

Scopul lucrării: prezentarea principalelor circuite de amplificare în tensiune realizate cu Amplificatoare Opera ionale; determinarea principalilor parametri ai amplificatoarelor: factor amplificare, frecvență superioară .

Cuprins

- I. Noțiuni teoretice.
- II. Realizarea practică a circuitelor de amplificare în tensiune.
- III. Simularea în Orcad a circuitelor de amplificare în tensiune.

I. Noțiuni teoretice

Efectul introducerii amplificatorului opera ional într-o buclă de reacție negativă

Un amplificator opera ional are o amplificare în tensiune foarte mare, de ordinul sutelor de mii, numită amplificare în buclă deschisă, notată A_{VAO} . Deoarece amplificarea în tensiune a amplificatorului opera ional este foarte mare, de îndată ce tensiunile aplicate pe cele 2 intrări diferă doar cu câțiva [mV], tensiunea de la ieșirea acestuia se va stabili, în funcție de semnul tensiunii de intrare v_{ID} , la o valoare constantă, numită tensiune de saturație pozitivă V_{SAT}^+ , respectiv tensiune de saturație negativă V_{SAT}^- , așa cum este sugerat în Figura 1, care reprezintă caracteristica de transfer (sau caracteristica de funcționare) a amplificatorului opera ional. În circuitele de amplificare, un element de circuit care se comportă ca un amplificator opera ional nu este util, deoarece **distorsionează puternic forma de undă** a semnalului aplicat la intrare, prin intrarea în saturație a amplificatorului opera ional.

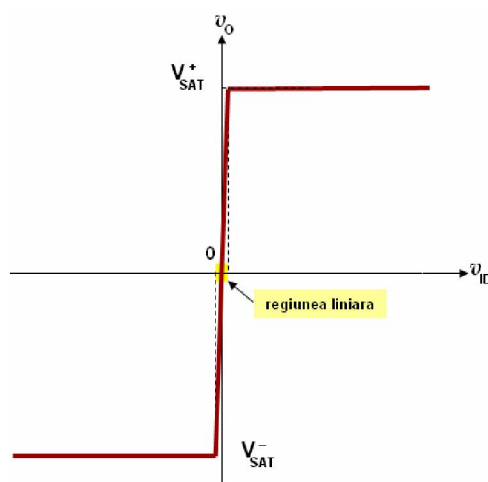


Figura 1. Caracteristica de transfer (de funcționare) a AO-ului.

De exemplu, pentru un circuit cu un amplificator opera ional, dacă tensiunea de intrare v_{ID} este sinusoidală și are componenta medie egală cu $0[V]$, atunci, conform caracteristicii de transfer a amplificatorului opera ional, dacă $v_{ID} > 0 \Rightarrow v_O = V_{SAT}^+$, iar dacă $v_{ID} < 0 \Rightarrow v_O = V_{SAT}^-$, deci

ieirea amplificatorului operațional basculează între 2 valori discrete și în consecință forma de undă a semnalului de ieșire este dreptunghiulară.

Semnalul de la ieșirea amplificatorului operațional va rezulta nedistorsionat numai dacă tensiunea de intrare diferențială va fi suficient de mică, astfel încât funcționarea amplificatorului operațional să fie plasată în așa-numita regiune de funcționare liniară (vezi Figura 1 pentru identificarea acestei regiuni: este regiunea în care caracteristica de transfer se află între cele două tensiuni de saturație). Numai în regiunea liniară de funcționare a AO-ului, tensiunea de la ieșire sa este direct proporțională cu tensiunea de intrare diferențială:

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

Din caracteristica de transfer a AO-ului, se remarcă faptul că, pentru ca un AO să lucreze în regiunea liniară, valoarea tensiunii v_{ID} trebuie să fie extrem de mică, de ordinul [mV]. În aplicațiile practice, este extrem de dificil ca informația utilă să fie reprezentată prin intermediul unei tensiuni de variație atât de redusă și în consecință, utilizarea unui AO în buclă deschisă ca amplificator de semnale nu este recomandată, întrucât distorsionează informația. Din acest motiv, este necesară extinderea domeniului de valori a tensiunii de intrare diferențiale v_{ID} în care AO-ul să funcționeze liniar.

