Extinderea regiunii liniare de funcţionare prin introducerea unei reacţii negative în circuit

Problema 1

Un amplificator operaţional AO este alimentat de la 2 surse de tensiune continuă, $\mathbf{V_{CC} = 11[V]}$ si $\mathbf{V_{EE} = -11[V]}$ si are o amplificare in tensiune $\mathbf{A_{VAO}=100000}$.

a. Să se determine intervalul de valori al tensiunii de intrare diferenţiale $\mathbf{v_{ID}}$ în care AOul funcţionează în regiunea liniară.

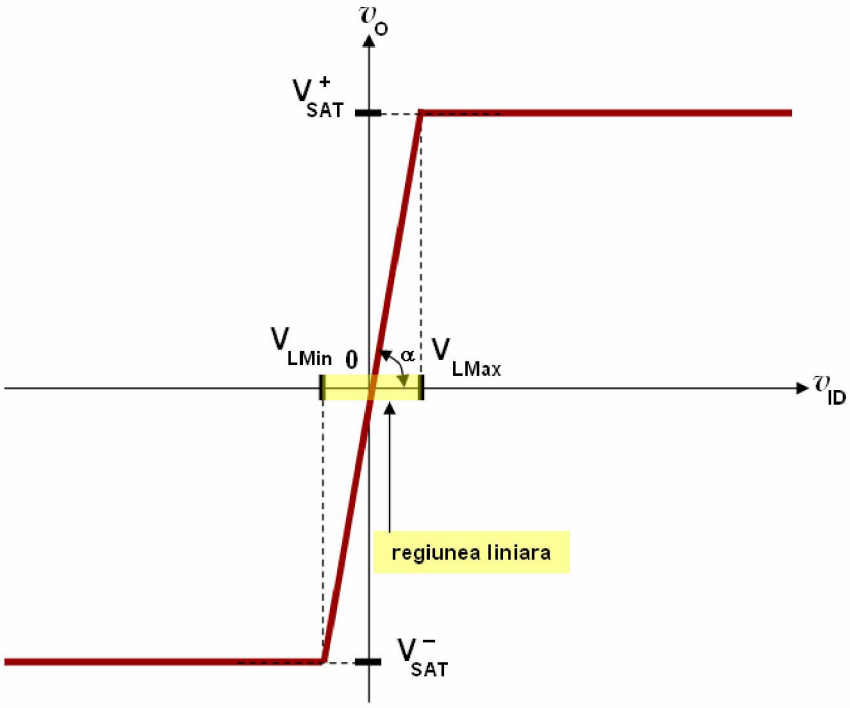
b. Dacă AOul se introduce într-o buclă de reacţie negativă, iar amplificarea în tensiunea a circuitului devine $\mathbf{A_V = + 10}$, să se determine intervalul de valori al tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ în care circuitul funcţionează în regiunea liniară. Să se scrie în acest caz, relaţia de calcul pentru tensiunea de ieşire a circuitului.

c. Dacă AOul se introduce într-o buclă de reacţie negativă, iar amplificarea în tensiunea a circuitului devine $\mathbf{A_V = - 10}$, să se determine intervalul de valori al tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ în care circuitul funcţionează în regiunea liniară. Să se scrie în acest caz, relaţia de calcul pentru tensiunea de ieşire a circuitului.

Rezolvare

Metoda de determinare a regiunii liniare a AOului, respectiv a unui circuit de amplificare cu AO, este descrisă în setul de probleme alocat cursului 10 şi se bazează pe caracteristica de funcţionare a AOului, respectiv a circuitului.

a. Caracteristica de funcţionare a AOului este indicată în figura de mai jos. Intervalul de valori al tensiunii $\mathbf{v_{ID}}$ care corespunde regiunii liniare este reprezentat de intervalul de valori $\mathbf{[V_{Lmin} \div V_{Lmax}]}$.



Caracteristica de funcţionare a AOului.

În cazul în care valoarea în modul a celor 2 surse de alimentare este egală, este suficient să se determine numai valoarea $\mathbf{V_{Lmax}}$, deoarece $|V_{L\,min}| = V_{L\,max}$. În problema curentă, $|V_{EE}| = V_{CC}$ deci este suficient să se determine valoarea limitei $\mathbf{V_{Lmax}}$ a intervalului de valori a tensiunii $\mathbf{v_{ID}}$ care corespunde regiunii liniare.

Conform metodei de calcul prezentate în setul de probleme alocat cursului 10,

$$\boxed{V_{L\,max} = \frac{V_{CC} - 1[V]}{A_{VAO}}}$$

Ţinând cont de datele problemei, valoarea limitei $\mathbf{V_{Lmax}}$ este:

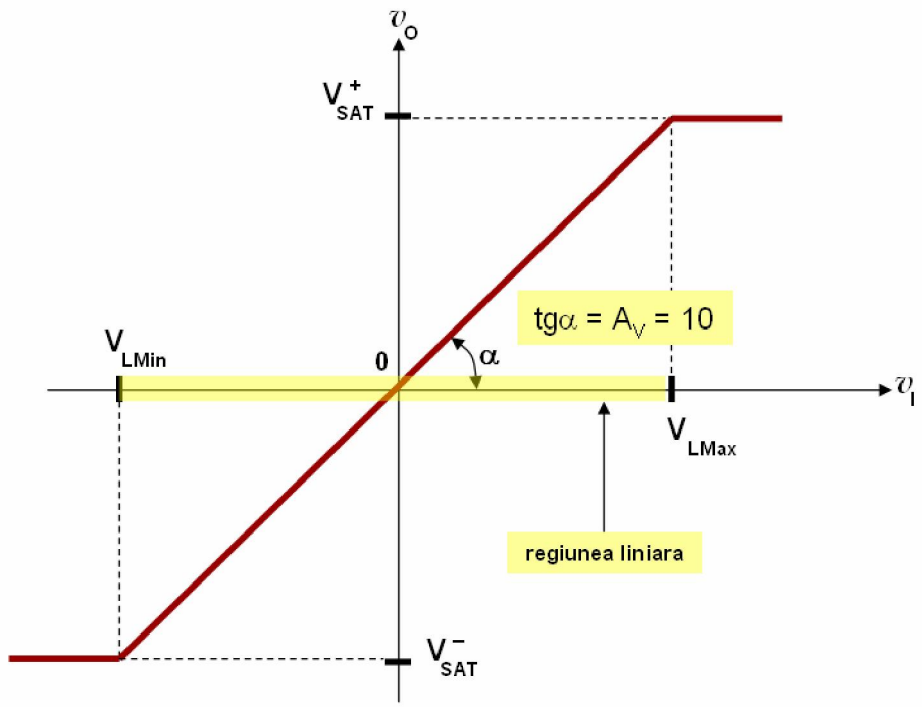
$$V_{L\,max} = \frac{V_{CC} - 1[V]}{A_{VAO}} = \frac{11[V] - 1[V]}{100000} = \frac{10}{100000}[V] = 10^{-4}[V] = 100[\mu V]$$

deci, $V_{L\,max} = +100[\mu V]$ $\qquad$ $V_{L\,min} = -100[\mu V]$

Aşadar, intervalul de valori al tensiunii tensiunii de intrare diferenţiale $\mathbf{v_{ID}}$ în care AOul funcţionează în regiunea liniară este:

[-100μV , +100μV]

b. Caracteristica de funcţionare a circuitului de amplificare cu AO este indicată în figura de mai jos. Intervalul de valori al tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ care corespunde regiunii liniare este reprezentat de intervalul de valori **[$\mathbf{V_{Lmin}}$ ÷ $\mathbf{V_{Lmax}}$]**. Se remarcă faptul că, introducerea AOului într-o buclă de reacţie negativă, extinde regiunea liniară de funcţionare.



