I. Extinderea regiunii liniare de funcţionare prin introducerea amplificatorului operaţional într-o buclă de reacţie negativă

Un amplificator operaţional are o amplificare în tensiune foarte mare, de ordinul sutelor de mii, numită şi amplificare în buclă deschisă, notată $\mathbf{A_{VAO}}$. Deoarece amplificarea în tensiune a amplificatorului operaţional este foarte mare, domeniul de valori ale tensiunii de intrare diferenţiale în care amplificatorul operaţional lucrează în regiunea liniară este extrem de mic, de ordinul milivolţilor, în jurul valorii de **0** volţi. Astfel, de îndată ce tensiunile aplicate pe cele 2 intrări diferă doar cu câţiva milivolţi, AOul intră în regiunea de saturaţie, iar tensiunea de la ieşirea acestuia se stabileşte, în funcţie de semnul tensiunii de intrare diferenţială $\mathbf{v_{ID}}$, la o valoare egală cu una din cele 2 tensiuni de saturaţie, $\mathbf{V_{SAT}^{+}}$, respectiv tensiune de saturaţie negativă $\mathbf{V_{SAT}^{-}}$, aşa cum este sugerat şi de caracteristica de funcţionare a AOului, amintită în Figura 1.

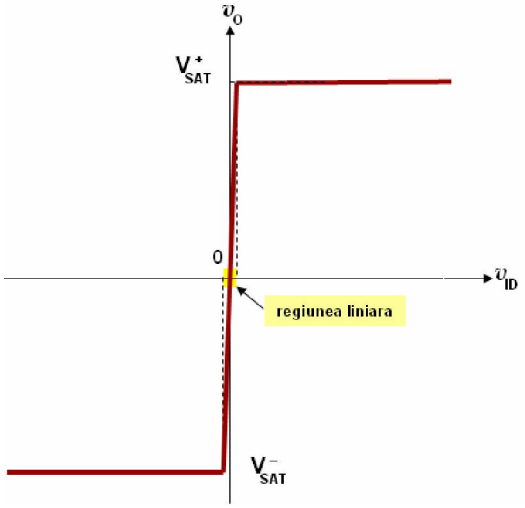


Figura 1. Caracteristica de transfer (de funcţionare) a AO-ului.

În circuitele practice, datorită semnalelor parazite întotdeauna prezente pe cele 2 intrări ale AOului, tensiunea de intrare diferenţială $\mathbf{v_{ID}}$ a acestuia are o valoare mai mare decât câţiva milivolţi, iar AOul funcţionează practic întotdeauna în regiunea de saturaţie.

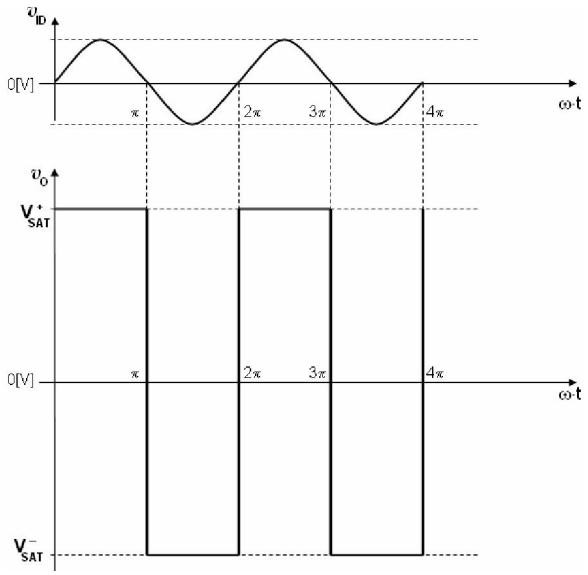


Figura 2. Distorsionarea formei de undă a tensiunii de ieşire a AOului prin intrarea acestuia în regiunea de saturaţie.

Din acest motiv, amplificatorul operaţional **distorsionează puternic forma de undă** a semnalului aplicat la intrare sa. De exemplu, pentru un circuit cu un amplificator operaţional, dacă tensiunea de intrare $\mathbf{v_{ID}}$ este sinusoidală şi are componenta medie egală cu **0[V]**, atunci, conform caracteristicii de transfer a amplificatorului operaţional, dacă $\mathbf{v_{ID} > 0}$ => $\mathbf{v_O = V_{SAT}^{+}}$, iar dacă $\mathbf{v_{ID} < 0}$ => $\mathbf{v_O = V_{SAT}^{-}}$, deci ieşirea amplificatorului operaţional basculează între 2 valori discrete şi în consecinţă forma de undă a semnalui de ieşire este dreptunghiulară. Aşa cum se prezintă în Figura 2.