Soluția pentru problema de mai sus constă în **introducerea AO-ului într-o buclă de reacție negativă**. Prin acest procedeu, amplificarea în tensiune a circuitului cu AO introdus într-o buclă cu reacție negativă se reduce la valoarea notată A_V (vezi Figura 2, în care amplificarea în tensiune A_{VAO} este egală cu $\operatorname{tg}\alpha$), iar domeniul de valori ale tensiunii v_I în care circuitul cu AO funcționează liniar (nu intră în regiunile de saturație) se extinde, ceea ce oferă posibilitatea ca, în cazul în care valoarea maximă a tensiunii v_I nu depășește un interval de valori, semnalele din circuit să nu se distorsioneze prin intrarea în saturație a AO-ului.

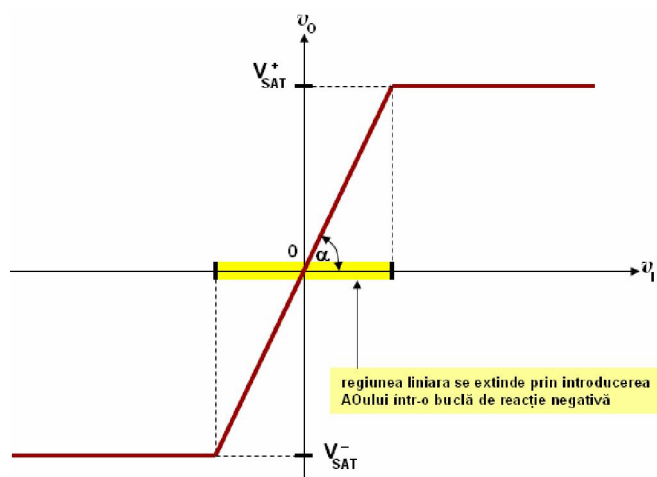


Figura 2. Caracteristica de transfer a circuitului cu AO introdus într-o buclă cu reacție negativă: extinderea domeniului lui v_I în care AO-ul funcționează liniar.

Banda de frecvență a unui amplificator

Un AO are o **amplificare în tensiune** foarte mare, **de ordinul sutelor de mii**, numită **amplificarea în buclă deschisă**, notată $A_{V_{AO}}$. Amplificarea în buclă deschisă se menține la această valoare numai dacă frecvența tensiunii de intrare v_{ID} este foarte mică. Pentru valori mari ale acestei frecvențe, se constată că valoarea amplificării în tensiune $A_{V_{AO}}$ se reduce; la creșterea frecvenței lui v_{ID} de 10 ori se observă o reducere a amplificării în tensiune $A_{V_{AO}}$ de 10 ori (sau cu 20decibeli). Graficul dependenței valorii parametrului $A_{V_{AO}}$ de valoarea frecvenței tensiunii de intrare diferențial v_{ID} se numește **caracteristica de frecvență**. Graficul caracteristici de frecvență a amplificatorului operațional este prezentat în Figura 3. Pe această figură se scot în evidență 2 parametri importanți ai AO-ului:

- frecvența superioară f_{SAO} = frecvența tensiunii v_{ID} la care amplificarea în tensiune $A_{V_{AO}}$ se reduce de 0.707 ori față de valoarea maximă.
- frecvența unitate f_B = frecvența tensiunii v_{ID} la care amplificarea în tensiune în buclă deschisă $A_{V_{AO}}$ devine egală cu unitatea.

