

## Amplificator inversor și neinversor de c.c.

Se studiază două montaje de bază ale AO în buclă închisă: amplificatorul de c.c. de tip inversor și amplificatorul de c.c. de tip neinversor. Prin combinarea pozițiilor celor trei comutatoare, schema electronică compactă din fig. 1 permite construirea a trei montaje ale AO, denumite după cum urmează:

- AO\_OO** = montaj pentru măsurarea tensiunii de offset la ieșirea AO, cu rezistențe la borna neînversoare ( $R_3 = 6,8 \text{ k}\Omega$ ) și la ieșire (rezistențe de sarcină:  $R_4 = 5,6 \text{ k}\Omega$  și  $R_5 = 1,5 \text{ k}\Omega$ );
- AO\_I** = amplificator de c.c., de tip inversor, cu rezistență de sarcină  $R_4 = 5,6 \text{ k}\Omega$ ;
- AO\_N** = amplificatorul de c.c., de tip neînversor, cu rezistență de sarcină  $R_4 = 5,6 \text{ k}\Omega$ .

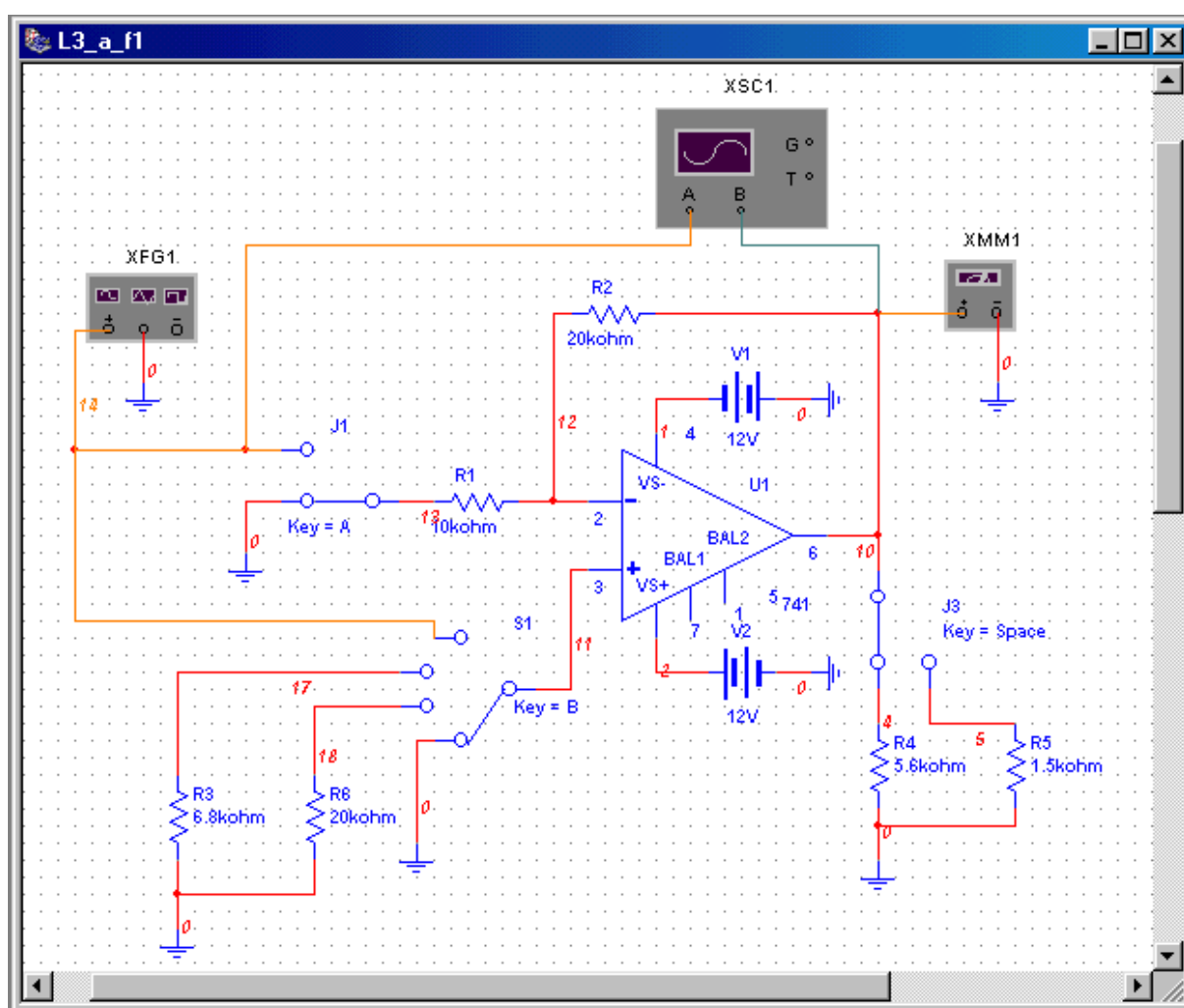


Fig. 1

Principalele obiective ale simulărilor și analizelor în c.c. și în c.a. sunt următoarele:

1. evidențierea efectului valorilor rezistențelor conectate la bornele AO asupra valorii tensiunii de offset la ieșirea amplificatorului;