Metoda de calcul a intervalului de valori al tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ care corespunde regiunii liniare este identică cu cea prezentată în setul de probleme alocat cursului 10, în care se ţine cont că amplificarea în tensiune a circuitului este diferită de cea a AOului, şi se notează $\mathbf{A_V}$**.** Astfel, în relaţiile de calcul specifice determinării intervalului de valori al tensiunii de intrare a circuitului, pentru care acesta funcţionează în regiunea liniară, parametrul $\mathbf{A_{VAO}}$ se înlocuieşte cu modulul parametrul $\mathbf{A_V}$ (în relaţiile de calcul, se utilizează modulul deoarece expresia amplificării poate fi

pozitivă, sau negativă, deoarece conţine informaţii şi despre defazajul dintre tensiunea de ieşire şi cea de intrare). Deci,

$$\boxed{V_{L\,max} = \frac{V_{CC} - 1[V]}{|A_V|}}$$

Ţinând cont de datele problemei, valoarea limitei $\mathbf{V_{Lmax}}$ este:

$$V_{L\,max} = \frac{V_{CC} - 1[V]}{|A_V|} = \frac{11[V] - 1[V]}{10} = \frac{10}{10}[V] = 1[V] \qquad V_{L\,max} = +1[V] \qquad V_{L\,min} = -1[V]$$

Aşadar, intervalul de valori al tensiunii tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ în care circuitul de amplificare funcţionează în regiunea liniară este:

[-1V , +1V]

Prin comparaţie cu punctul precedent, se remarcă faptul că introducerea AOului într-o buclă de reacţie negativă a crescut intervalul de valori al tensiunii tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ care corespunde regiunii liniare de funcţionare de 10.000 de ori.

Expresia tensiunii de ieşire a circuitului de amplificare este următoarea:

$$\boxed{v_O = \begin{cases} A_V \cdot v_I & V_{L\,min} \le v_I \le V_{L\,min} \quad regiunea_liniara \\ V_{SAT}^{+} & V_{L\,max} < v_I \quad saturatie \\ V_{SAT}^{-} & v_I < V_{L\,min} \quad saturatie \end{cases}}$$

c. deoarece valoarea în modul a amplificării în tensiune a circuitului nu se modifică ($|\mathbf{A_V}| = \mathbf{10}$), intervalul de valori al tensiunii tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ în care circuitul de amplificare funcţionează în regiunea liniară rămâne acelaşi ca la punctul **b**:

[-1V , +1V]

Datorită faptului că semnul amplificării în tensiune este negativ, între tensiunea de ieşire şi cea de intrare există un defazaj de $\mathbf{180^0}$ (tensiunea de intrare se inversează la ieşire), şi din acest motiv, în acest caz, expresia tensiunii de ieşire a circuitului de amplificare devine următoarea (se observă că,faţă de cazul precedent, de această dată, atunci cînd tensiunea de intrare $\mathbf{v_I}$ devine inferioară limitei minime a intervalului care corespunde regiunii liniare $\mathbf{V_{Lmin}}$, tensiunea de ieşire devine egală cu tensiunea de saturaţie pozitivă a AOului, iar cînd tensiunea de intrare $\mathbf{v_I}$ devine mai mare decât limita maximă a intervalului care corespunde regiunii liniare $\mathbf{V_{Lmax}}$, tensiunea de ieşire devine egală cu tensiunea de saturaţie negativă a AOului):

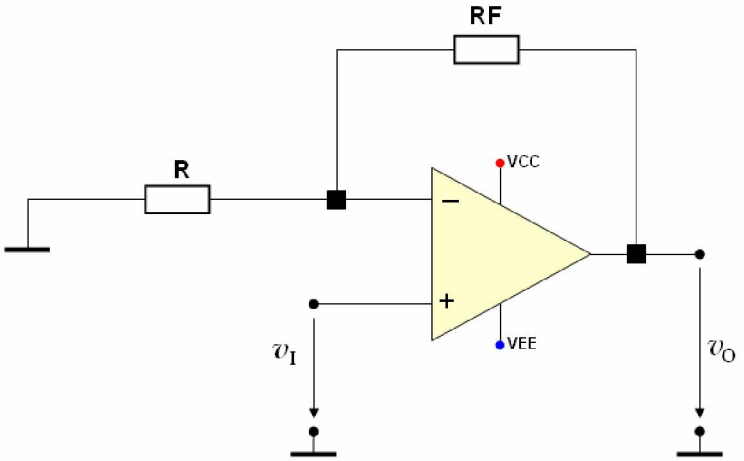
$$\boxed{v_O = \begin{cases} A_V \cdot v_I & V_{L\,min} \le v_I \le V_{L\,min} \quad regiunea_liniara \\ V_{SAT}^{-} & V_{L\,max} < v_I \quad saturatie \\ V_{SAT}^{+} & v_I < V_{L\,min} \quad saturatie \end{cases}}$$

Amplificatorul neinversor

Problema 2 Se consideră amplificatorul neinversor din figura de mai jos, în care AOul este alimentat de la 2 surse de tensiune continuă, **V_{CC} = 11[V]** si **V_{EE} = -11[V]**, iar **RF=10[kΩ]** si **R=1[kΩ].** Să se determine tensiunea de ieşire a circuitului şi să se deseneze forma sa de undă, dacă la intrarea sa se aplică o tensiune de intrare de tipul următor:

a. v_I (ω·t) = 500· sin (ω·t) [mV] **b. v_I (ω·t) = 2· sin (ω·t) [V]** **c. v_I (ω·t) = 1+0.5· sin (ω·t) [V]**

d. V_I = 0.5[V] **e. V_I = 1[V]**



Rezolvare

a. Deoarece valoarea tensiunii de ieşire depinde de regiunea în care funcţionează AOul, mai întâi trebuie să se determine, în condiţiile enunţate mai sus, în ce regiune funcţionează acesta. Determinarea intervalului de valori a tensiunii de intrare în care circuitul de amplificare funcţionează liniar se efectuează ca în cazul problemei 1, ţinînd cont de valoarea amplificării în tensiune a circuitului.

Deci,

$$\boxed{V_{L\,max} = \frac{V_{CC} - 1[V]}{|A_V|}}$$

unde **A_V** reprezintă valoarea modulului amplificării în tensiune a amplificatorului neinversor. Pentru a utiliza relaţia de mai sus, mai întâi trebuie calculată valoarea modulului amplificării în tensiune a circuitului. Deoarece circuitul de amplificare reprezintă un amplificator neinversor, relaţia de calcul a amplificării în tensiune este următoarea:

$$\boxed{A_V = +\left(1 + \frac{R_F}{R}\right)}$$

de unde, ţinând cont de datele problemei,

$$A_V = +\left(1 + \frac{R_F}{R}\right) = +\left(1 + \frac{10[k\Omega]}{1[k\Omega]}\right) = +11 \qquad |A_V| = 11$$

Rezultă,

$V_{L\,max} = \frac{11[V]-1[V]}{11} = \frac{10}{11}[V] = 0{,}9[V]$ $\qquad$ $V_{L\,max} = 0{,}9[V]$

Deoarece $|V_{EE}| = V_{CC}$ $\qquad$ $V_{L\,min} = -0{,}9[V]$

Deci, domeniul de valori a tensiunii de intrare vI pentru care circuitul de amplificare funcţionează liniar este:

$$\mathbf{v_I \in [\,-0{,}9V\,,\,+0{,}9V\,]}$$

Pentru ca amplificatorul operaţional să funcţioneze în regiunea liniară este necesar să fie îndeplinită condiţia,

$$\boxed{v_{Im\,in} > V_{L\,min} \quad si \quad v_{Im\,ax} < V_{L\,max}}$$

condiţia ca circuitul de amplificare să lucreze în regiunea liniară, pentru cazul în care v_I este variabilă în timp

în caz contrar, circuitul de amplificare funcţionează în regiunea de saturaţie.