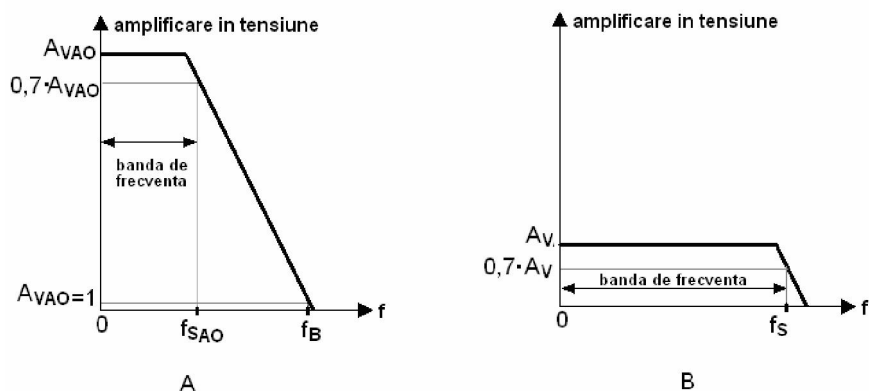


Figura 3. Caracteristica de frecvență pentru cazul: A. AO în buclă deschisă (fără reacție): amplificare mare, bandă de frecvență mică; B. AO în buclă închisă (cu reacție negativă): amplificare redusă, bandă de frecvență mare

Așa cum s-a precizat, pentru extinderea domeniului de valori al tensiunii de intrare diferențiale v_{ID} în care amplificatorul lucrează liniar, amplificatorul operațional se introduce într-o buclă de reacție negativă, care are ca efect reducerea amplificării în tensiune a circuitului. Acest efect este însoțit de creșterea semnificativă a valorii benzii de frecvență a circuitului. Banda de frecvență a unui circuit amplificator reprezintă diferența dintre frecvența superioară și cea inferioară a acestuia, unde frecvența inferioară se definește la fel ca frecvența superioară, dar este considerată pentru valori mici ale frecvenței (când aceasta tinde la $0[\text{Hz}]$). Se poate demonstra că la un circuit de amplificare (așa cum se observă din Figura 3), produsul amplificare-bandă este aproximativ constant, de unde rezultă concluzia următoare: **la un circuit de amplificare, creșterea valorii amplificării duce la micșorarea benzii de frecvență și reciproc.**

II. Principalele circuite de amplificare realizate cu AO

1. Amplificatorul inversor

Amplificatorul inversor este prezentat în Figura 3, în care, pentru simplitate, cele 2 surse de alimentare care alimentează AO-ul nu au mai fost introduse. Rezistorul R_F introduce AO-ul într-o buclă de reacție negativă, iar amplificarea în tensiune a circuitului se determină după relația:

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

Semnul „-”, din fața raportului indică faptul că circuitul inversează tensiunea de ieșire v_O față de cea de intrare v_I , de unde și denumirea de amplificator inversor.

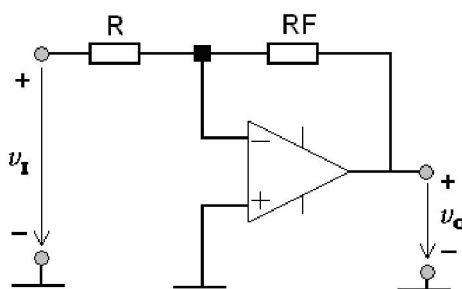


Figura 3. Amplificatorul inversor

2. Amplificatorul neinversor

Rezistorul R_F introduce AO-ul într-o buclă de reacție negativă, iar amplificarea în tensiune a circuitului se determină după relația:

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

Semnul „+” din fața parantezei indică faptul că circuitul NU inversează tensiunea de ieșire v_O față de cea de intrare v_I , de unde și denumirea de amplificator neinversor.

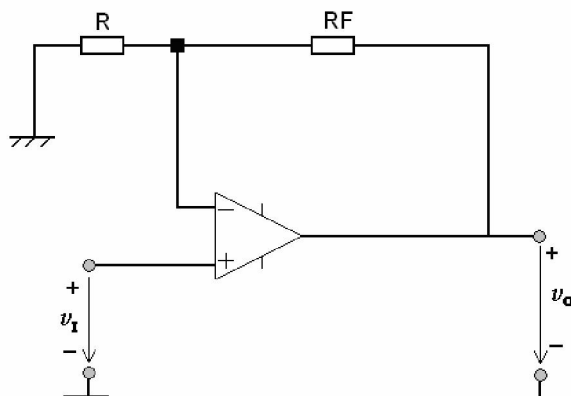


Figura 4. Amplificatorul neinversor

II. Realizarea practică a unui circuitelor de amplificare cu AO

A. Amplificatorul inversor

1. Se verifică dacă sursa de alimentare este decuplată (ledul **ON** de pe panoul frontal al aparatului trebuie să fie stins); dacă sursa de alimentare nu este decuplată, atunci se va apăsa butonul **OUTPUT** de pe panoul frontal al sursei de alimentare pentru decuplarea acesteia (se observă stingerea ledului **ON**).