2. caracteristicile de frecvență ale amplificatoarelor de c.c., de tip inversor și neinversor, cu determinarea modulului amplificării de tensiune în buclă închisă,  $A_{UR0}$ , și a benzii de frecvențe de trecere,  $f_{sr}$ ;
3. caracteristica statică de transfer a amplificatorului inversor și neinversor.

Sunt studiate amplificatoare construite cu **AO** de uz general, **741**.

### a. AO\_00.

Cu comutatoarele în pozițiile indicate în fig. 1, tensiunea de offset la ieșire, pentru borna neinversoare de intrare a AO conectată direct la masă, poate fi citită cu voltmetrul de c.c. (XMM1) sau poate fi dată ca rezultat al analizei punctului static de funcționare (**DC Operating Point Analysis**). Analiza în c.c. are avantajul furnizării potențialelor tuturor nodurilor din circuit. Pentru aceasta, se selectează **Simulate/Analyses/DC Operating Point** și se aleg variabilele de ieșire (fig. 2): nodurile 10 (ieșirea,  $U_{o,os}$ ), 12 (borna inversoare) și 11 (borna neinversoare). Se dă comanda **Simulate** și se obține rezultatul din fig. 3.

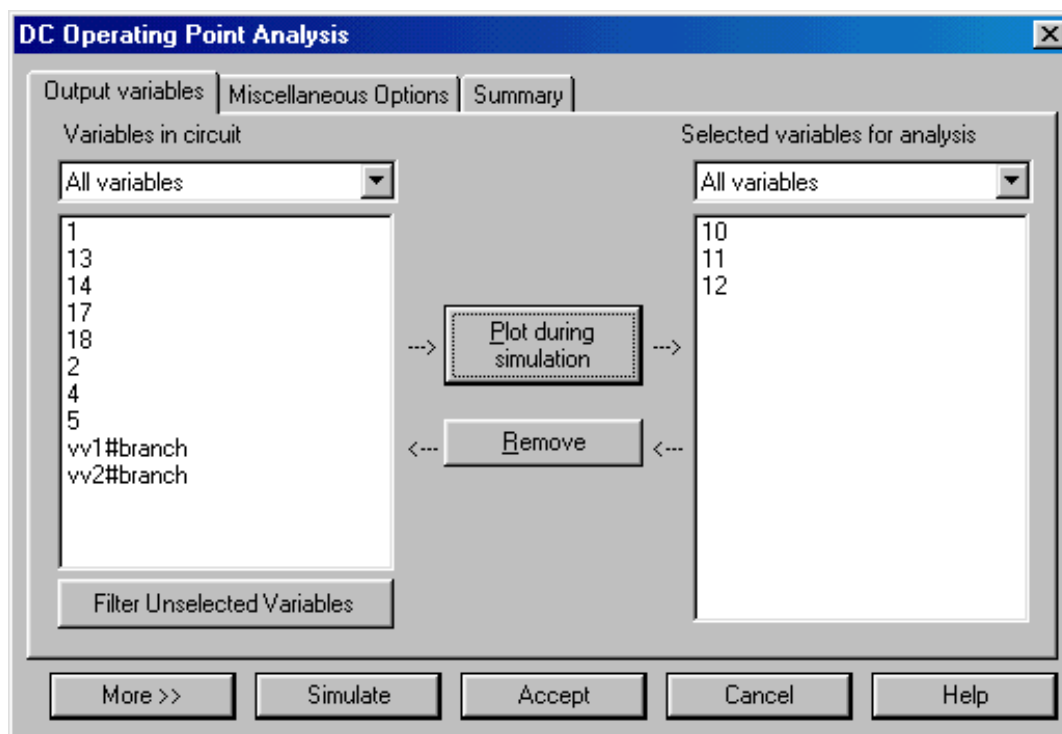


Fig. 2

Se comută J2 pe  $R_5 = 1,5 \text{ k}\Omega$  și se repetă analiza. Rezultatul rămâne neschimbat, arătând că rezistența de sarcină nu afectează tensiunea de offset la ieșire.