Semnalul de la ieşirea amplificatorului operaţional rezultă nedistorsionat numai dacă variaţia tensiunii de intrare diferenţială este suficient de mică, astfel încât funcţionarea amplificatorului operaţional să fie permanent plasată în regiunea de funcţionare liniară. Numai în regiunea liniară de funcţionare a AO-ului, tensiunea de la ieşirea sa este direct proporţională cu tensiunea de intrare diferenţială:

$$v_O = tg\alpha \cdot v_{ID}$$

Din caracteristica de transfer a AO-ului, se remarcă faptul că, pentru ca un AO să lucreze în regiunea liniară, valoarea tensiunii $\mathbf{v_{ID}}$ trebuie să fie extrem de mică, de ordinul **[mV]**. În aplicaţiile practice, este extrem de dificil ca informaţia utilă să fie reprezentată prin intermediul unei tensiuni a cărei variaţie se încadrează în câţiva milivolţi deoarece aceasta ar fi "înecată" în semnalele parazite despre care s-a amintit (semnalul parazit se suprapune peste cel util şi dacă ambele au aceeaşi variaţie, atunci semnalul util se pierde în cel parazit). În consecinţă, aşa cum s-a precizat, utilizarea unui AO în buclă deschisă ca amplificator de semnale nu este recomandată, întrucât distorsionează informaţia. Din acest motiv, este necesară extinderea domeniului de valori a tensiunii de intrare diferenţiale $\mathbf{v_{ID}}$ în care AO-ul să funcţioneze liniar.

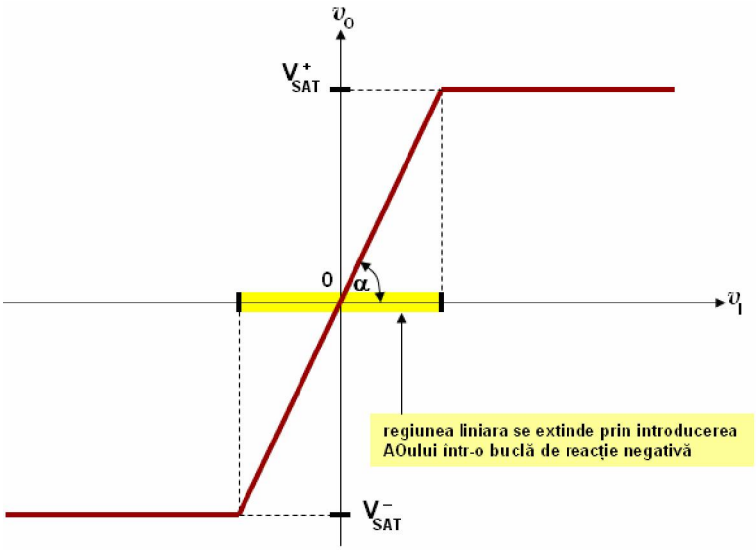


Figura 3. Caracteristica de transfer a circuitului cu AO introdus într-o buclă cu reacţie negativă: extinderea domeniului lui $\mathbf{v_I}$ în care circuitul funcţionează liniar.

Soluţia pentru problema descrisă mai sus constă în **introducerea AO-ului într-o buclă de reacţie negativă.** Un circuit conţine o buclă de reacţie dacă ieşirea sa este conectată la una din intrările sale. Reacţia poate fi pozitivă, sau negativă. O bucla de reacţie este negativă dacă introduce un defazaj de $\mathbf{180^0}$.

Amplificarea în tensiune a unui circuit cu AO introdus într-o buclă cu reacţie negativă se modifică la o valoare notată $\mathbf{A_V}$**,** mult mai mică decât valoarea amplificării în tensiune $\mathbf{A_{VAO}}$ a AOului şi din acest motiv domeniul de valori al tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ a circuitului cu AO în care acesta

funcţionează liniar se extinde, deoarece valoarea **tgα,** care este egală cu amplificarea în tensiune $\mathbf{A_V}$ se reduce şi astfel, unghiul α se reduce, iar regiunea liniară se extinde, aşa cum se observă şi din Figura 3.

Astfel, în cazul în care variaţia tensiunii $\mathbf{v_I}$ de intrare a circuitului nu depăşeşte domeniul de valori care corespunde domeniului liniar, semnalele din circuit nu se distorsionează prin intrarea în saturaţie a AO-ului.

II. Modelul ideal al amplificatoarelor operaţionale

Datorită caracteristicilor sale, AO-ul poate fi modelat prin intermediul unui amplificator de tensiune ideal. Din acest motiv, AO-ul se poate considera un element de circuit liniar, care are rezistenţa de intrare $\mathbf{R_{iAO}}$ de valoare infinită şi rezistenţa de ieşire $\mathbf{R_{oAO}}$ de valoare zero:

$$R_{iAO} = \infty \quad R_{oAO} = 0 \qquad 1.a$$

Datorită rezistenţei de intrare de valoare infinită, curenţii de intrare ai AO-ului ($\mathbf{i^+}$ şi $\mathbf{i^-}$ sunt egali cu zero).

$$i^+ = 0 \quad si \quad i^- = 0 \qquad 1.b$$

Fiind un amplificator de tensiune ideal, amplificarea în tensiune a AO-ului se consideră infinită:

$$A_{VAO} = \infty \qquad 1.c$$

Grupul de ecuaţii 1 reprezintă ecuaţiile care modelează comportamentul unu amplificator operaţional ideal şi sunt utilizate în mod uzual în analiza circuitelor electronice care conţin amplificatoare operaţionale.

III. Metoda de analiză a circuitelor de amplificare cu amplificatoare operaţionale

Circuitele de amplificare preiau un semnal la bornele lor de intrare şi furnizează la bornele de ieşire semnalul respectiv, amplificat şi nedistorsionat. Evitarea introducerii distorsiunilor în forma de undă a semnalului de ieşire se poate realiza prin menţinerea amplificatorului în regiunea de funcţionare liniară.