2. Se reglează de la generatorul de semnal o tensiune sinusoidală v_I de amplitudine $V_i=0,2[V]$ și frecvență $f=1[kHz]$. Pentru obținerea amplitudinii specificate, este necesară utilizarea butonului de atenuare de $-20dB$ de pe panoul frontal al generatorului de semnal (secțiunea **ATTENUATOR**). Deoarece amplitudinea tensiunii v_I este de valoare mică, la vizualizarea formei de undă pe osciloscop se poate observa fenomenul de suprapunere peste semnalul util v_I a semnalelor parazite (semnalul vizualizat pe ecranul osciloscopului nu este un sinus "curat").

3. Se realizează circuitul din Figura 5, care reprezintă un circuit de amplificare inversor, realizat cu amplificatorul operațional **LM741**. Circuitul de amplificare se alimentează de la 2 surse de tensiune continuă, ambele setate la valorile de $15[V]$, pentru a asigura o alimentare diferențială pentru AO. Valoarea rezistenței R_F se măsoară inițial cu ohmetrul, iar valoarea măsurată se introduce în Tabelul 1 (în câmpul **RF1**). În continuare, toate valorile determinate la punctele următoare se vor trece pe linia care corespunde valorii **RF1**.

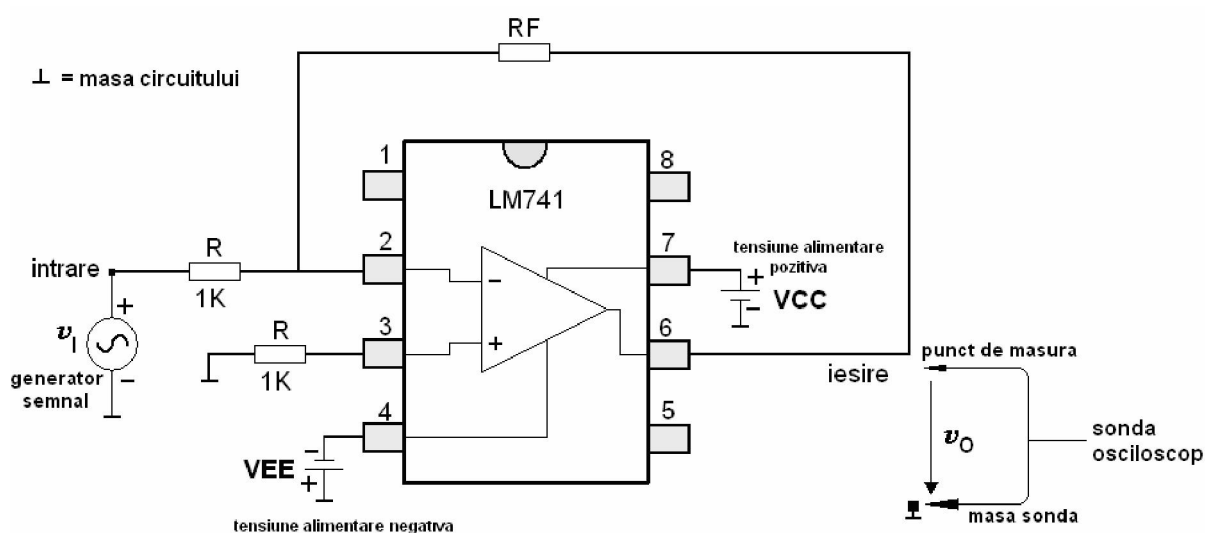


Figura 5. Circuit de amplificare inversor cu AO.