Se conectează rezistența  $R_3 = 6,8 \text{ k}\Omega$ , la borna neinversoare, și se repetă analiza în c.c., pentru aceleași variabile de ieșire. Se obțin rezultatele din fig. 4.

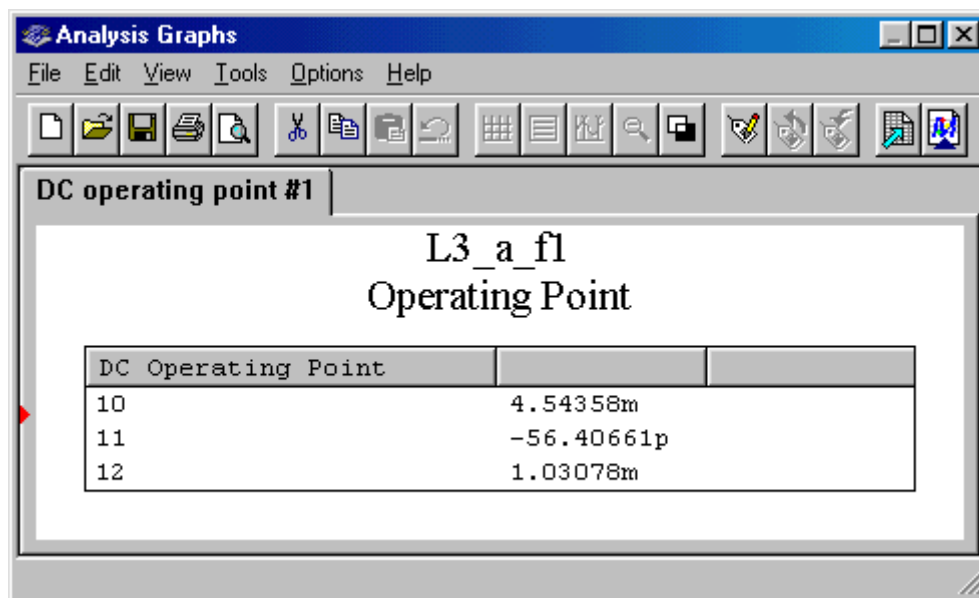


Fig. 3

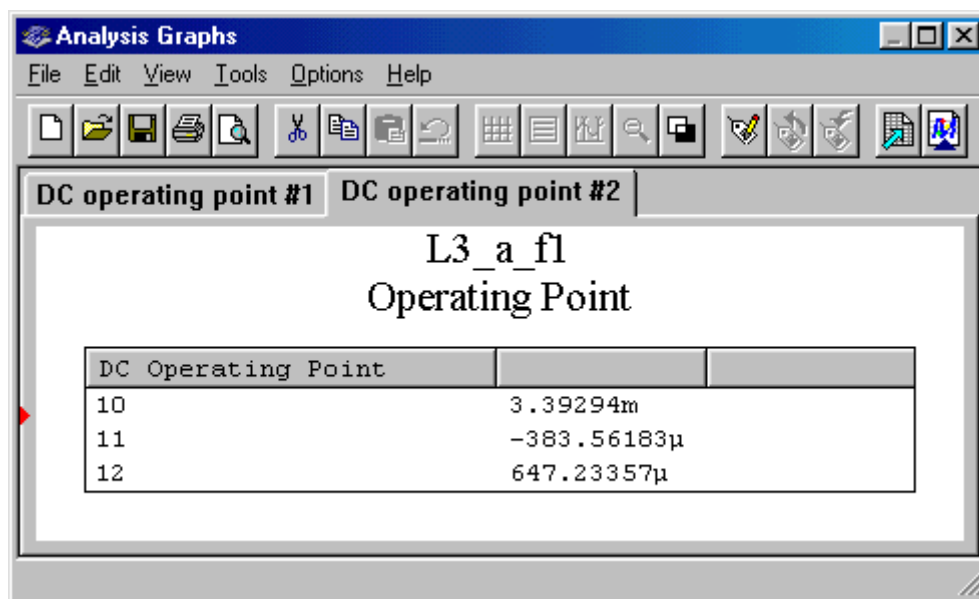


Fig. 4

Pentru verificarea efectului rezistențelor echivalente conectate la cele două borne de intrare ale AO, se testează circuitul și cu alte valori ale rezistenței  $R_3$ . Se compară și se explică rezultatele.