Aşa cum s-a prezentat în paragraful precedent, în cazul unui circuite care conţine AOuri, pentru evitarea distorsiunilor, este necesară introducerea în circuitul respectiv a unei bucle de reacţie negativă, pentru extinderea domeniului de valori ale tensiunii de intrare, care corespunde regiunii liniare de funcţionare.

În acest scop, toate circuitele de amplificare care urmează a fi prezentate conţin un rezistor de reacţie notat generic $\mathbf{R_F}$, conectat între ieşirea AO-ului şi intrarea sa inversoare. Acest rezistor introduce o reacţie negativă în circuitul de amplificare. Astfel, atât timp cât variaţia maximă a tensiunii de intrare $\mathbf{v_I}$ a circuitului nu depăşeşte domeniul de valori care corespunde regiunii liniare, circuitul de amplificare nu va distorsiona la ieşirea sa forma de undă a tensiunii aplicate la intrare.

Pe lângă alte multe avantaje, care constau în creşterea performanţelor circuitului de amplificare, introducerea reacţiei negative în circuitul de amplificare are drept rezultat şi posibilitatea obţinerii unui factor de amplificare în tensiune independent de factorul de amplificare în buclă deschisă al AO-ului $\mathbf{A_{VAO}}$. Prin introducerea reacţiei negative, factorul de amplificare în tensiune al circuitului de amplificare va depinde numai de componentele circuitului, care, aşa cum se va remarca, sunt constituite dintr-un grup de rezistoare externe AO-ului. Avantajul acestei soluţii constă în posibilitatea controlului valorii factorului de amplificare în tensiune al circuitului de amplificare, în funcţie de

cerinţele de proiectare (se reaminteşte că valoarea parametrului $\mathbf{A_{VAO}}$ este stabilită la fabricarea AO-ului, proiectantul de sisteme electronice neavând posibilitatea să modifice ulterior această valoare).

Analiza circuitelor cu reacţie negativă care conţin AO-uri se desfăşoară parcurgând o serie de etape, stabilte într-o anumită ordine. Etapele care sunt parcurse în cadrul acestei analize sunt următoarele:

1. Se scot în evidenţă toate nodurile de circuit în care sunt conectate intrările AO-urilor.
2. Se exprimă curenţii electrici prin rezistoarele circuitului, pe baza unui număr minim de necunoscute. În acest scop, se va aplicat TK1 in fiecare nod în care sunt conectate intrările A.O-urilor şi se va ţine cont de relaţia 2.a:

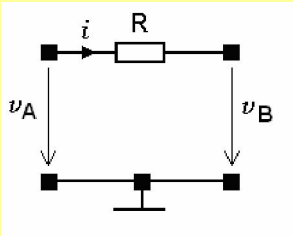
$$i^{+} = 0 \quad si \quad i^{-} = 0 \qquad 2.a$$

3. Se exprimă potenţialul electric în toate nodurile în care sunt conectate cele 2 intrări ale A.O-urilor. În mod excepţional, pentru această analiză, în cazul în care o intrare a unui AO este conectată la o sursă independentă de tensiune, punctul de intersecţie al AO-ului cu terminalul sursei se va considera nod de circuit. În cadrul acestui pas, se va ţine cont de faptul că, dacă un AO are reacţie negativă, tensiunile de pe bornele sale de intrare sunt egale. Astfel, pentru fiecare nod de circuit în care sunt conectate aceste intrări, se va ţine cont de relaţia 2.b:

$$v_I^{+} = v_I^{-} \qquad 2.b$$

4. Pentru determinarea relaţiilor de legătură dintre mărimile electrice din circuit (potenţialul electric în nodurile circuitului, curentul electric prin rezistoarele circuitului) se vor utiliza relaţii de tipul 2.c, deduse pentru ramuri de tipul celui prezentat în figura de mai jos:

$$i = \frac{v_A - v_B}{R} \qquad 2.c$$



IV. Amplificatorul neinversor

Amplificatorul neinversor are structura indicată în figura de mai jos. La borna de intrare neinversoare a AOului se aplică o tensiune de intrare notată $\mathbf{v_I}$, care urmează a fi amplificată de către circuit. Rezultatul amplificării tensiunii $\mathbf{v_I}$ este furnizat la borna de ieşire a AOului, sub forma tensiunii de ieşire $\mathbf{v_O}$.

Pentru ca amplificatorul să funcţioneze, este necesar ca la cele 2 borne de alimentare ale Aoului să se aplice 2 surse de tensiune continuă, care furnizează AOului energia electrică necesară amplificării tensiunii de intrare.

Reacţia negativă este realizată prin intermediul rezistorului de reacţie $\mathbf{R_F}$, conectat între ieşirea AOului şi intrarea sa inversoare. Elementul de circuit care asigură funcţia de amplificare este amplificatorul operaţional, dar, aşa cum s-a precizat în paragraful anterior, prin introducerea rezistorului de reacţie $\mathbf{R_F}$ în circuit, valoarea factorului de amplificare în tensiune al circuitului de amplificare, notat în acest caz cu $\mathbf{A_V}$, nu mai depinde de amplificatorul operaţional (nu mai depinde de parametrul $\mathbf{A_{VAO}}$ al amplificatorului operaţional). Rezistoarele **R** şi $\mathbf{R_F}$ au rolul de a stabili valoarea factorului de amplificare în tensiune $\mathbf{A_V}$ a circuitului de amplificare.