4. Se cheamă cadrul didactic pentru verificarea circuitului.

5. Se cuplează sursa de alimentare la montaj, prin apăsarea butonului **OUTPUT** de pe panoul frontal al acesteia (ledul **ON** de pe panoul frontal al aparatului se aprinde);

Determinarea modului amplificării în tensiune

6. Se calculează valoarea teoretică a **modulului** amplificării în tensiune a circuitului cu relația de calcul a acestui parametru, indicată în partea teoretică. Valoarea obținută se introduce în Tabelul 1.

7. Se vizualizează cu ajutorul osciloscopului tensiunea de ieșire v_o . Pe forma de undă a tensiunii de ieșire v_o se măsoară amplitudinea V_o a acesteia (se reaminte că amplitudinea reprezintă jumătate din variația vârf la vârf). După măsuratori se calculează valoarea măsurată a modului amplificării în tensiune a circuitului cu relația generală:

$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

unde V_o și V_i reprezintă amplitudinile tensiunii de ieșire, respectiv tensiunii de intrare. Valoarea astfel obținută se trece în Tabelul 1.

Determinarea frecvenței superioare a circuitului de amplificare

Valoarea amplificării în tensiune a circuitului depinde de frecvența semnalului de intrare. Se constată că începând de la o anumită valoare a frecvenței, amplificarea în tensiune scade, pe măsură ce frecvența semnalului de intrare crește. Frecvența superioară a unui amplificator reprezintă frecvența maximă de lucru pînă la care circuitul amplifică semnalul aplicat la intrarea sa. Procedura de măsurare a frecvenței superioare a circuitului este următoarea:

8. Se calculează valoarea vârf la vârf pe care tensiunea de ieșire o atinge la frecvența de lucru egală cu valoarea frecvenței superioare, cu relația:

$$V_{o_vrf_vrf} = 2 \cdot 0,7 \cdot A_V \cdot V_i$$

unde A_V are valoarea calculată la punctul 7 iar V_i este amplitudinea semnalului sinusoidal ($V_i = 0,2[V]$).

9. Se vizualizează pe ecranul osciloscopului tensiunea de ieșire a circuitului. **Se pstrează amplitudinea tensiunii de intrare constantă** (nu se modifică poziția potențiometrului **AMPL** de la generatorul de semnal) și se crește semnificativ valoarea frecvenței semnalului v_G , de la generatorul de semnal, utilizîndu-se atât comutatorul gamelor de frecvență **F**, respectiv **FREQUENCY**, în funcție de tipul generatorului de semnal, precum și din comutatorul de reglaj fin **VARIABLE**, pînă cînd se constată că valoarea vârf_vârf a tensiunii v_o devine egală cu valoarea calculată cu ajutorul relației de mai sus. Cînd se constată că valoarea vârf_vârf a tensiunii v_o devine egală cu valoarea calculată cu ajutorul relației amintite, se citește de pe ecranul generatorului de semnal valoarea frecvenței semnalului la care lucrează amplificatorul. Valoarea citită reprezintă valoarea frecvenței superioare a circuitului de amplificare, notată f_s . Valoarea astfel măsurată se trece în Tabelul 1.

10. După efectuarea tuturor măsurătorilor se decuplează sursa de alimentare prin apăsarea butonului **OUTPUT** de pe panoul frontal al acesteia (ledul **ON** de pe panoul frontal al aparatului se stinge).

11. Se alege a doua valoare pentru rezistorul **RF**, se măsoară cu ohmetrul valoarea respectivă, apoi se trece valoarea măsurată în Tabelul 1, în câmpul **RF2**. Se scoate din circuit rezistorul **RF** și se înlocuiește cu noul rezistor, apoi se revine cu generatorul de tensiune sinusoidală la frecvența $f = 1$ [kHz] și se refac măsurătorile 5-10. Toate rezultatele obținute se trec pe linia corespunzătoare valorii **RF2**.

