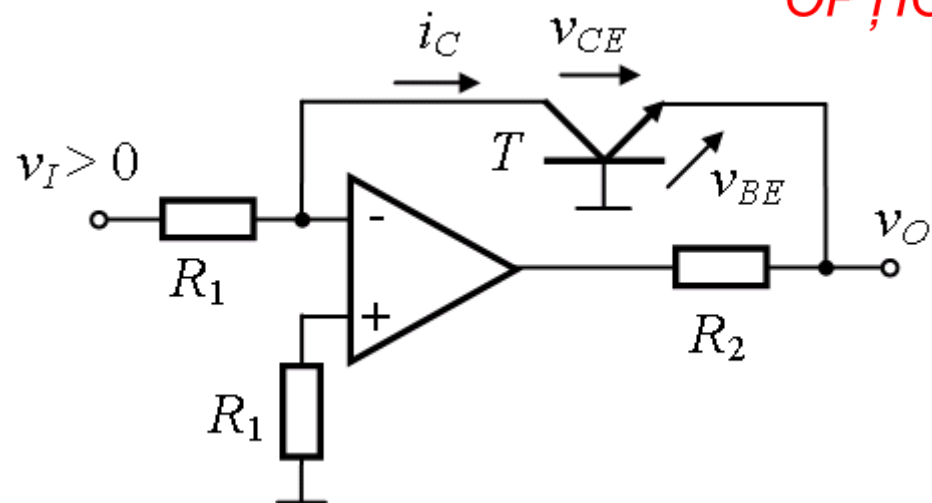
### Amplificator logaritmice

- Pentru  $v_I > 0$  - tranzistor *nnp*

$$v_O = -v_{BE} \quad i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

$$v_{BE} = V_T \ln \frac{i_C}{I_S} \quad i_C = \frac{v_I}{R_1}$$

- Pentru  $v_I < 0$  - tranzistor *pnp*



$$v_O = -V_T \ln \frac{v_I}{R_1 I_S}$$

Limitări ale circuitului:

- domeniul de variație redus al tensiunii de ieșire, de câteva zeci de mV ( $v_O$  este tensiune bază-emitor);
- dependența de temperatură a tensiunii de ieșire prin  $V_T$  și  $I_S$ .

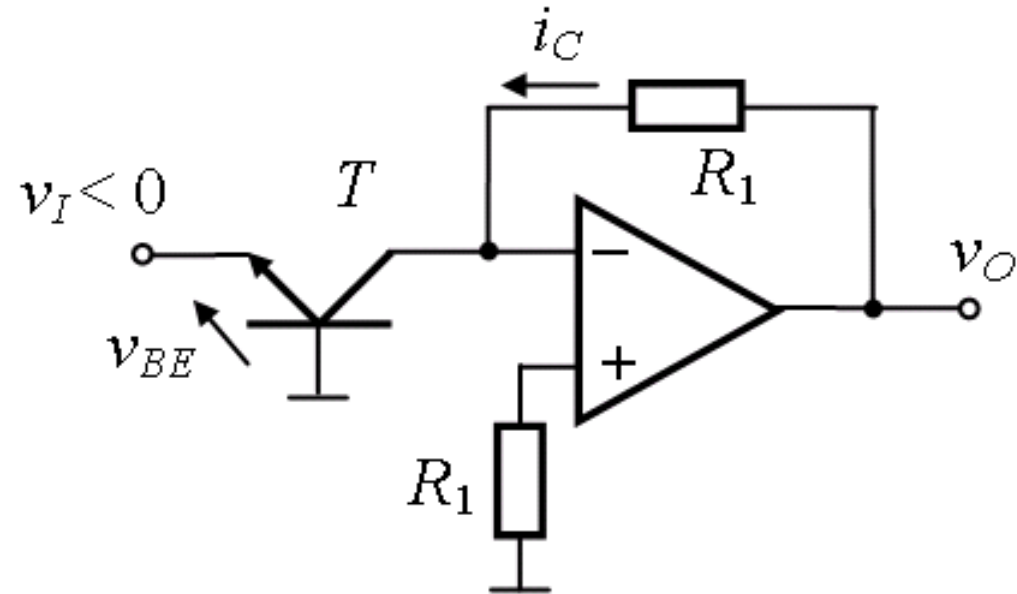


Amplificator exponențial

$$v_O = R_1 i_C$$

$$v_{BE} = -v_I$$

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} = I_S e^{-\frac{v_I}{V_T}}$$