Deoarece $\mathbf{v_I\ (\omega\cdot t) = 500 \cdot \sin\ (\omega\cdot t)\ [mV]}$ rezultă că tensiunea de intrare are o formă de undă sinusoidală axată pe valoarea medie **0[V]**. Din acest motiv, valoarea minimă, respectiv maximă a acestei tensiuni este

$$v_{Im\,in} = -500[mV] \qquad\qquad v_{Im\,ax} = +500[mV]$$

Prin compararea acestor valori cu valorile limită ale regiunii liniare ale circuitului de amplificare,

$$V_{L\,min} = -900[mV] \qquad\qquad V_{L\,max} = +900[mV]$$

se constată că este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară:

$$v_{Im\,in} > V_{L\,min} \quad -500[mV] > -900[mV] \quad adevarat$$
$$v_{Im\,ax} < V_{L\,max} \quad +500[mV] < +900[mV] \quad adevarat$$

deci, AOul funcţionează în regiunea liniară, şi în acest caz, expresia tensiunii de ieşire este următoarea:

$$v_O = A_V \cdot v_I$$

unde $\mathbf{A_V}$ reprezintă valoarea amplificării în tensiune a circuitului de amplificare,

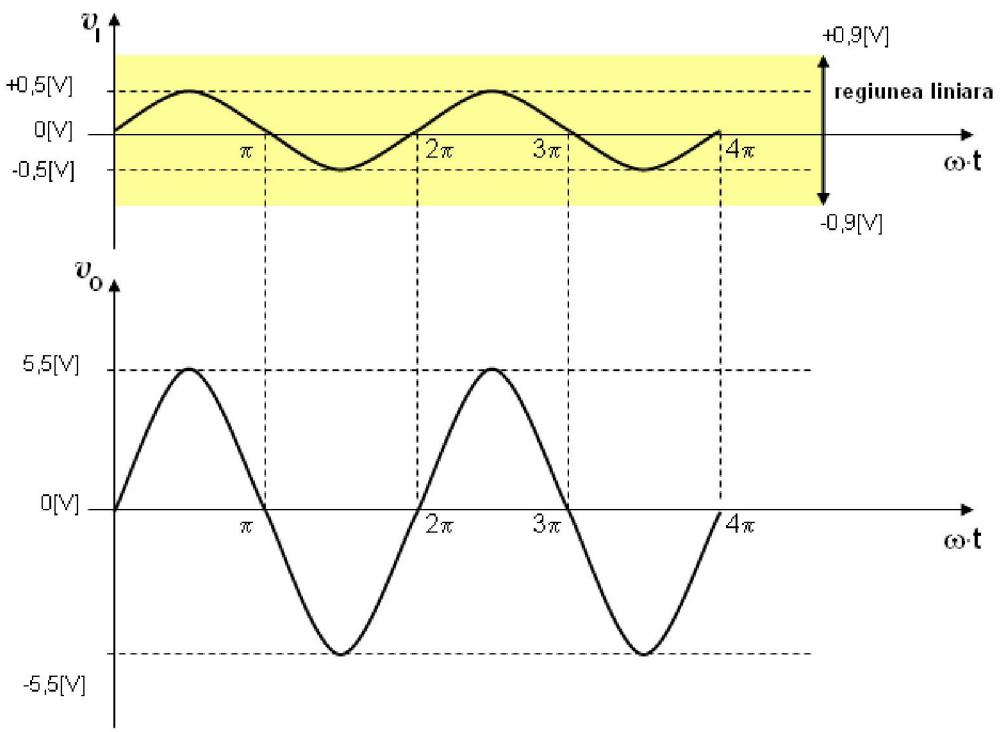
$$A_V = +11$$

În relaţia de mai sus, semnul "+" indică un defazaj de $\mathbf{0^0}$ între tensiunea de ieşire şi cea de intrare, iar valoarea **11** indică modulul amplificării în tensiune.

Rezultă,

$v_O = +11 \cdot [0{,}5 \cdot sin(\omega \cdot t)][V] = 5{,}5 \cdot sin(\omega \cdot t)[V]$ $\qquad$ $v_O = 5{,}5 \cdot sin(\omega \cdot t)[V]$

Formele de undă ale celor 2 tensiuni sunt indicate mai jos.



b. Deoarece $\mathbf{v_I\ (\omega \cdot t) = 2 \cdot \sin(\omega \cdot t)\ [V]}$ rezultă că tensiunea de intrare are o formă de undă sinusoidală axată pe valoarea medie **0[V]**. Din acest motiv, valoarea minimă, respectiv maximă a acestei tensiuni este

$$v_{Imin} = -2[V] \qquad v_{Imax} = +2[V]$$

Prin compararea acestor valori cu valorile limită ale regiunii liniare ale circuitului de amplificare,

$$V_{L\,min} = -0.9[V] \qquad V_{L\,max} = +0.9[V]$$

se constată că NU este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară:

$$\begin{array}{lll} v_{Imin} > V_{L\,min} & -2[V] > -0.9[V] & fals \\ v_{Imax} < V_{L\,max} & +2[V] < +0.9[V] & fals \end{array}$$

În concluzie, amplificatorul neinversor introduce distorsiuni. Dar, deoarece regiunea liniară este extinsă, pentru anumite valori instantanee ale tensiunii de intrare, care sunt în interiorul domeniului de valori ale tensiunii de intrare care corespunde regiunii liniare, amplificatorul neinversor poate funcţiona în regiunea liniară. Astfel, funcţionarea amplificatorului neinversor poate fi descrisă în modul următor:

$$functionare_amplificator = \begin{cases} regiunea_liniara & v_I \in [V_{L\,min}, V_{L\,max}] \\ regiunea_saturatie & v_I \notin [V_{L\,min}, V_{L\,max}] \end{cases}$$

iar tensiunea de ieşire, este descrisă de următoarea relaţie:

$$v_O = \begin{cases} A_V \cdot v_I & V_{L\,min} \le v_I \le V_{L\,min} & regiunea_liniara \\ V_{SAT}^{+} & V_{L\,max} < v_I & saturatie \\ V_{SAT}^{-} & v_I < V_{L\,min} & saturatie \end{cases}$$

Aşadar:

1. dacă $\mathbf{v_I} \in$ **[-0,9V , +0,9V]**

Amplificatorul neinversor funcţionează în regiunea liniară, iar tensiunea de ieşire respectă relaţia:

$v_O = +11 \cdot [2 \cdot sin(\omega \cdot t)][V] = 22 \cdot sin(\omega \cdot t)[V]$ $\qquad$ $v_O = 22 \cdot sin(\omega \cdot t)[V]$

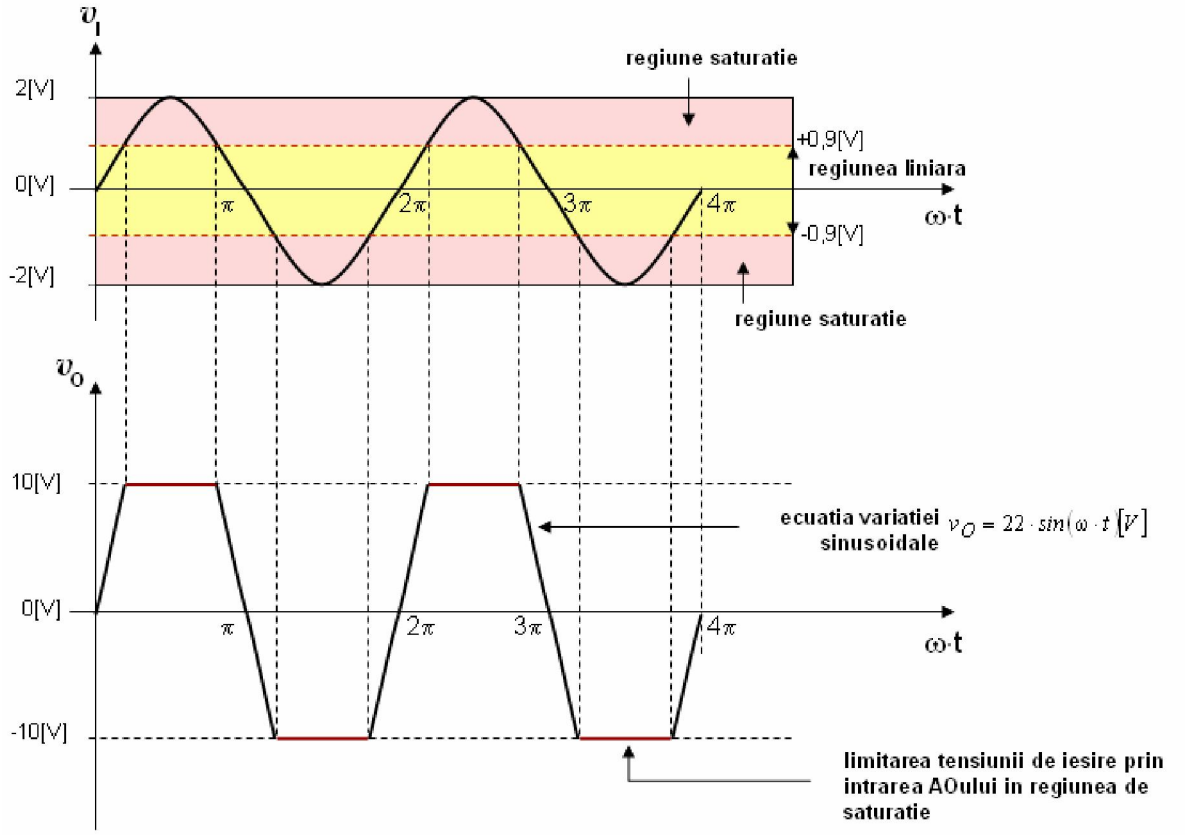
2. dacă **+0,9[V] < $\mathbf{v_I}$**

$v_O = V_{SAT}^{+} = V_{CC} - 1[V]$ $\qquad$ $v_O = 11[V] - 1[V] = 10[V]$ $\qquad$ $v_O = 10[V]$