12. Comparând cele două seturi de măsurători, obținute pentru cele două valori ale lui **RF**, se observă că atunci când modulul amplificării crește, frecvența superioară scade. Pentru fiecare set de măsurători, se calculează produsul amplificare bandă cu relația $P = A_{V\text{măsurat}} \cdot f_S$ iar rezultatele se introduc în coloana **P** a Tabelului 1.

13. După efectuarea tuturor măsurătorilor se decuplează sursa de alimentare prin apăsarea butonului **OUTPUT** de pe panoul frontal al acesteia (ledul **ON** de pe panoul frontal al aparatului se stinge).

B. Amplificatorul neinversor

1. Se reglează de la generatorul de semnal o tensiune sinusoidală v_I de amplitudine $V_I = 1$ [V] și frecvență $f = 1$ [kHz]. Pentru obținerea amplitudinii specificate, trebuie dezactivat de pe panoul frontal al generatorului de semnal (secțiunea **ATTENUATOR**) atenuarea de -20dB, utilizată la circuitul precedent.

2. Se realizează circuitul din Figura 6, care reprezintă un circuit de amplificare neinversor, realizat cu amplificatorul operațional **LM741**. Sursele de alimentare se prestează la setările de la circuitul precedent. Pentru **RF** se prestează valoare care corespunde valorii **RF2**.

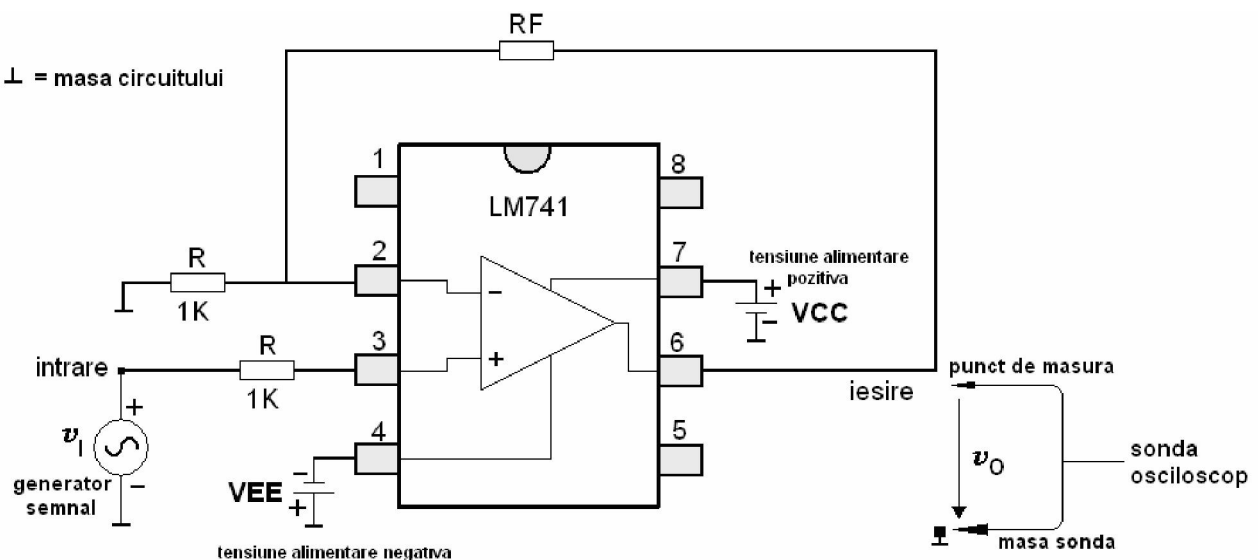


Figura 6. Circuit de amplificare neinversor cu AO.