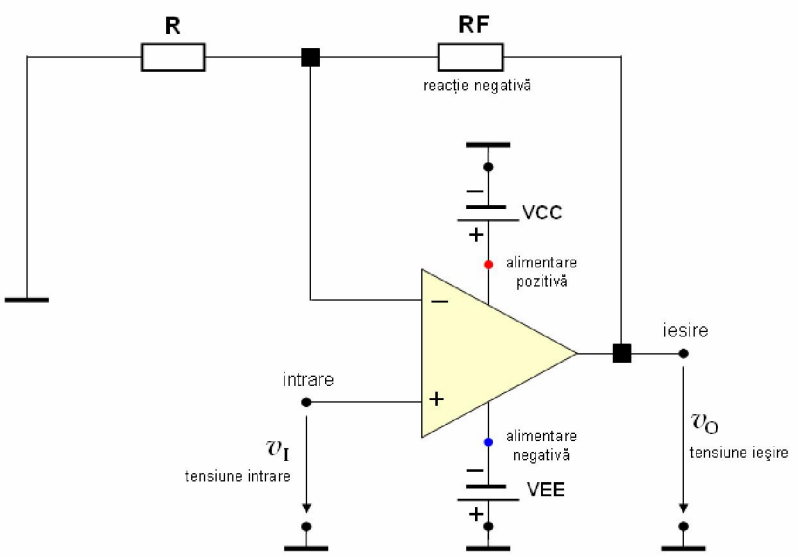


Figura 4. Amplificatorul neinversor.

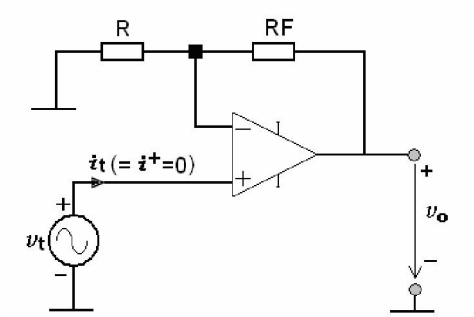
Observaţie: În toate circuitele cu AO care urmează a fi prezentate în continuare, pentru simplificarea schemelor electronice respective, cele 2 surse de tensiune contiune (de alimentare) nu se vor mai desena, subînţelegându-se că acestea sunt conectate în circuit (în absenţa lor circuitul respectiv nu funcţionează); astfel, se vor desena în următoarele figuri doar bornele de semnal (de intrare, respectiv de ieşire). Pentru toate circuitele care urmează a fi analizate, $\mathbf{v_I}$ reprezintă tensiunea care se aplică la bornele/borna de intrare ale/a circuitului, iar $\mathbf{v_O}$ este tensiunea care rezultă la borna de ieşire a acestuia.

În continuare se vor determina următorii parametri ai amplificatorului neinversor:

- rezistenţa de intrare
- rezistenţa de ieşire
- factorul de amplificare în tensiune

Rezistenţa de intrare: se determină pe un circuit de calcul, obţinut prin aplicarea, între bornele de intrare ale circuitului, a unui generator de tensiune variabilă $\mathbf{v_t}$, care furnizează în circuit un curent $\mathbf{i_t}$; rezistenţa de intrare a circuitului se determină pe baza formulei generale:

$$R_i = \frac{v_t}{i_t}$$



Circuitul de calcul al rezistenţei de intrare a amplificatorului neinversor.

Deoarece curentul $\mathbf{i_t}$ este chiar curentul de intrare în borna neinversoare a AO-ului, curent care are, conform modelului ideal al AOului valoarea zero ($\mathbf{i}^+=0$), rezultă că rezistenţa de intrare în amplificator este infinită:

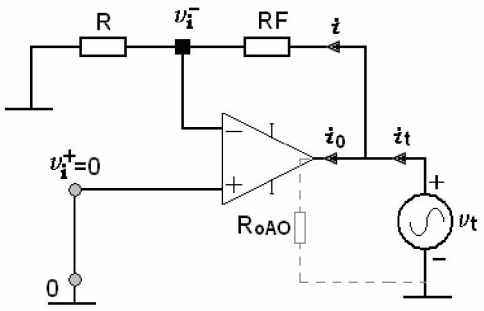
$$R_i = \frac{v_t}{0}$$

$$R_i = \infty \qquad 3$$

Deoarece amplificatorul are o rezistenţă de intrare infinită, pierderile de tensiune la bornele sale de intrare sunt nule.

Rezistenţa de ieşire: se determină pe un circuit de calcul, obţinut prin scurtcircuitarea bornelor de intrare ale amplificatorului (conectarea împreună printr-un fir) şi aplicarea între bornele de ieşire ale amplificatorului a unui generator de tensiune variabilă $\mathbf{v_t}$, care furnizează în circuit un curent $\mathbf{i_t}$; rezistenţa de ieşire se determină pe baza formulei:

$$R_i = \frac{v_t}{i_t} \quad \text{cu} \quad v_I = 0$$



Circuitul de calcul al rezistenţei de ieşire a amplificatorului neinversor.