3. dacă $\mathbf{v_I}$ **< - 0,9[V]**

$v_O = V_{SAT}^{-} = V_{EE} + 1[V]$ $\qquad$ $v_O = -11[V] + 1[V] = -10[V]$ $\qquad$ $v_O = -10[V]$

Formele de undă ale celor 2 tensiuni sunt indicate în figura de mai jos. După cum se observă, tensiunea de ieşire $\mathbf{v_O}$ respectă variaţia descrisă de expresia armonică $v_O = 22 \cdot sin(\omega \cdot t)[V]$ atît timp cât se respectă condiţia $\mathbf{v_I} \in$ **[-0,9V , +0,9V]**, după care, valoarea ei se limitează la una din tensiunile de saturaţie ale AOului, în funcţie de semnul lui $\mathbf{v_I}$.



c. Deoarece $\mathbf{v_I(\omega \cdot t) = 0.7 + 0.5 \cdot sin(\omega \cdot t)\ [V]}$ rezultă că tensiunea de intrare are o formă de undă sinusoidală axată pe valoarea medie **0.7[V]**. Din acest motiv, valoarea minimă, respectiv maximă a acestei tensiuni este

$$v_{Imin} = 0.7 - 0.5[V] = 0.2[V] \qquad v_{Imax} = 0.7 + 0.5[V] = 1.2[V]$$

$$v_{Imin} = +0.2[V] \qquad v_{Imax} = +1.2[V]$$

Prin compararea acestor valori cu valorile limită ale regiunii liniare ale circuitului de amplificare,

$$V_{L\,min} = -0.9[V] \qquad V_{L\,max} = +0.9[V]$$

se constată că NU este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară (una din condiţii este falsă):

$$v_{Imin} > V_{L\,min} \quad +0.2[V] > -0.9[V] \quad adevarat$$
$$v_{Imax} < V_{L\,max} \quad +1.2[V] < +0.9[V] \quad fals$$

În concluzie, amplificatorul neinversor introduce distorsiuni. Deoarece regiunea liniară este extinsă, pentru anumite valori instantanee ale tensiunii de intrare, care sunt în interiorul domeniului de valori ale tensiunii de intrare care corespunde regiunii liniare, amplificatorul neinversor poate funcţiona în regiunea liniară. Astfel, funcţionarea amplificatorului neinversor poate fi descrisă în modul următor:

$$functionare_amplificator = \begin{cases} regiunea_liniara & v_I \in [V_{L\,min}, V_{L\,max}] \\ regiunea_saturatie & v_I \notin [V_{L\,min}, V_{L\,max}] \end{cases}$$

Deoarece, prin introducerea componentei medii de **0.7[V]** în tensiunea de intrare, valorile instantanee ale acesteia cresc spre valori pozitive, întotdeauna valoarea tensiunii de intrare este mai mare decât limita minimă $\mathbf{V_{Lmin}}$ a regiunii liniare. Din acest motiv, tensiunea de ieşire este descrisă de următoarea relaţie:

$$v_O = \begin{cases} A_V \cdot v_I & V_{L\,min} \le v_I \le V_{L\,min} \quad regiunea_liniara \\ V_{SAT}^{+} & V_{L\,max} < v_I \quad saturatie \end{cases}$$

Aşadar:

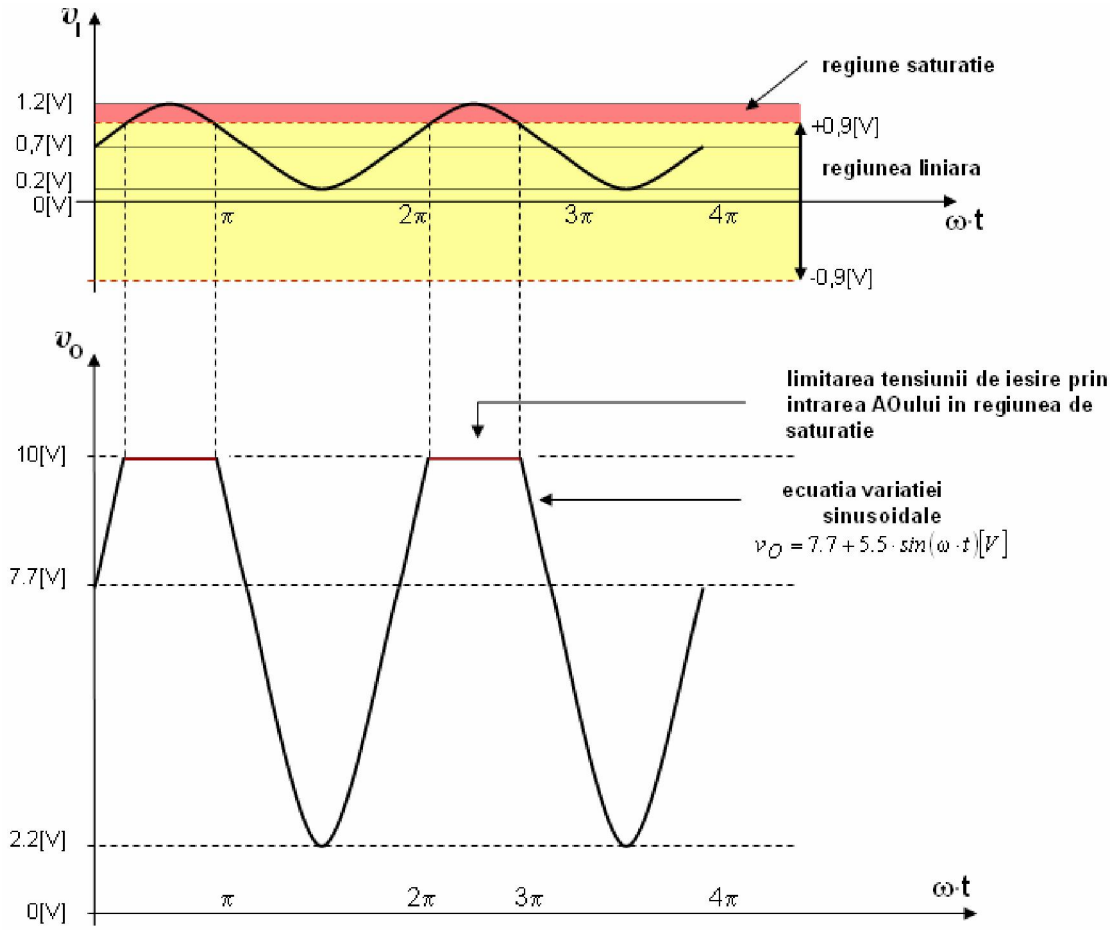
1. dacă $\mathbf{v_I \in [\ -0{,}9V\ ,\ +0{,}9V\ ]}$

Amplificatorul neinversor funcţionează în regiunea liniară, iar tensiunea de ieşire respectă relaţia:

$$v_O = +11 \cdot [0.7 + 0.5 \cdot sin(\omega \cdot t)][V] = 7.7 + 5.5 \cdot sin(\omega \cdot t)[V] \qquad v_O = 7.7 + 5.5 \cdot sin(\omega \cdot t)[V]$$

2. dacă $\mathbf{+0{,}9[V\ ] < v_I}$

$$v_O = V_{SAT}^{+} = V_{CC} - 1[V] \qquad v_O = 11[V] - 1[V] = 10[V] \qquad v_O = 10[V]$$