3. Se cheamă cadrul didactic pentru verificarea circuitului.

4. Se cuplează sursa de alimentare la circuit, prin apăsarea butonului **OUTPUT** de pe panoul frontal al acesteia (ledul **ON** de pe panoul frontal al aparatului se aprinde);
5. Pe baza relațiilor de calcul teoretice, introduse pentru amplificatorul neinvertor în secțiunea I, se calculează valoarea teoretică a **modulului** amplificării în tensiune. Rezultatul obținut se introduce în Tabelul 1.
6. Se vizualizează cu ajutorul osciloscopului tensiunea la ieșire v_o . Pe forma de undă a tensiunii de ieșire v_o se măsoară amplitudinea V_o a acesteia. După măsuratori se calculează modulul amplificării în tensiune a circuitului cu relația generală :

$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

unde V_o și V_i sunt amplitudinile tensiunii de ieșire, respectiv tensiunii de intrare. Valoarea obținută se introduce în Tabelul 1.

7. După efectuarea tuturor măsurătorilor se decuplează sursa de alimentare prin apăsarea butonului **OUTPUT** de pe panoul frontal al acesteia (ledul **ON** de pe panoul frontal al aparatului se stinge).

III. Simularea în Orcad a circuitelor de amplificare realizate cu AO

A. Amplificatorul invertor

1. Se editează circuitul din Figura 7, în care se consideră pentru amplificatorul operațional modelul uA741, din biblioteca **opamp**, sursele de alimentare **VCC** și **VEE** sunt de tipul **VDC**, valorile acestora fiind de **15[V]**, iar sursa de tensiune de intrare este de tipul **VSIN**, cu amplitudine $V_i=1[V]$, valoare medie **0[V]** și frecvență **1[kHz]**. Pentru **RF** se va considera valoarea indicată în tabelul de mai jos, în funcție de masa de lucru, iar valoarea respectivă se trece în Tabelul 2, în coloana **RF**.

	Masa 1	Masa 2	Masa 3	Masa 4	Masa 5	Masa 6
RF	1.8k	2.2k	2.7k	3.3k	3.6k	3.9k

2. Se efectuează o analiză de tipul **Time Domain** și se vizualizează în aceeași fereastră 5 perioade ale tensiunilor v_i , respectiv v_o ; pentru analiză se vor considera 100 de puncte de simulare. Pe formele de undă vizualizate se determină defazajul dintre cele 2 semnale, iar rezultatul se trece în Tabelul 2.
3. Cu ajutorul cursorului se determină valoarea amplitudinii V_o , apoi se calculează valoarea amplificării în tensiune a circuitului cu relația de mai jos, iar rezultatul se trece în Tabelul 2; se calculează valoarea teoretică a **modulului** amplificării în tensiune cu ajutorul relației amplificării în

tensiune, indicat în secțiunea teoretică, pentru amplificatorul inversor; rezultatul se trece în Tabelul 2.

$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

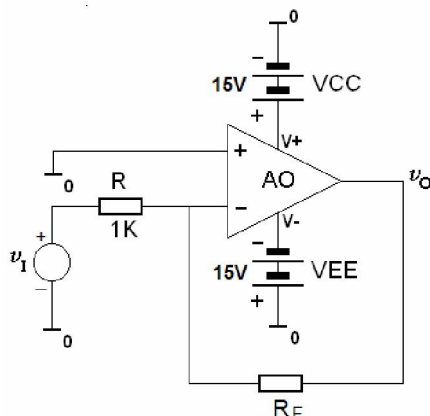


Figura 7. Amplificatorul inversor

B. Amplificatorul neinversor

1. Se editează circuitul din Figura 8 și se efectuează punctele 2-3 indicate la amplificatorul inversor. Rezultatele se trec în Tabelul 2.

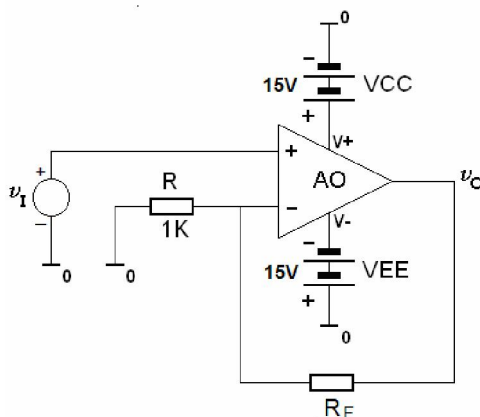


Figura 8. Amplificatorul neinversor.