**Rezultatele analizelor.** Cu borna neinvertoare conectată direct la masă, tensiunea de offset la ieșire este  $U_{O,os} = V_{IO} = 4,54 \text{ mV}$ ; după introducerea rezistorului  $R_3$ , cu  $R_3 = R_1/R_2 = 6,8 \text{ k}\Omega$  (aleasă din considerente de anulare a efectului parametrului  $I_B$ ), tensiunea  $U_{O,os}$  scade la **3,39 mV**.

**Rezultate teoretice.** Valorile tipice ale parametrilor statici ai AO tip LM747 sunt:  $U_{OS} = 5 \text{ mV}$ ,  $I_{OS} = 20 \text{ nA}$ ,  $I_B = 500 \text{ nA}$ . Pentru  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$  și  $R_3 = R_1/R_2 = 6,8 \text{ k}\Omega$  (aleasă din considerente de anulare a efectului parametrului  $I_B$ ), tensiunea de offset la ieșire este  $U_{O,os} = U_{OS} \cdot (1 + R_2/R_1) + I_{OS} \cdot R_3 = 5 \text{ mV} \times (1 + 20 \text{ k}\Omega / 10 \text{ k}\Omega) + 20 \text{ nA} \times 6,8 \text{ k}\Omega \cong 15 \text{ mV}$ .

## b. AO\_I.

Se schimbă pozițiile comutatoarelor J1, S1 și J2 pentru configurarea amplificatorului de c.c. de tip inversor, cu rezistență de sarcină  $R_4 = 5,6 \text{ k}\Omega$  (fig. 5). Se setează **generatorul de funcții** pe semnal sinusoidal, cu amplitudinea  $U_{im} = 10 \text{ mV}$ , frecvența  $1 \text{ kHz}$  și se simulează circuitul. Formele de undă ale semnalelor de intrare și de ieșire sunt vizualizate pe ecranul osciloscopului (fig. 6).