Formele de undă ale celor 2 tensiuni sunt indicate în figura de mai sus. După cum se observă, tensiunea de ieşire $\mathbf{v_O}$ este axată pe valoare medie egală cu 11·0.7 [V] = 7.7[V] şi respectă variaţia descrisă de expresia armonică $v_O = 7.7 + 5.5 \cdot sin(\omega \cdot t)[V]$ atît timp cât se respectă condiţia $\mathbf{v_I} \in$ **[-0,9V , +0,9V]**, după care, valoarea ei se limitează la tensiunea de saturaţie pozitivă a AOului**.**

d. Deoarece $\mathbf{V_I = 0.5\ [V]}$ rezultă că tensiunea de intrare este continuă.
Circuitul de amplificare funcţionează în regiunea liniară dacă valoarea tensiunii de intrare se află în interiorul intervalului de valori care corespunde regiunii liniare:

$$V_{L\,min} \le V_I \le V_{L\,max}$$

Se constată că este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară:

$$-0.9[V] \le +0.5[V] \le 0.9[V] \qquad adevarat$$

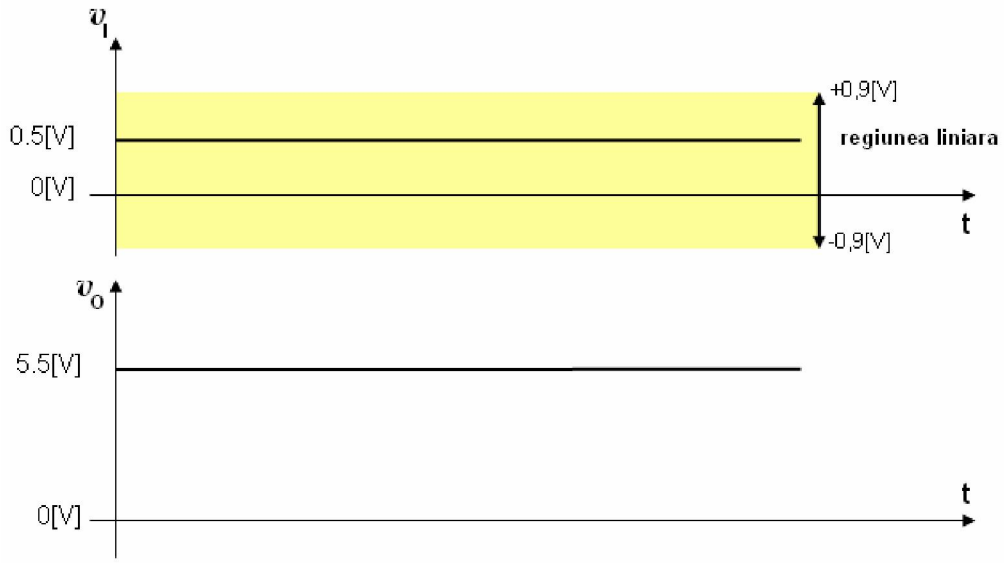
În concluzie, amplificatorul neinversor funcţionează în regiunea liniară, iar tensiunea de ieşire este descrisă de următoarea relaţie:

$$V_O = A_V \cdot V_I$$

Rezultă:

$$V_O = +11 \cdot 0.5[V] = 5.5[V] \qquad\qquad v_O = 5.5[V]$$

În figura de mai jos sunt indicate cele 2 tensiuni.



e. Deoarece $\mathbf{V_I = 1\ [V]}$ rezultă că tensiunea de intrare este continuă. Circuitul de amplificare funcţionează în regiunea liniară dacă valoarea tensiunii de intrare se află în interiorul intervalului de valori care corespunde regiunii liniare:

$$V_{L\,min} \le V_I \le V_{L\,max}$$

Se constată că NU este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară:

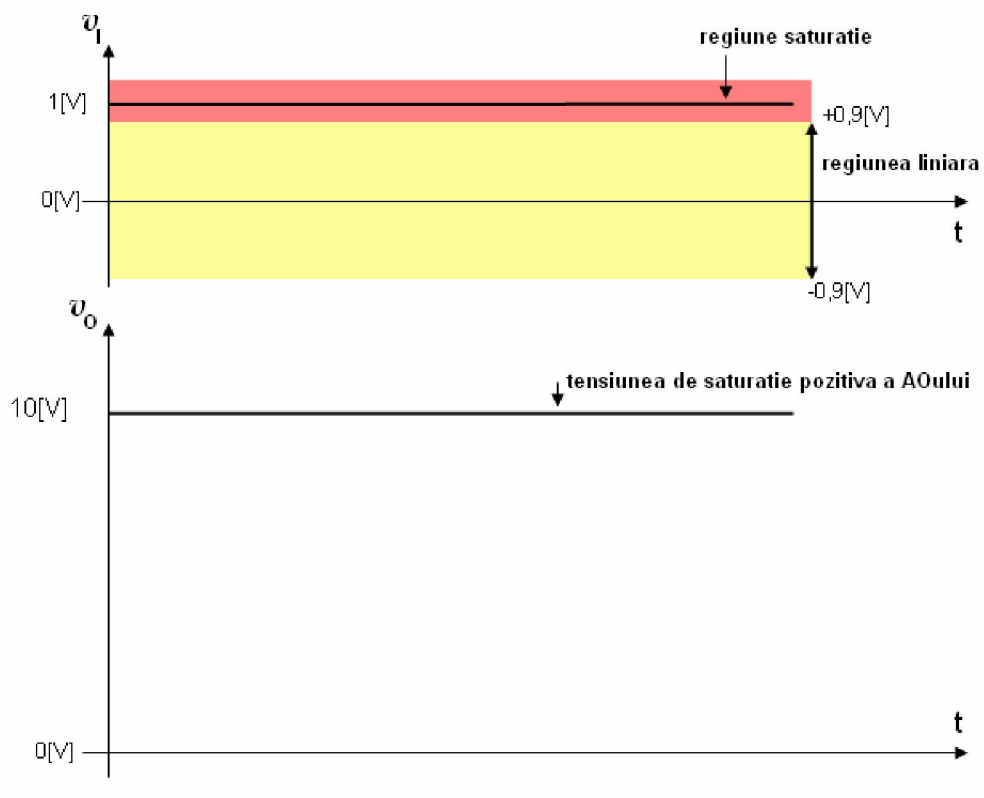
$$-0.9[V] \le +1[V] \le +0.9[V] \qquad fals$$

Rezultă că amplificatorul neinversor funcţionează în regiunea de saturaţie. Deoarece tensiunea de intrare este mai mare decât limita maximă a regiunii liniare, $V_{L\,max} < V_I$ tensiunea de ieşire este egală cu tensiunea de saturaţie pozitivă a AOului:

$$V_O = V_{SAT}^{+}$$

Rezultă: $$V_O = +11[V]$$

În figura de mai jos sunt indicate cele 2 tensiuni.

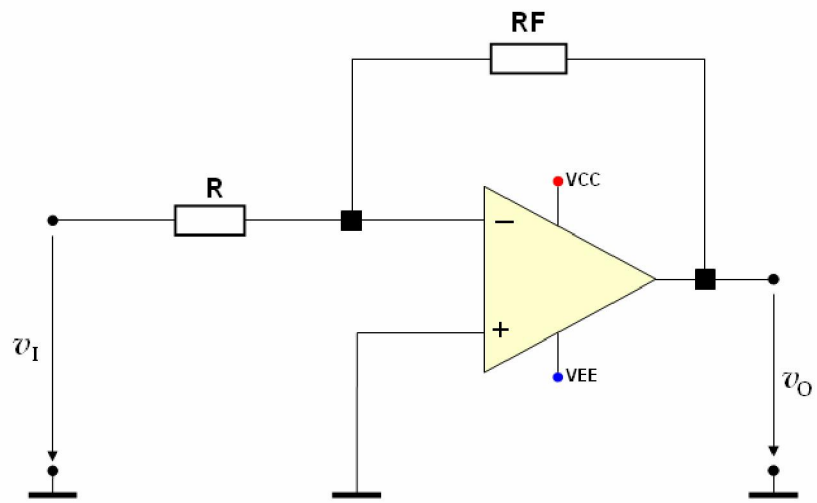


Amplificatorul inversor

Problema 3. Se consideră amplificatorul inversor din figura de mai jos, în care AOul este alimentat de la 2 surse de tensiune continuă, **V_{CC} = 11[V]** si **V_{EE} = -11[V]**, iar **RF=5[kΩ]** si **R=1[kΩ].** Să se determine tensiunea de ieşire a circuitului şi să se deseneze forma sa de undă, dacă la intrarea sa se aplică o tensiune de intrare de tipul următor:

a. $v_I(\omega \cdot t) = 1 + 0.5 \cdot \sin(\omega \cdot t)$[V] **b. $v_I(\omega \cdot t) = 3 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ [V]**

c. $v_I(\omega \cdot t) = 1+0.5 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ [V] **d. V_I = 0.5[V]** **e. V_I = 1[V]**



Rezolvare

a. Determinarea intervalului de valori a tensiunii de intrare în care circuitul de amplificare funcţionează liniar se efectuează ca în cazul problemei 1, ţinînd cont de valoarea amplificării în tensiune a circuitului.