C. Verificarea produsului amplificare-bandă

Se va verifica prin simulare faptul că, într-un circuit de amplificare, creșterea amplificării reduce banda de frecvență a amplificatorului.

1. Se modifică circuitul din Figura 8 (amplificatorul neinversor), în care sursa de tensiune v_i se înlocuiește conform celor indicate mai jos; valoarea rezistenței R_F cu care se lucrează se introduce în Tabelul 3, în caseta **RF1**. Pentru amplificatorul neinversor editat, se vizualizează variația în

domeniul frecvență a tensiunii de ieșire v_o . În acest scop, sursa de tensiune v_i se înlocuiește cu o nouă sursă de tensiune de tipul **VAC**, cu parametri următori: valoare medie = **0[V]** și amplitudine $V_i = 1[V]$, și se realizează o analiză de tipul **AC Sweep**, în care frecvența de lucru se variază logaritmice, în intervalul [**0.1Hz ÷ 100MHz**], considerându-se pentru analiză 100 puncte/decadă.

2. Pe graficul astfel obținut, se determină amplificarea în tensiune în interiorul benzii de frecvență a circuitului, respectiv frecvența superioară a acestuia:

- determinarea amplificării în tensiune în interiorul benzii de frecvență: pe graficul vizualizat, se măsoară cu ajutorul cursorului valoarea maximă a amplitudinii tensiunii de ieșire, V_o ; amplificarea în tensiune în banda de frecvență a circuitului este dată de raportul:

$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

unde $V_i = 1[V]$. Rezultatul se trece în Tabelul 3.

- determinarea frecvenței superioare: la punctul precedent s-a măsurat valoarea maximă a amplitudinii tensiunii de ieșire v_o , valoare notată V_o . În continuare, pentru determinarea frecvenței superioare a circuitului, se deplasează cursorul pe graficul obținut, spre direcția frecvențelor mari, până când amplitudinea tensiunii de ieșire v_o scade la valoarea $0.7 \cdot V_o$. Când cursorul ajunge în punctul respectiv, se citește de pe axa OX valoarea frecvenței. Valoarea astfel determinată reprezintă frecvența superioară f_S a amplificatorului. Rezultatul se trece în Tabelul 3.

3. Se modifică valoarea rezistenței **RF** conform tabelului indicat mai jos și se reface punctul 2. În Tabelul 3, se introduce în caseta **RF2** noua valoare a rezistenței **RF**. Se reface punctul 2, iar rezultatele se trec în Tabelul 3. După obținerea rezultatelor, se observă faptul că amplificarea în tensiune crește, în timp ce frecvența superioară a circuitului scade.

	Masa 1	Masa 2	Masa 3	Masa 4	Masa 5	Masa 6
RF	6.8k	9.1k	10k	12k	15k	18k

4. Se calculează produsul amplificare-bandă cu relația de mai jos, iar rezultatul se introduce în Tabelul 3. Din punct de vedere teoretic, acest produs are aceeași valoare, indiferent de valorile amplificării în tensiune și a frecvenței superioare, ceea ce demonstrează faptul că la un amplificator, “cu cât se crește amplificarea, cu atât se reduce banda de frecvență a acestuia”.

$$P = A_{Vmasurat} \cdot f_S$$

Nume, Prenume, Grupa:

1.	2.	3.
-----------	-----------	-----------

Tabelul 1. Realizarea practic a circuitelor de amplificare cu AO

	Amplificator inversor				Amplificator neinversor	
	$ A_V $ teoretic	$ A_V $ masurat	f_s	P	$ A_V $ teoretic	$ A_V $ masurat
RF1 =						
RF2 =						

Tabelul 2. Simularea în ORCAD a circuitelor de amplificare cu AO

RF	Amplificator inversor			Amplificator neinversor		
	defazaj	$ A_V $ teoretic	$ A_V $ masurat	defazaj	$ A_V $ teoretic	$ A_V $ masurat

Tabelul 3. Determinarea produsului amplificare band prin simulare în ORCAD

	$ A_V $	f_s	P
RF1 =			
RF2 =			