Mai întâi, se notează curentul prin $\mathbf{R_F}$ cu $\mathbf{i}$, apoi se aplică TK1 în nodul de la ieşirea circuitului, de unde rezultă:

$$i_t = i_O + i$$

În continuare, se vor determina curenţii $\mathbf{i_O}$ şi $\mathbf{i}$ în funcţie de tensiunea $\mathbf{v_t}$. Deoarece amplificatorul operaţional are o rezistenţă de ieşire, care este sugerată punctat în circuitul de calcul şi notată $\mathbf{R_{oAO}}$, aplicând legea lui Ohm pe această rezistenţă, se constată că:

$$v_t = i_O \cdot R_{oAO}$$

Deoarece amplificatorul are reacţie negativă prin $\mathbf{R_F}$, rezultă că $v_I^+ = v_I^-$

Dar, deoarece intrarea neinversoare este conectată la masă, rezultă că $v_I^+ = 0$

Deci, $v_I^- = 0$

Aplicând legea lui Ohm pe $\mathbf{R_F}$ rezultă că: $i = \frac{v_t - v_I^-}{R_F} = \frac{v_t - 0}{R_F} = \frac{v_t}{R_F}$

Introducând expresiile curenţilor $\mathbf{i_O}$ şi $\mathbf{i}$ în relaţia de calcul a curentului $\mathbf{i_t}$ de mai sus rezultă că rezistenţa de ieşire a amplificatorului este:

$$R_o = \frac{R_{oAO} \cdot R_F}{R_{oAO} + R_F}$$

Deoarece, pentru valoari uzuale ale lui $\mathbf{R_F}$, rezistenţa amplificatorului operaţional este mult mai mică decât $\mathbf{R_F}$ ($\mathbf{R_{oAO}}$ este considerată ca fiind zero în modelul ideal al AOului), relaţia de mai sus se poate simplifica, iar rezistenţa de ieşire a amplificatorului neinversor se poate aproxima ca fiind egală cu $\mathbf{R_{oAO}}$, adică, conform modelului ideal al AOului, egală cu zero:

$$R_o = 0 \qquad 4$$

Deoarece amplificatorul are o rezistenţă de ieşire nulă, pierderile de tensiune la bornele sale de ieşire sunt nule.

Factorul de amplificare în tensiune $\mathbf{A_V}$ al amplificatorului este definit prin relaţia de mai jos.

$$A_V = \frac{v_O}{v_I}$$

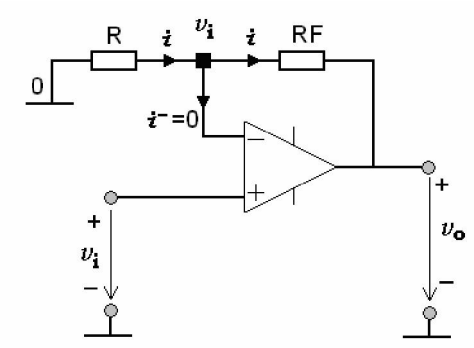
În urma calculelor, rezultă că amplificarea în tensiune $\mathbf{A_V}$ a amplificatorului se poate determina cu relaţia de mai jos:

$$\boxed{A_V = +\left(1 + \frac{R_F}{R}\right)} \qquad 5$$

Din relaţia de mai sus, se constată următoarele:

1. modulul amplificării în tensiune a circuitului depinde numai de raportul dintre rezistenţele $\mathbf{R_F}$ şi $\mathbf{R}$, deci amplificarea în buclă deschisă $\mathbf{A_{VAO}}$ a amplificatorului operaţional nu mai intră în calcule.
2. semnul pozitiv al raportului relaţiei de mai sus indică un defazaj de $\mathbf{0^0}$ între tensiunea de ieşire $\mathbf{v_O}$ şi tensiunea de intrare $\mathbf{v_I}$, de unde şi denumirea de amplificator neinversor.

În continuare, se prezintă modul în care se poate determina factorul de amplificare în tensiune $\mathbf{A_V}$ al amplificatorului neinversor. Circuitul de calcul este indicat în figura de mai jos.



Circuitul de calcul al amplificării în tensiune a amplificatorului neinversor.

1. se determină curenţii prin rezistoarele circuitului: mai întâi se notează cu **i** curentul prin **R**; apoi, deoarece $\mathbf{i^-}$ este egal cu zero, fiind curent de intrare în AO, rezultă, pe baza TK1 aplicate în nodul la care este conectată intrarea inversoare a AO-ului, că prin $\mathbf{R_F}$ curentul este tot **i**.
2. deoarece AO-ul are reacţie negativă (datorită lui $\mathbf{R_F}$), tensiunile de intrare de la cele 2 intrări ale amplificatorului sunt egale: $v_I^+ = v_I^-$. Dar, $\mathbf{v_I^+}$ este chiar tensiunea de intrare a amplificatorului: $v_I^+ = v_I$, rezultă valoarea lui $\mathbf{v_I^-}$, care este tensiunea dintre nodul la care sunt conectate rezistenţele **R** şi $\mathbf{R_F}$ şi masa circuitului devine: $v_I^- = v_I$
3. aplicând legea lui Ohm pe cele 2 rezistoare ale circuitului rezultă: $i = \dfrac{0 - v_I}{R}$ *si* $i = \dfrac{v_I - v_O}{R_F}$
4. De unde rezultă: $$A_V = \frac{v_O}{v_I} = 1 + \frac{R_F}{R} = +\left(1 + \frac{R_F}{R}\right)$$

Expresia tensiunii de ieşire a amplificatorului neinversor

Tensiunea de ieşire a amplificatorului depinde de regiunea în care acesta funcţionează. Regiunea de funcţionare depinde de valoarea variaţiei tensiunii de intrare a circuitului. Astfel, dacă variaţia tensiunii de intrare este inclusă în domeniul de valori al tensiunii de intrare [$\mathbf{V_{Lmin}}$, $\mathbf{V_{Lmax}}$], care corespunde regiunii liniare, atunci circuitul funcţionează în regiunea liniară. În caz contrar, circuitul funcţionează în regiunea de saturaţie, în care tensiunea de ieşire a circuitului se limitează la valorile tensiunilor de saturaţie ale AOului.