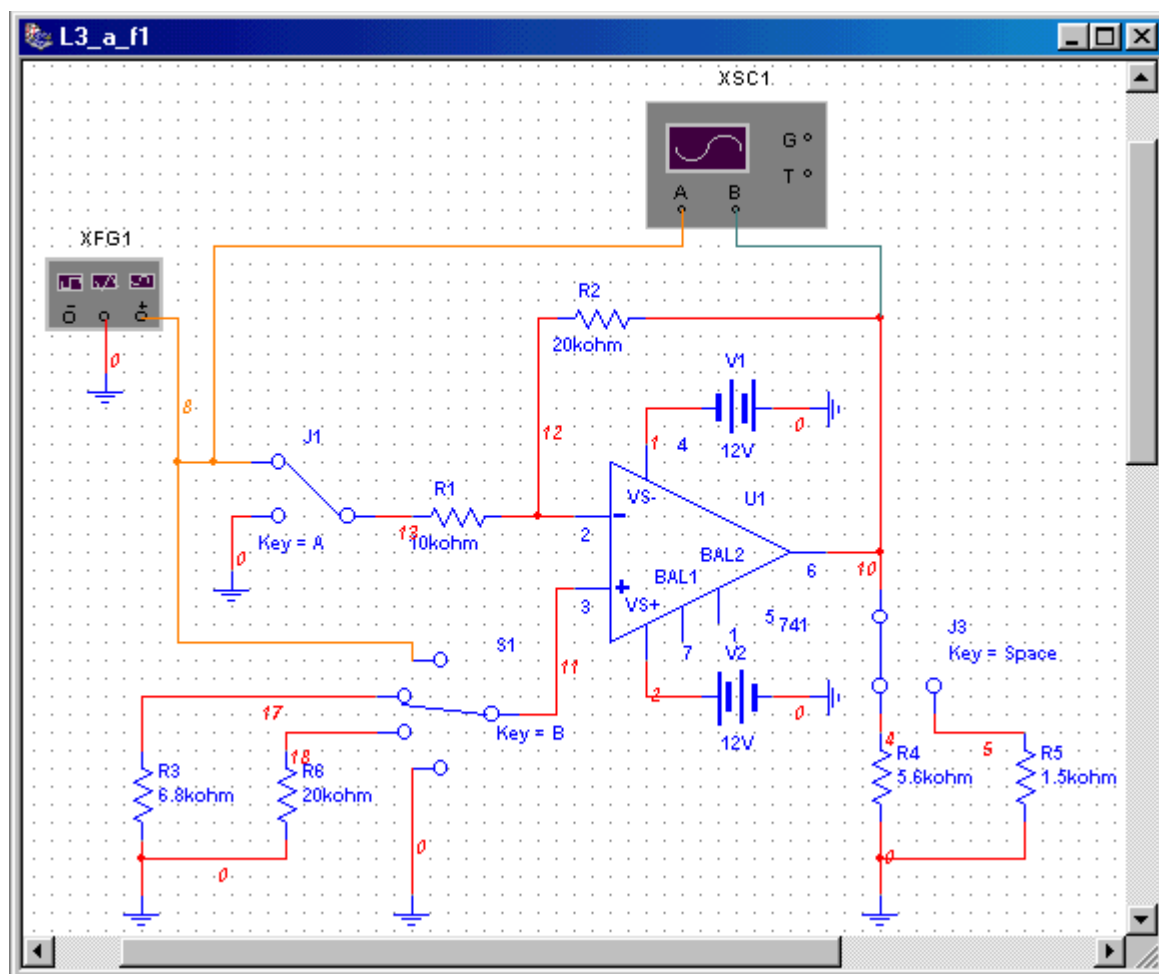


Fig. 5

Efectul rezistenței de sarcină asupra amplificării în buclă închisă poate fi evidențiat prin conectarea celei de-a doua rezistențe de sarcină,  $R_5 = 1,5 \text{ k}\Omega$ .

**Răspunsul în frecvență.** Caracteristicile de frecvență ale amplificatorului inversor se obțin ca rezultat al analizei în c.a. Pentru aceasta, se selectează **Simulate/Analyses/AC Analysis**, se fixează parametrii analizei (în tab-ul **Analysis Parameters**) și se selectează variabila de ieșire (potențialul nodului 10). Caracteristicile câștig – frecvență și fază – frecvență sunt date în fig. 7.