Deci,

$$\boxed{V_{L\,max} = \frac{V_{CC} - 1[V]}{|A_V|}}$$

unde $\mathbf{A_V}$ reprezintă valoarea modulului amplificării în tensiune a amplificatorului inversor. Pentru a utiliza relaţia de mai sus, mai întâi trebuie calculată valoarea modulului amplificării în tensiune a circuitului. Deoarece circuitul de amplificare reprezintă un amplificator inversor, relaţia de calcul a amplificării în tensiune este următoarea:

$$\boxed{A_V = -\left(\frac{R_F}{R}\right)}$$

de unde, ţinând cont de datele problemei,

$$A_V = -\left(\frac{R_F}{R}\right) = +\left(\frac{5[k\Omega]}{1[k\Omega]}\right) = -5 \qquad |A_V| = 5$$

Rezultă,

$$V_{L\,max} = \frac{11[V] - 1[V]}{5} = \frac{10}{5}[V] = 2[V] \qquad V_{L\,max} = +2[V]$$

Deoarece $|V_{EE}| = V_{CC}$ $\qquad V_{L\,min} = -2[V]$

Deci, domeniul de valori a tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ pentru care circuitul de amplificare funcţionează liniar este:

$$\mathbf{v_I \in [\,-2V\,,\,+2V\,]}$$

Pentru ca amplificatorul operaţional să funcţioneze în regiunea liniară este necesar să fie îndeplinită condiţia,

$$\boxed{v_{Im\,in} > V_{L\,min} \quad si \quad v_{Im\,ax} < V_{L\,max}}$$

condiţia ca circuitul de amplificare să lucreze în regiunea liniară, pentru cazul în care v_I este variabilă în timp

în caz contrar, circuitul de amplificare funcţionează în regiunea de saturaţie.

Deoarece $\mathbf{v_I\,(\omega \cdot t) = 1 + 0.5 \cdot \sin(\omega \cdot t)\ [V]}$ rezultă că tensiunea de intrare are o formă de undă sinusoidală axată pe valoarea medie **1[V]**. Din acest motiv, valoarea minimă, respectiv maximă a acestei tensiuni este

$$v_{Im\,in} = 1 - 0.5[V] = 0.5[V] \qquad v_{Im\,ax} = 1 + 0.5[V]$$

$$v_{Im\,in} = +0.5[V] \qquad v_{Im\,ax} = +1.5[V]$$

Prin compararea acestor valori cu valorile limită ale regiunii liniare ale circuitului de amplificare,

$$V_{L\,min} = -2[V] \qquad\qquad V_{L\,max} = +2[V]$$

se constată că este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară:

$$v_{Imin} > V_{L\,min} \quad +0.5[V] > -2[V] \quad adevarat$$
$$v_{Imax} < V_{L\,max} \quad +1.5[V] < +2[V] \quad adevarat$$

deci, AOul funcţionează în regiunea liniară, şi în acest caz, expresia tensiunii de ieşire este următoarea:

$$v_O = A_V \cdot v_I$$

unde $\mathbf{A_V}$ reprezintă valoarea amplificării în tensiune a circuitului de amplificare,

$$A_V = -5$$

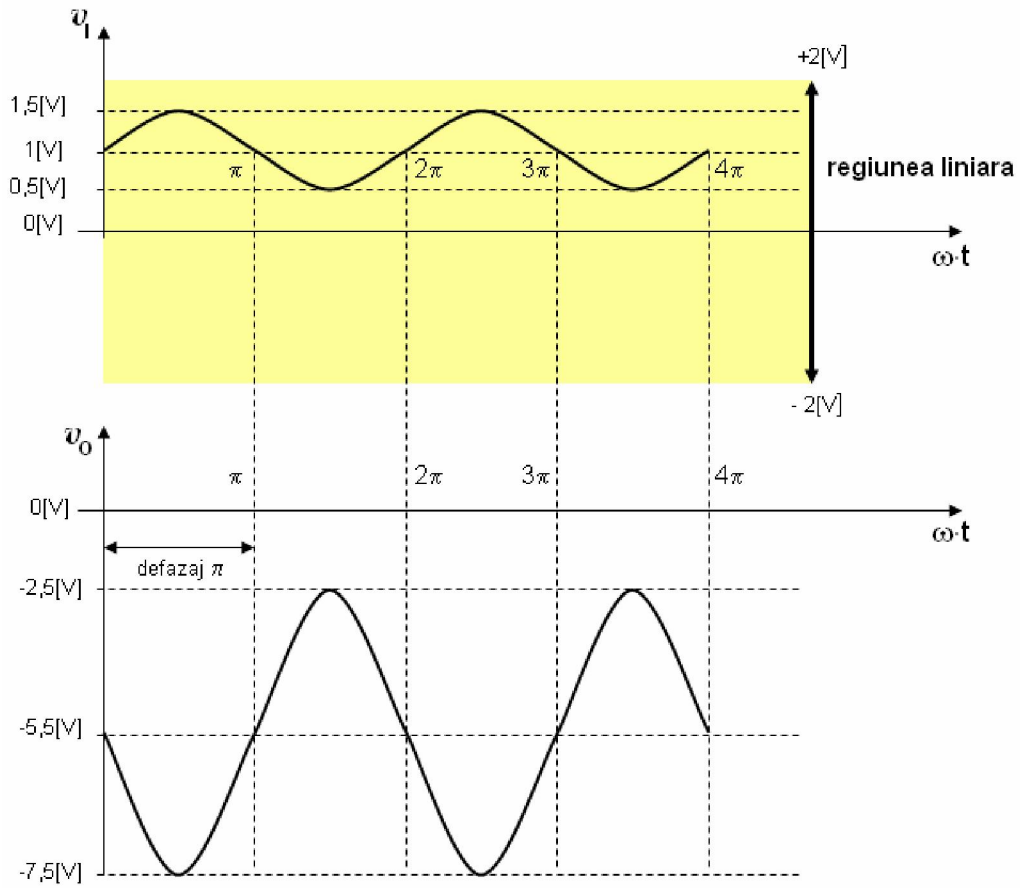
În relaţia de mai sus, semnul "-" indică un defazaj de **180^0** între tensiunea de ieşire şi cea de intrare, iar valoarea **5** indică modulul amplificării în tensiune.

Rezultă,

$$v_O = -5 \cdot [1 + 0{,}5 \cdot sin(\omega \cdot t)][V] = -5 - 2{,}5 \cdot sin(\omega \cdot t)[V] = -5 + 2{,}5 \cdot sin(\omega \cdot t + \pi)[V]$$

$$v_O = -5 + 2{,}5 \cdot sin(\omega \cdot t + \pi)[V]$$

Formele de undă ale celor 2 tensiuni sunt indicate mai jos.



Din forma de undă a tensiunii de ieşire se observă efectul amplificatorului inversor:

- inversează valoarea componentei continue (valoare medie) a unui semnal: valoarea medie a tensiunii de ieşire rezultă negativă;
- defazează cu π componenta variabilă a unui semnal (variaţia sinusoidală a acestuia).

b. Deoarece $\mathbf{v_I}$ **(ω·t) = 3 · sin (ω·t) [V]** rezultă că tensiunea de intrare are o formă de undă sinusoidală axată pe valoarea medie **0[V]**. Din acest motiv, valoarea minimă, respectiv maximă a acestei tensiuni este

$$v_{Imin} = -3[V] \qquad v_{Imax} = +3[V]$$

Prin compararea acestor valori cu valorile limită ale regiunii liniare ale circuitului de amplificare,

$$V_{Lmin} = -2[V] \qquad V_{Lmax} = +2[V]$$

se constată că NU este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară:

$$\begin{array}{lll} v_{Imin} > V_{Lmin} & -3[V] > -2[V] & fals \\ v_{Imax} < V_{Lmax} & +3[V] < +2[V] & fals \end{array}$$

În concluzie, amplificatorul inversor introduce distorsiuni, iar tensiunea de ieşire, este descrisă de următoarea relaţie:

$$v_O = \begin{cases} A_V \cdot v_I & V_{Lmin} \le v_I \le V_{Lmin} & regiunea_liniara \\ V_{SAT}^- & V_{Lmax} < v_I & saturatie \\ V_{SAT}^+ & v_I < V_{Lmin} & saturatie \end{cases}$$

Aşadar:

1. dacă $\mathbf{v_I} \in$ **[-2V , +2V]**

Amplificatorul inversor funcţionează în regiunea liniară, iar tensiunea de ieşire respectă relaţia:

$$v_O = -5 \cdot [3 \cdot sin(\omega \cdot t)][V] = -15 \cdot sin(\omega \cdot t)[V] = 15 \cdot sin(\omega \cdot t + \pi)[V] \qquad v_O = 15 \cdot sin(\omega \cdot t + \pi)[V]$$

2. dacă **+2[V] <** $\mathbf{v_I}$

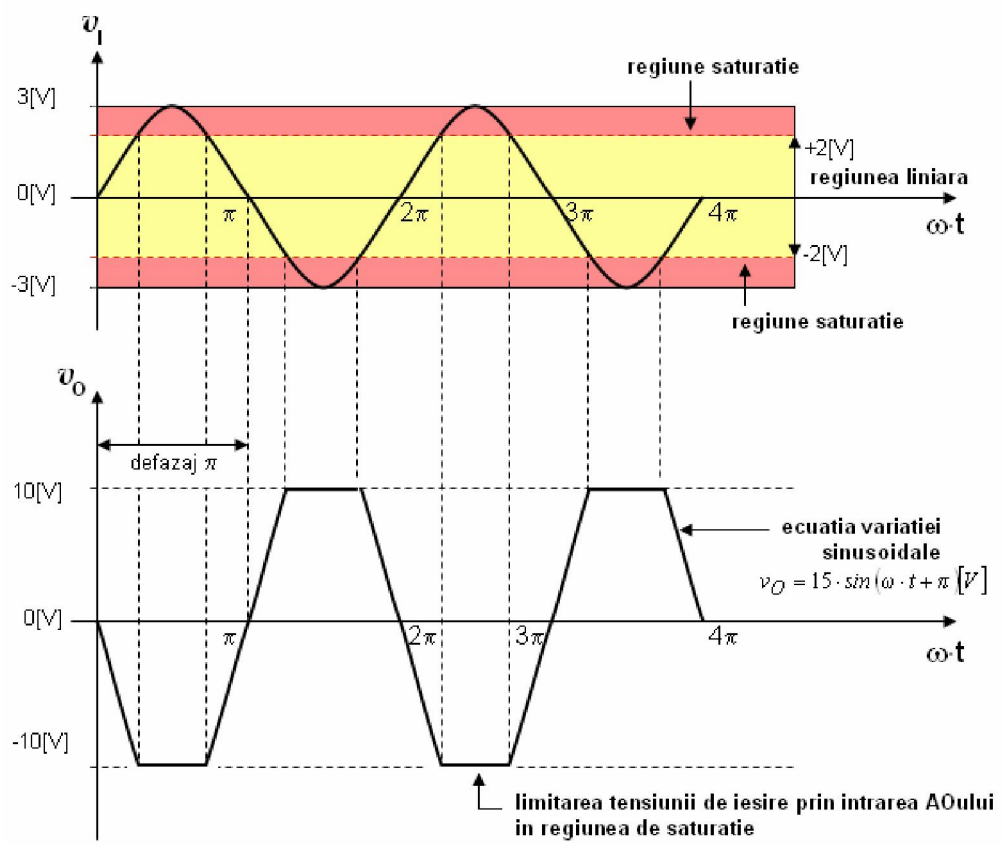
$$v_O = V_{SAT}^- = V_{EE} + 1[V] \qquad v_O = -11[V] + 1[V] = -10[V] \qquad v_O = -10[V]$$

3. dacă $\mathbf{v_I}$ **< - 2[V]**

$$v_O = V_{SAT}^+ = V_{CC} - 1[V] \qquad v_O = 11[V] - 1[V] = 10[V] \qquad v_O = +10[V]$$

Formele de undă ale celor 2 tensiuni sunt indicate în figura de mai jos. După cum se observă, tensiunea de ieşire $\mathbf{v_O}$ respectă variaţia descrisă de expresia armonică $v_O = 15 \cdot sin(\omega \cdot t + \pi)[V]$ atît

timp cât se respectă condiţia $\mathbf{v_I} \in$ **[-2V , +2V]**, după care, valoarea ei se limitează la una din tensiunile de saturaţie ale AOului, în funcţie de semnul lui $\mathbf{v_I}$.



c. Deoarece $\mathbf{v_I}$ **(ω·t) = -1.5 + 1 · sin (ω·t) [V]** rezultă că tensiunea de intrare are o formă de undă sinusoidală axată pe valoarea medie **-1.5[V]**. Din acest motiv, valoarea minimă, respectiv maximă a acestei tensiuni este

$$v_{Imin} = -1.5 - 1[V] = -2.5[V] \qquad v_{Imax} = -1.5 + 1[V] = -0.5[V]$$

$$v_{Imin} = -2.5[V] \qquad v_{Imax} = -0.5[V]$$

Prin compararea acestor valori cu valorile limită ale regiunii liniare ale circuitului de amplificare,

$$V_{Lmin} = -2[V] \qquad V_{Lmax} = +2[V]$$

se constată că NU este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară (una din condiţii este falsă):

$$v_{Imin} > V_{Lmin} \quad -2.5[V] > -2[V] \quad fals$$
$$v_{Imax} < V_{Lmax} \quad -0.5[V] < +2[V] \quad adevarat$$

Amplificatorul inversor introduce distorsiuni. Deoarece, prin introducerea componentei medii de **-1.5[V]** în tensiunea de intrare, valorile instantanee ale acesteia scad spre valori negative, întotdeauna valoarea tensiunii de intrare este mai mică decât limita maximă $\mathbf{V_{Lmax}}$ a regiunii liniare. Din acest motiv, tensiunea de ieşire este descrisă de următoarea relaţie:

$$v_O = \begin{cases} A_V \cdot v_I & V_{L\,min} \le v_I \le V_{L\,min} \quad regiunea_liniara \\ V_{SAT}^{+} & v_I < V_{L\,min} \quad saturatie \end{cases}$$

Aşadar:

1. dacă $\mathbf{v_I} \in$ **[-2V , +2V]**

Amplificatorul inversor funcţionează în regiunea liniară, iar tensiunea de ieşire respectă relaţia:

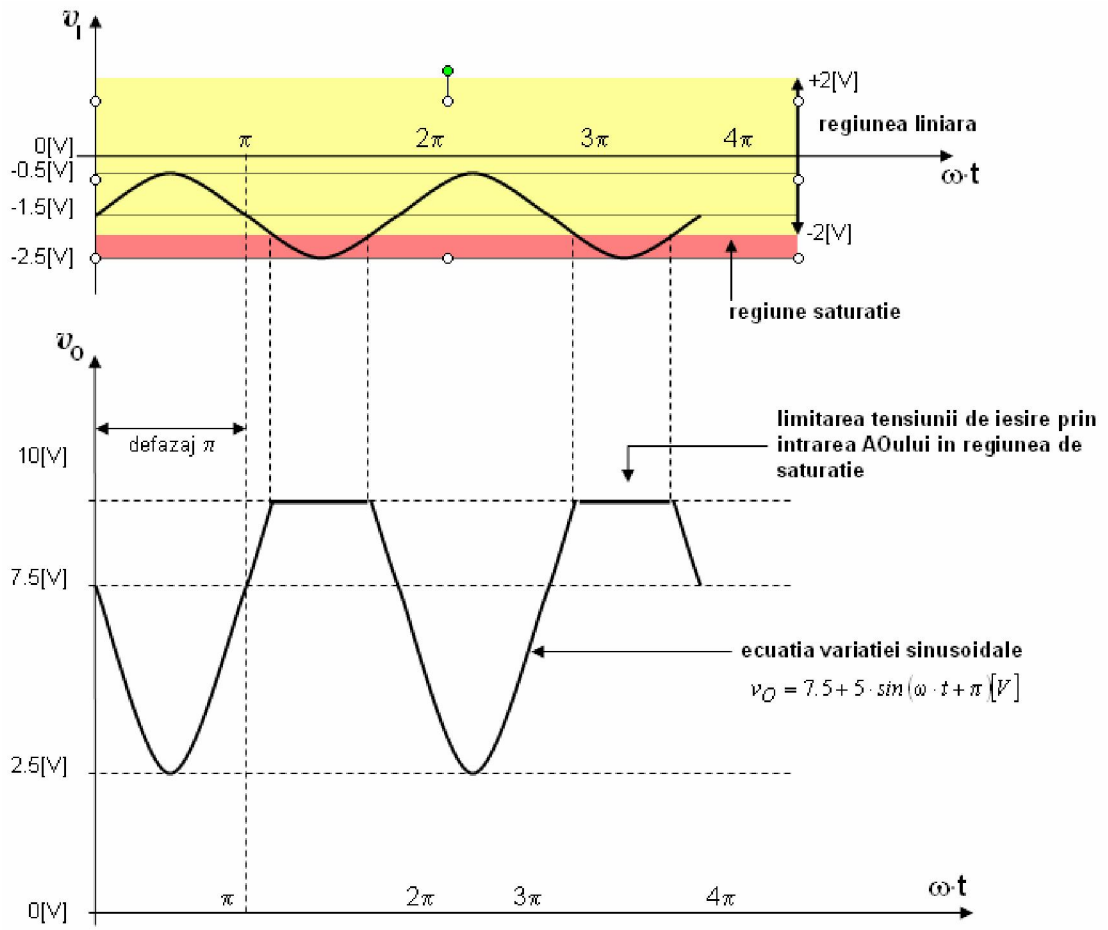
$$v_O = -5 \cdot [-1.5 + 1 \cdot sin(\omega \cdot t)][V] = 7.5 - 5 \cdot sin(\omega \cdot t)[V] = 7.5 + 5 \cdot sin(\omega \cdot t + \pi)[V]$$