Modul de funcţionare al circuitului poate fi descris conform relaţiei de mai jos:

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

Astfel, tensiunea de ieşire a amplificatorului neinversor este descrisă de următoarea relaţie:

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

V. Amplificatorul inversor

Circuitul are structura din figura de mai jos. Reacţia negativă este introdusă în circuit prin intermediul rezistorului $\mathbf{R_F}$ conectat între ieşirea AOului şi intrarea sa inversoare. Semnalul de intrare se aplică prin intermediul rezistorului **R** în borna inversoare, iar intrarea neinversoare este conectată la lasa circuitului. AOul este elementul care realizează amplificarea în tensiune, iar rezistoarele $\mathbf{R_F}$ şi **R** stablesc valoarea factorului de amplificare în tensiune, $\mathbf{A_V}$.

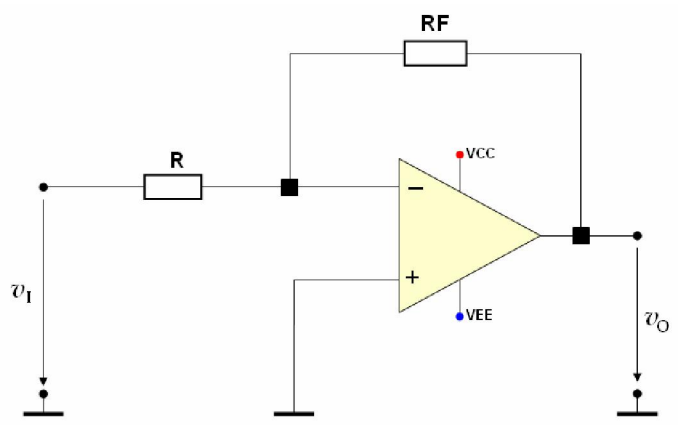
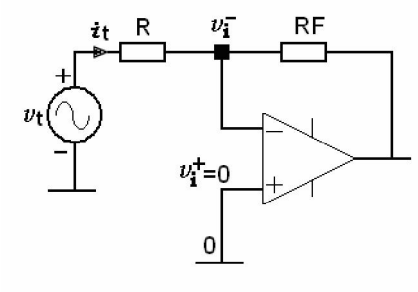


Figura 5. Amplificatorul inversor.

Rezistenţa de intrare: se determină pe circuitul de calcul din figura de mai jos, obţinut prin procedura prezentată în cadrul analizei amplificatorului precededent; rezistenţa se determină pe baza formulei:

$$R_i = \frac{v_t}{i_t}$$



Circuitul de calcul al rezistenţei de intrare a amplificatorului inversor.

Aplicând legea lui Ohm pe **R** rezultă: $i_t = \frac{v_t - v_I^-}{R}$.

Deoarece amplificatorul are reacţie negativă, datorită lui $\mathbf{R_F}$, rezultă: $v_I^+ = v_I^-$

Dar, intrarea neinversoare este conectată la masa circuitului, rezultă: $v_I^+ = 0$

Astfel: $v_I^- = 0$

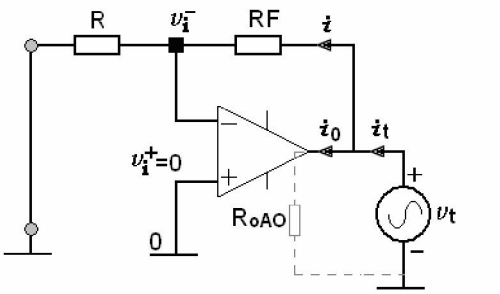
Revenind cu acest rezultat în prima relaţie şi apoi utilizând formula generală pentru calculul rezistenţei de intrare, rezultă că rezistenţa de intrare a amplificatorului se poate determina cu relaţia:

$$R_i = R \qquad 6$$

Deoarece rezistenţa de intrare a circuitului este egală cu **R**, rezultă că, pentru a elimina pierderile de tensiune la bornele de intrare ale amplificatorului, rezistenţa de intrare trebuie să fie de valoare cât mai mare (mult mai mare decât rezistenţa de ieşire a circuitului conectat la bornele de intrare ale amplificatorului inversor). În cazul în care această condiţie nu este satisfăcută, vor exista pierderi de tensiune la intrarea amplificatorului.

Rezistenţa de ieşire: se determină pe circuitul de calcul din figura de mai jos, obţinut prin procedura prezentată în cadrul analizei amplificatorului precededent; rezistenţa se determină pe baza formulei:

$$R_o = \frac{v_t}{i_t} \text{ cu } v_I = 0$$



Circuitul de calcul al rezistenţei de ieşire.