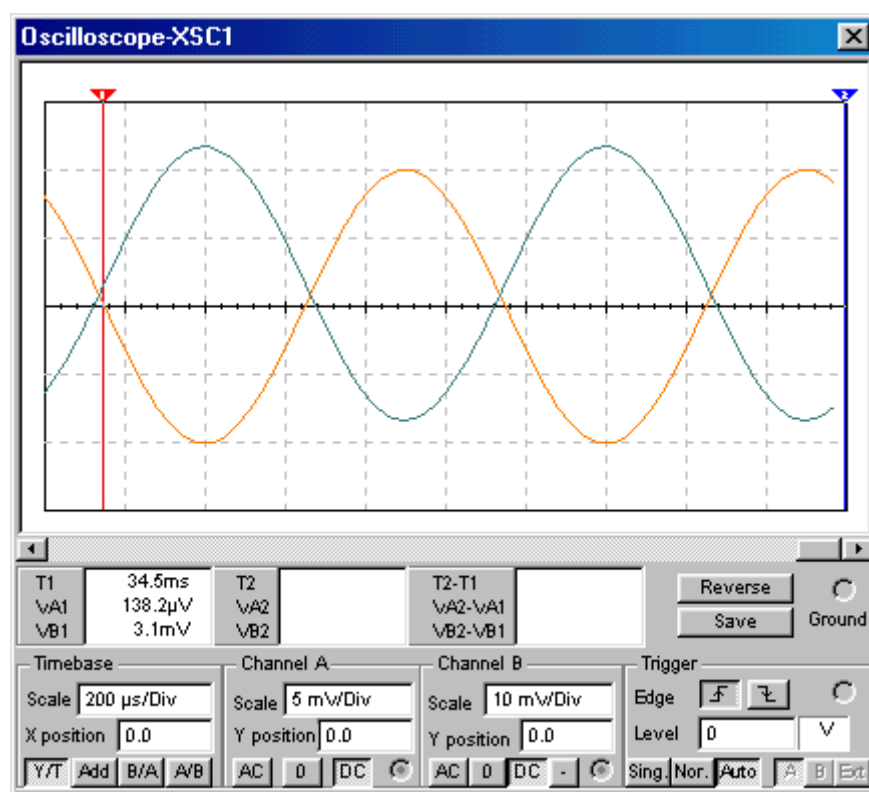


Fig. 6

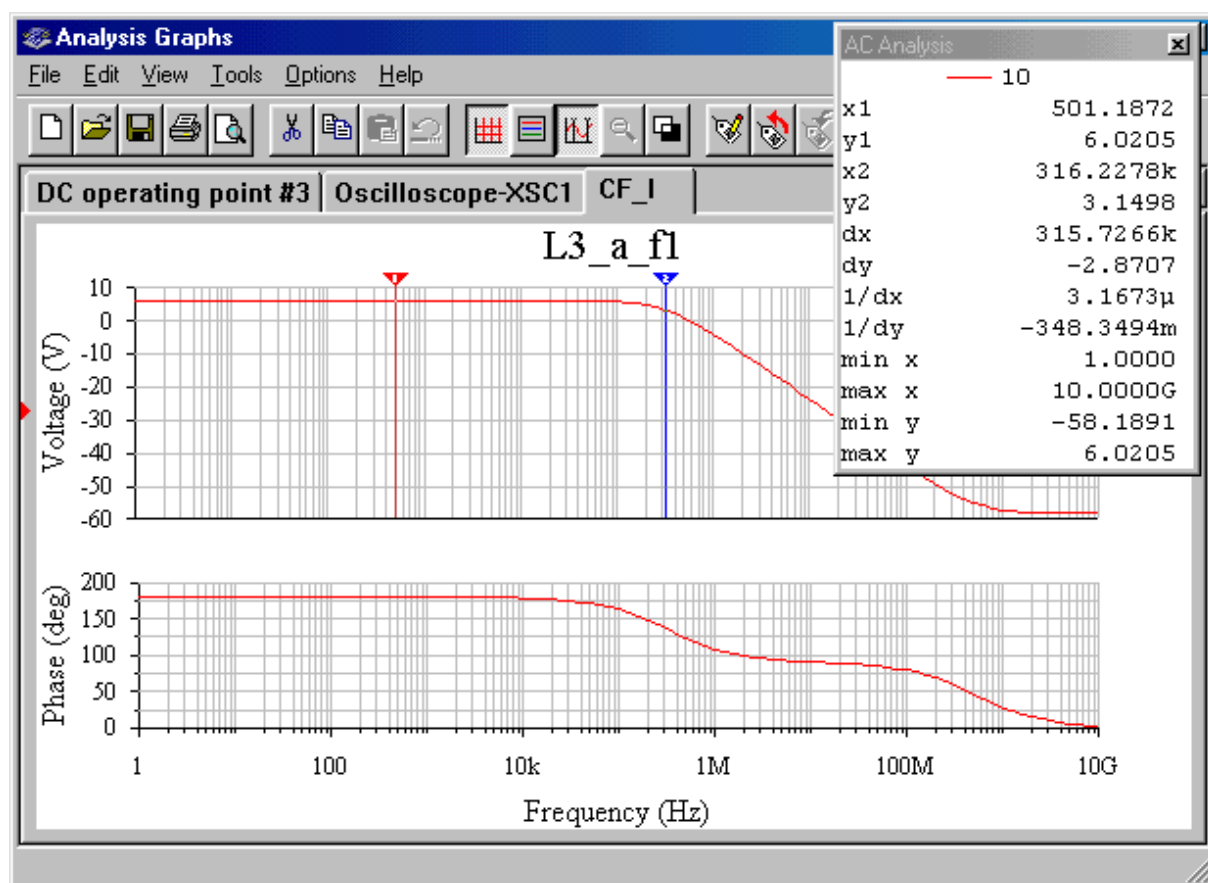


Fig. 7

**Caracteristica statică de transfer.** Caracteristica statică de transfer a amplificatorului furnizează informații privind amplificarea în buclă închisă a circuitului și amplitudinea maximă a semnalului de ieșire nedistorsionat, prin nivelurile de saturație ale amplificatorului, ca și domeniul maxim al semnalului de intrare care este amplificat liniar. Pentru obținerea caracteristicii statice de transfer, se folosește submeniul **DC Sweep Analysis**. În schema amplificatorului, se înlocuiește generatorul de funcții cu o **sursă de tensiune continuă**, V3, ca în fig. 8.