$$v_O = R_1 I_S e^{-\frac{v_I}{V_T}}$$

## Circuit de înmulțire

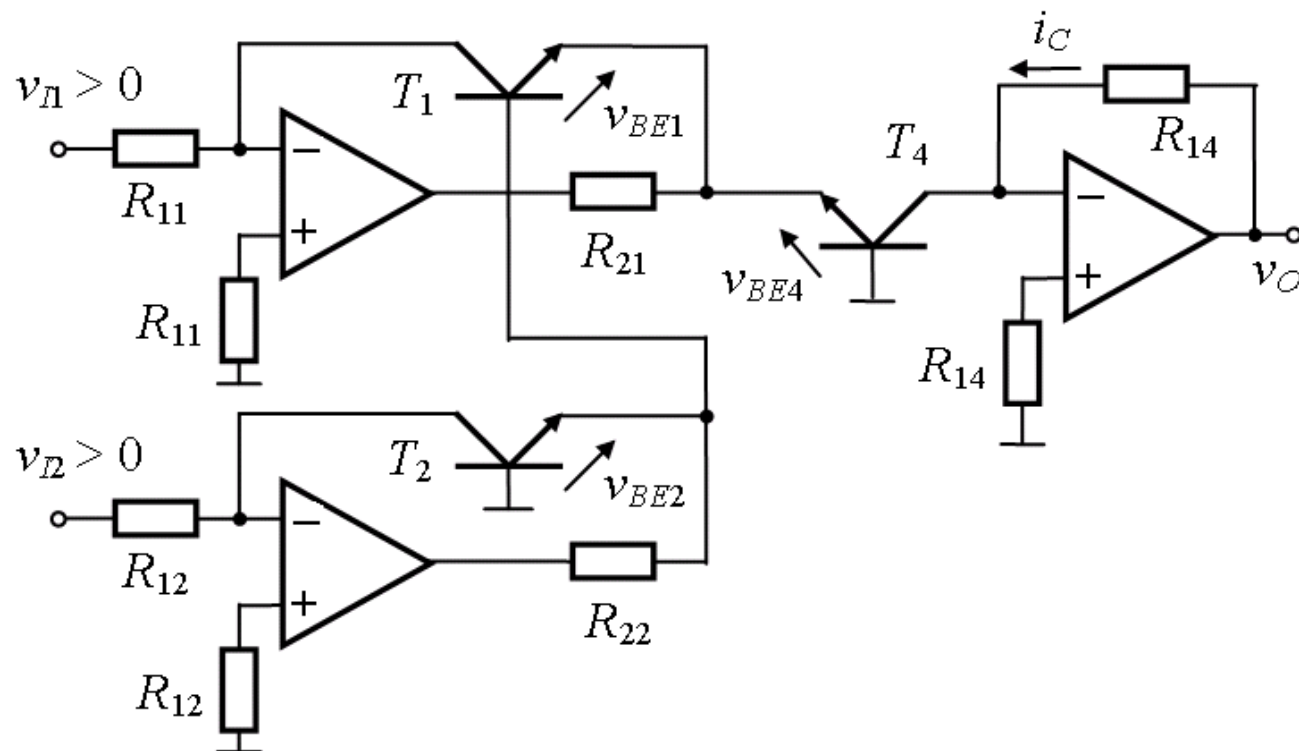
$$v_{I1}v_{I2} = e^{\ln(v_{I1}v_{I2})} = e^{(\ln v_{I1} + \ln v_{I2})}$$