Printr-un calcul identic cu cel valabil pentru amplificatorul precedent, se deduce că rezistenţa de ieşire a amplificatorului este:

$$R_o = \frac{R_{oAO} \cdot R_F}{R_{oAO} + R_F}$$

pentru ca apoi, pe baza unor considerente similare cu cele prezentate la amplificatorul precedent, să se constate că rezistenţa de ieşire a amplificatorului inversor se poate aproxima ca fiind egală cu $\mathbf{R_{oAO}}$, adică, conform modelului ideal al AOului, egală cu zero:

$$R_o = 0 \qquad 7$$

Deoarece amplificatorul are o rezistenţă de ieşire nulă, pierderile de tensiune la bornele sale de ieşire sunt nule.

Factorul de amplificare în tensiune A_V a amplificatorului este definită prin relaţia de mai jos.

$$A_V = \frac{v_O}{v_I}$$

În urma calculelor, care se pot efectua printr-o procedură similară cu cea prezentată la amplificatorul precedent, rezultă că amplificarea în tensiune $\mathbf{A_V}$ a amplificatorului inversor se poate calcula cu relaţia de mai jos:

$$\boxed{A_V = -\left(\frac{R_F}{R}\right)} \qquad 8$$

Din relaţia de mai sus, se constată următoarele:

1. modulul amplificării în tensiune a amplificatorului inversor depinde numai de raportul dintre rezistoarele $\mathbf{R_F}$ şi **R**, deci amplificarea în buclă deschisă $\mathbf{A_{VAO}}$ a amplificatorului operaţional nu mai intră în calcule.
2. semnul "**-**" din faţa raportului relaţiei de mai sus indică un defazaj de $\mathbf{180^0}$ între tensiunea de ieşire $\mathbf{v_O}$ şi tensiunea de intrare $\mathbf{v_I}$, de unde şi denumirea de amplificator inversor (defazajul de $\mathbf{180^0}$ inversează la ieşire alternanţa semnalului de intrare.

Expresia tensiunii de ieşire a amplificatorului neinversor

Tensiunea de ieşire a amplificatorului depinde de regiunea în care acesta funcţionează. Regiunea de funcţionare depinde de variaţia tensiunii de intrare a circuitului. Astfel, dacă variaţia tensiunii de intrare este inclusă în domeniul de valori al tensiunii de intrare [$\mathbf{V_{Lmin}}$, $\mathbf{V_{Lmax}}$], care corespunde regiunii liniare, atunci circuitul funcţionează în regiunea liniară. În caz contrar, circuitul funcţionează în regiunea de saturaţie, în care tensiunea de ieşire a circuitului se limitează la valorile tensiunilor de saturaţie ale AOului:

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

Tensiunea de ieşire a amplificatorului neinversor este descrisă de următoarea relaţie:

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

VI. Amplificatorul repetor

Circuitul are structura din figura de mai jos. Bucla de reacţie negativă este realizată prin intermediul conexiunii directe (fir) dintre ieşirea AOului şi intrarea sa inversoare. O variantă de circuit care se comportă ca amplificator repetor poate fi realizată păstrând configuraţia de mai jos şi introducând un rezistor $\mathbf{R_F}$ între ieşirea amplificatorului operaţional şi intrarea inversoare a acestuia.

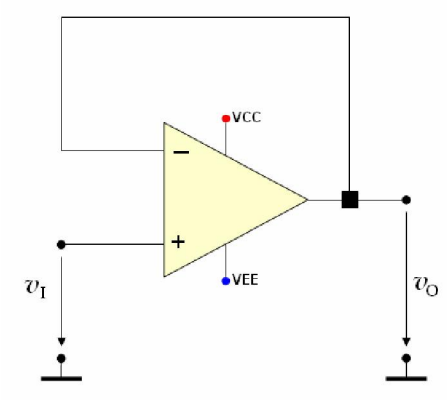
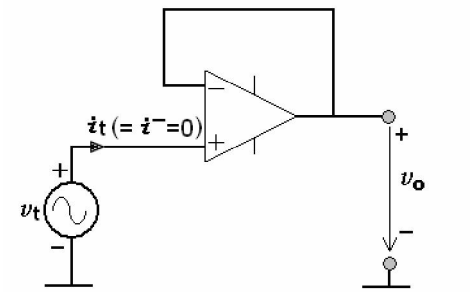


Figura 6. Amplificatorul repetor.

Rezistenţa de intrare a amplificatorului repetor se determină pe circuitul de calcul din figura de mai jos, obţinut prin procedura prezentată în cadrul analizei amplificatorului precededent; rezistenţa de intrare se determină pe baza formulei:

$$R_i = \frac{v_t}{i_t}$$



Circuitul de calcul al rezistenţei de intrare a amplificatorului repetor.

Deoarece curentul $\mathbf{i_t}$ este chiar curentul de intrare în borna neinversoare a AO-ului, curent care este zero, rezultă că rezistenţa de intrare în amplificator este infinită:

$$R_i = \frac{v_t}{0} \quad \Rightarrow \quad R_i = \infty \qquad 9$$

Deoarece amplificatorul are o rezistenţă de intrare infinită, pierderile de tensiune la bornele sale de intrare sunt nule.