$$v_O = 7.5 + 5 \cdot sin(\omega \cdot t + \pi)[V]$$

2. dacă $\mathbf{v_I} <$ **-2[V]**

$$v_O = V_{SAT}^{+} = V_{CC} - 1[V] \qquad v_O = 11[V] - 1[V] = 10[V] \qquad v_O = 10[V]$$

Formele de undă ale celor 2 tensiuni sunt indicate în figura de mai jos. După cum se observă, tensiunea de ieşire $\mathbf{v_O}$ este axată pe valoare medie egală cu -5·(-1.5) [V] = +7.5[V] şi respectă variaţia descrisă de expresia armonică $v_O = 7.5 + 5 \cdot sin(\omega \cdot t + \pi)[V]$ atît timp cât se respectă condiţia $\mathbf{v_I} \in$ **[-2V , +3V]**, după care, valoarea ei se limitează la tensiunea de saturaţie pozitivă a AOului**.**



d. Deoarece $\mathbf{V_I = 1\ [V]}$ rezultă că tensiunea de intrare este continuă. Circuitul de amplificare funcţionează în regiunea liniară dacă valoarea tensiunii de intrare se află în interiorul intervalului de valori care corespunde regiunii liniare:

$$V_{L\,min} \le V_I \le V_{L\,max}$$

Se constată că este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară:

$$-2[V] \le +1[V] \le +2[V] \qquad adevarat$$

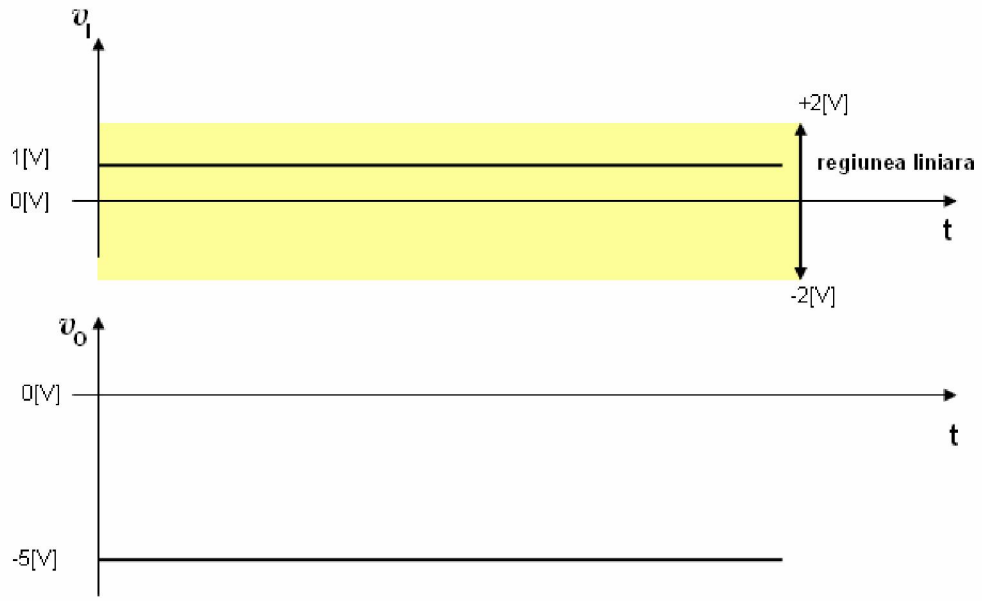
În concluzie, amplificatorul inversor funcţionează în regiunea liniară, iar tensiunea de ieşire este descrisă de următoarea relaţie:

$$V_O = A_V \cdot V_I$$

Rezultă:

$$V_O = -5 \cdot 1[V] = -5[V] \qquad\qquad v_O = -5[V]$$

În figura de mai jos sunt indicate cele 2 tensiuni. Se observă efectul amplificatorului inversor asupra tensiunii de ieşire (tensiunea de ieşire are semnul inversat faţă de tensiunea de intrare).



e. Deoarece $\mathbf{V_I = 5\ [V]}$ rezultă că tensiunea de intrare este continuă. Circuitul de amplificare funcţionează în regiunea liniară dacă valoarea tensiunii de intrare se află în interiorul intervalului de valori care corespunde regiunii liniare:

$$V_{L\,min} \le V_I \le V_{L\,max}$$

Se constată că NU este satisfăcută condiţia ca circuitul de amplificare să funcţioneze în regiunea liniară:

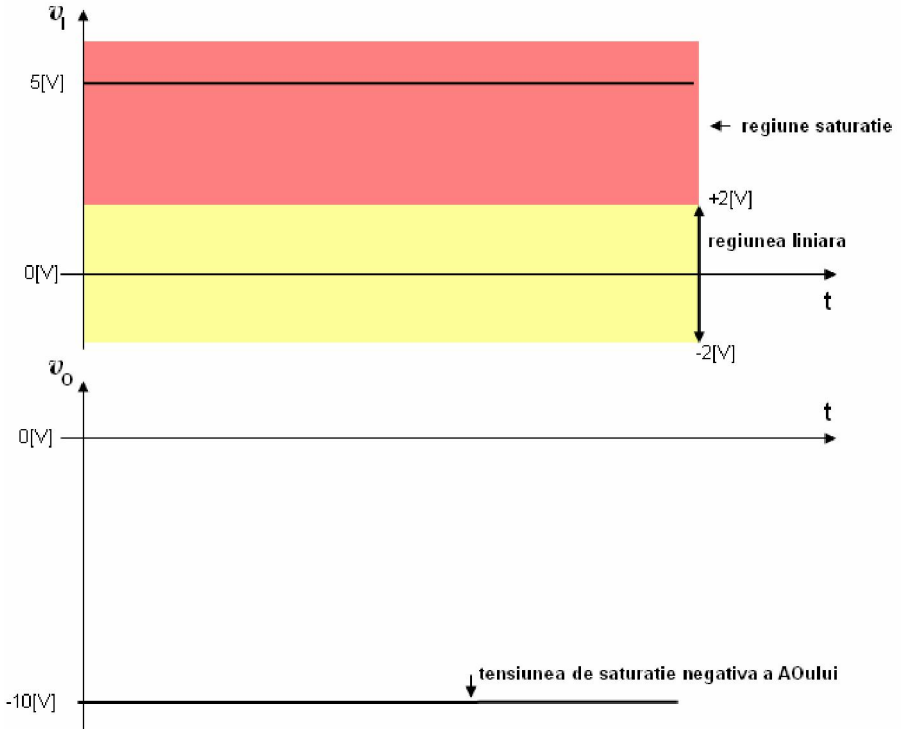
$$-2[V] \le +5[V] \le +2[V] \qquad fals$$

Rezultă că amplificatorul neinversor funcţionează în regiunea de saturaţie. Deoarece tensiunea de intrare este mai mare decât limita maximă a regiunii liniare,

$$V_{L\,max} < V_I$$

Tensiunea de ieşire este egală cu tensiunea de saturaţie negativă a AOului:

$$V_O = V_{SAT}^{-}$$

Rezultă: $$V_O = -10[V]$$

În figura de mai jos sunt indicate cele 2 tensiuni.