$$v_{BE1} = V_T \ln \frac{v_{I1}}{R_{11}I_S} \quad v_{BE2} = V_T \ln \frac{v_{I2}}{R_{12}I_S}$$

$$v_{BE4} = v_{BE1} + v_{BE2}$$

$$v_O = R_{14}I_S e^{\frac{v_{BE4}}{V_T}}$$

$$v_O = \frac{R_{14}}{R_{11}R_{12}I_S} v_{I1}v_{I2}$$



## Circuit de înmulțire și împărțire

$$v_{BE1} = V_T \ln \frac{v_{I1}}{R_{11} I_S}$$

$$v_{BE2} = V_T \ln \frac{v_{I2}}{R_{12} I_S}$$

$$v_{BE3} = V_T \ln \frac{v_{I3}}{R_{13} I_S}$$

$$v_{BE4} = v_{BE1} + v_{BE2} - v_{BE3}$$

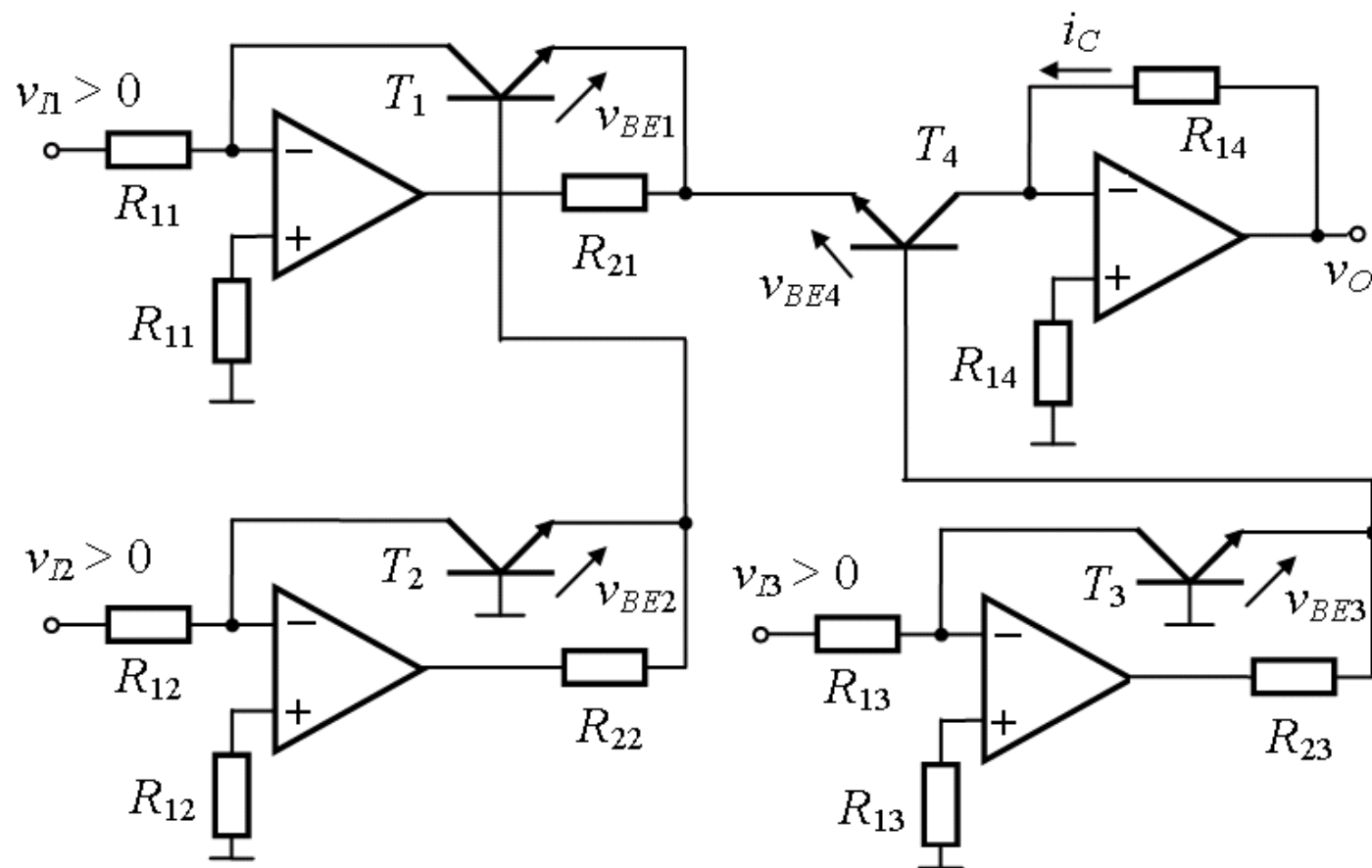
$$v_O = R_{14} I_S e^{\frac{v_{BE4}}{V_T}}$$