Rezistenţa de ieşire se determină pe circuitul de calcul din figura de mai jos, obţinut prin procedura prezentată în cadrul analizei amplificatorului precededent; rezistenţa se determină pe baza formulei:

$$R_o = \frac{v_t}{i_t} \quad \text{cu} \quad v_i = 0$$

Amplificatorul operaţional are o rezistenţă de ieşire, care este desenată punctat în circuitul de calcul şi notată $\mathbf{R_{oAO}}$. Din acest motiv, aplicând legea lui Ohm pe această rezistenţă, se constată că:

$$v_t = i_O \cdot R_{oAO}$$

Pe de altă parte, dacă se aplică TK1 în nodul de la ieşirea circuitului rezultă:

$$i_t = i_O + \underbrace{i_-}_{=0} \quad \Rightarrow \quad i_t = i_O$$

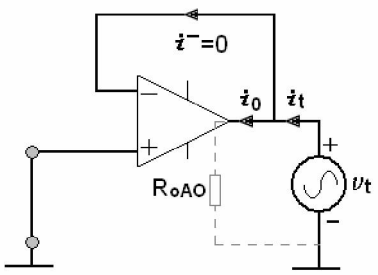
Ţinând cont de rezultatele de mai sus, rezultă că rezistenţa de ieşire a amplificatorului este:

$$R_o = R_{oAO}$$

Deoarece rezistenţa amplificatorului operaţional este considerată ca fiind zero, rezultă că:

$$R_o = 0 \qquad 10$$

Deoarece amplificatorul are o rezistenţă de ieşire nulă, pierderile de tensiune la bornele sale de ieşire sunt nule. Deci, pentru acest tip de amplificator, nu există pierderi de tensiune la bornele sale de intrare, respectiv de ieşire.



Circuitul de calcul al rezistenţei de ieşire a amplificatorului repetor.

Factorul de amplificare în tensiune $\mathbf{A_V}$ a amplificatorului: este definit prin relaţia de mai jos.

$$A_V = \frac{v_O}{v_I}$$

În urma calculelor, rezultă că amplificarea în tensiune $\mathbf{A_V}$ a amplificatorului se poate calcula cu relaţia de mai jos:

$$A_V = 1 \qquad 11$$

Această relaţie se obţine deoarece, amplificatorul, având reacţie negativă, tensiunile de pe cele 2 intrări ale sale sunt egale:

$$v_I^+ = v_I^-$$

Dar, ţinând cont de conexiunile circuitului, se poate observa cu uşurinţă că tensiunea de pe intrarea neinversoare este egală cu tensiunea de intrare în circuit:

$$v_I^+ = v_I$$

iar tensiunea de pe intrarea inversoare este egală cu tensiune de ieşire din circuit:

$$v_I^+ = v_O$$

Combinând cele 3 rezultate, rezultă relaţia de calcul a amplificării în tensiune $\mathbf{A_V}$ indicată mai sus.

Din relaţia de calcul a parametrului $\mathbf{A_V}$ prezentată mai sus, se constată că tensiunea de ieşire este identică cu tensiunea de intrare, motiv pentru care circuitul se numeşte repetor, adică repetă la ieşire tensiunea aplicată pe intrarea sa.

Deoarece rezistenţa de intrare a circuitului este egală cu rezistenţa de intrare a AO-ului, rezultă că aceasta este foarte mare (infinită). Totodată, deoarece rezistenţa de ieşire a circuitului este egală cu rezistenţa de ieşire a AO-ului, rezultă că aceasta este foarte mică (zero). Un astfel de circuit este utilizat ca adaptor de rezistenţe, în scopul minimizării pierderilor de tensiune generate prin conectarea mai multor amplificatoare care au impedanţele (rezistenţele) neadaptate.

Pentru minimizarea acestor pierderi, circuitele de amplificare a căror rezistenţe de intrare/ieşire nu satisfac caracteristicile unui amplificatr de tensiune ideal ($\mathbf{R_i} \to \infty$ şi $\mathbf{R_o} \to \mathbf{0}$), nu se conectează direct, ci prin intermediul amplificatoarelor repetor, soluţie prezentată în Figura 7. În absenţa repetorului, prin conectarea directă a celor 2 circuite de amplificare, tensiunea de ieşire $\mathbf{v_O}$ ar rezulta mai mică (datorită pierderilor de tensiune la bornele circuitelor) decât în cazul introducerii repetorului.

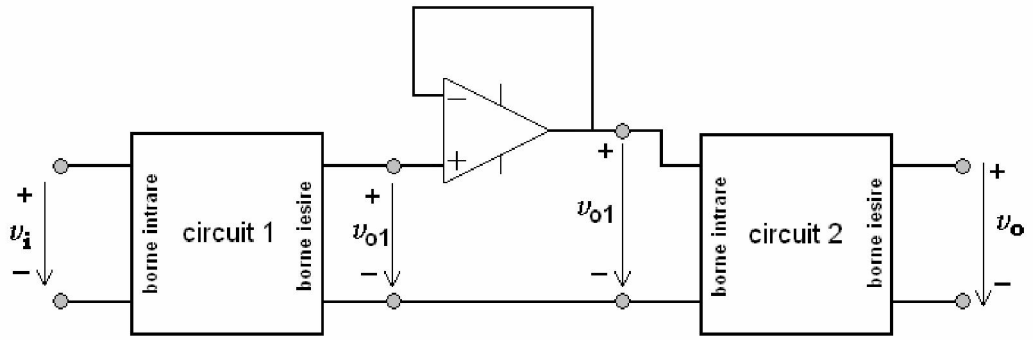


Figura 7. Modul de utilizarea al repetorului.