$$v_O = \frac{R_{14} R_{13}}{R_{11} R_{12}} \frac{v_{I1} v_{I2}}{v_{I3}}$$

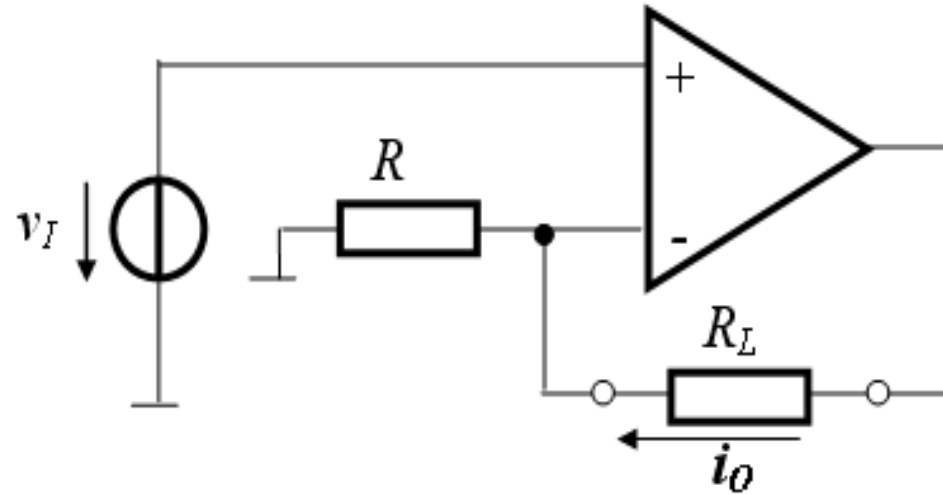
Rezistențe egale

$$v_O = \frac{v_{I1} v_{I2}}{v_{I3}}$$

Tensiunea nu depinde de temperatură



$$i_O = \frac{v_I}{R}$$



- curentul este independent de valoarea  $R_L$
- curent reglabil dacă  $R$  se înlocuiește cu o rezistență fixă în serie cu un potențiomtru
- curentul sursei poate fi modificat prin modificarea  $v_I$  - sursă de curent controlată prin tensiune
- nici unul din terminalele  $R_L$  nu poate fi conectat la masă, așadar avem o sarcină flotantă

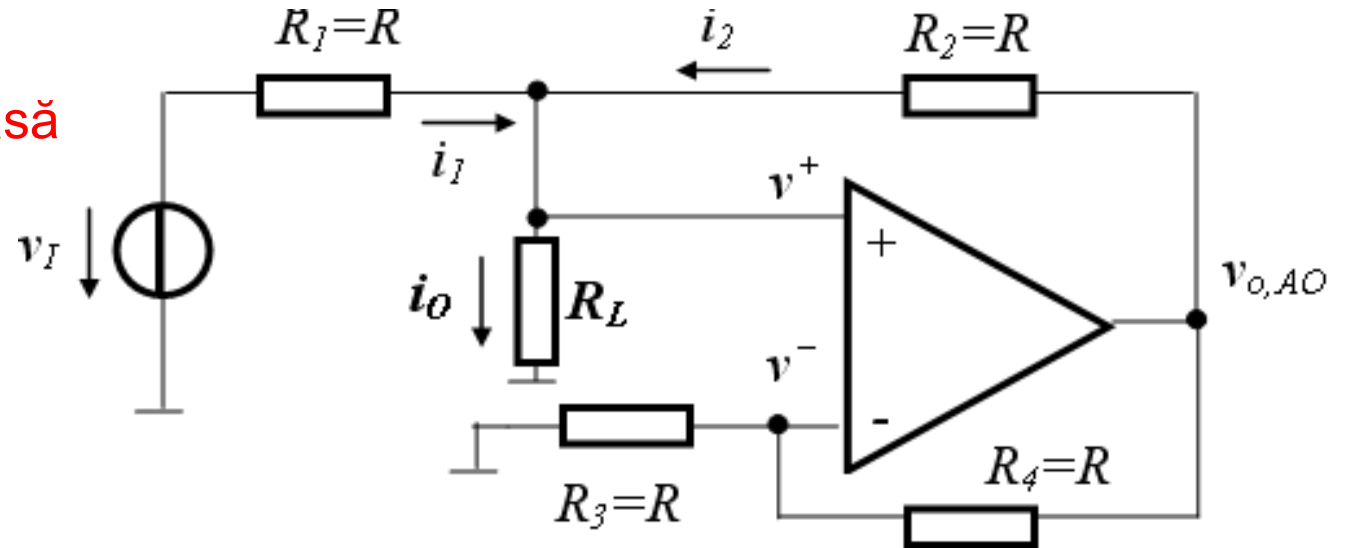
? Dacă se impune legarea la masă a sarcinii ?

Sursă de curent cu sarcină legată la masă

Sursă Howland

RN și RP

RN - dominantă



$$K^- = \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{R}{R + R}$$

$$K^+ = \frac{R_1 \parallel R_L}{R_1 \parallel R_L + R} = \frac{R \parallel R_L}{R \parallel R_L + R}$$

Deoarece  $R \parallel R_L < R$ ,  $K^- > K^+$ ,  
rezultă RN,  $v^+ = v^-$

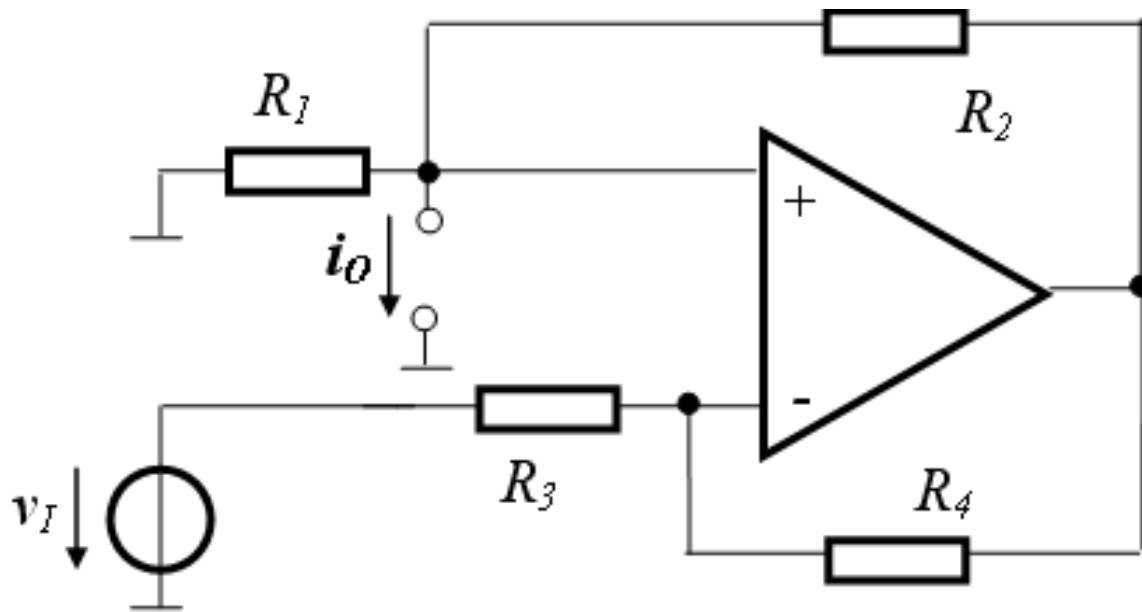
$$i_O = i_1 + i_2 = \frac{v_I - v^+}{R_1} + \frac{v_{o,AO} - v^+}{R_2}$$

$$v^+ = v^- = \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{o,AO}$$

$$i_O = \frac{v_I}{R}$$

$$v_{o,AO} = 2i_O R_L$$

- rezistoarele - foarte bine împerecheate pentru a avea o sursă de curent perfectă (rezistența de ieșire sa tindă la infinit)



- Dacă:

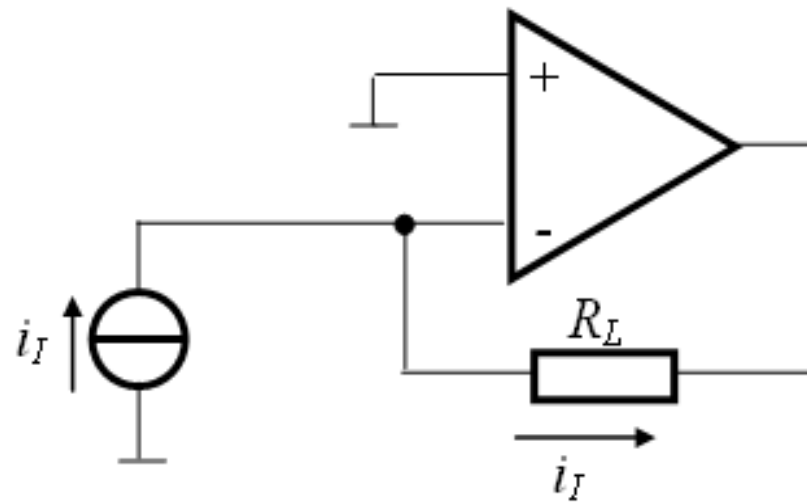
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$i_O = -\frac{v_I}{R_1}$$

- Soluție practică: Sursa de curent realizată cu AO și tranzistor

## Repetor de curent cu AO

- Sursa de curent nu generează putere.
- Puterea în sarcina  $R_L$  provine din sursele de alimentare ale AO



**Activitate curs - P8**

Proiectați un amplificator inversor alimentat unipolar cu următoarele caracteristici:

$$V_{AI}=12V, A_{vcc}=1 \text{ și } A_{vca}=10$$

Pentru circuitul proiectat,

- a) Care este expresia  $v_o(v_i)$ ?
- b) Desenați CSTV a circuitului.
- c) Desenați  $v_o(t)$  dacă  $v_i(t) = 0.2\sin\omega t$  [V].



*Ce am învățat azi despre aplicațiile AO?*

- Convertoare de domeniu de tensiune
- Circuitele de integrare și diferențiere – filtre active
- Redresoare de precizie monoalternanță și dublă alternanță
- Detector de vârf de precizie
- Amplificatoare cu cuplaj capacitiv
- Amplificatoare alimentate unipolar
- Amplificatoare logaritmice și exponențiale
- Circuite de înmulțire și împărțire
- Surse de curent