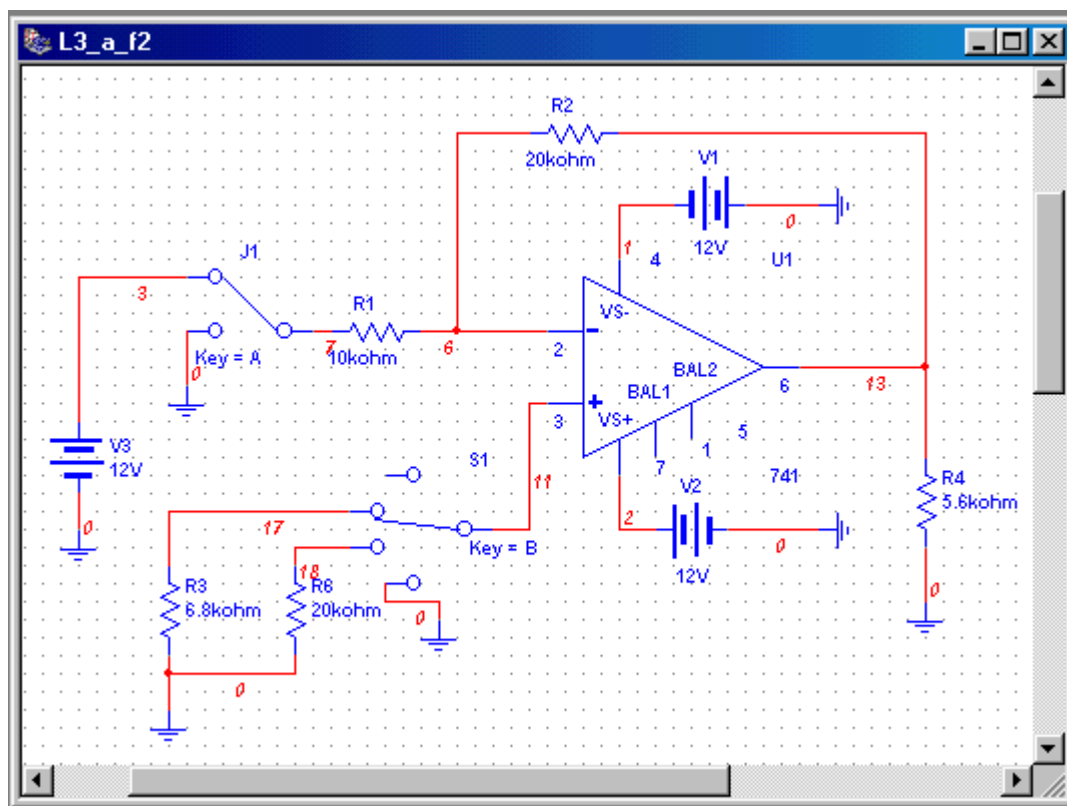


Fig. 8

Se selectează **Simulate/Analyses/DC Sweep Analysis**. În fereastra de dialog, se precizează sursa V3 ca element de baleiaj și se fixează parametrii analizei: domeniul tensiunii ce va fi baleiat și pasul de incrementare ( $v_{v3}$ : -7 V; +7 V; 0.5 V). Cu potențialul nodului 13 ca variabilă de ieșire, se dă comanda de simulare și se obține graficul caracteristicii statice de transfer din fig. 9.

**Rezultatele simulării.** Din măsurarea amplitudinii semnalului de ieșire pe ecranul osciloscopului (fig. 6), se obține modulul amplificării de tensiune în buclă închisă,  $|A_{UR0}| = U_{om}/U_{im} = 20\text{mV}/10\text{mV} = 2$ . Formele de undă ale tensiunii de intrare și de ieșire, ca și diagrama fază-frecvență arată că montajul este de tip inversor: în banda de trecere, semnalul de ieșire este defazat cu  $180^\circ$  față de semnalul de intrare.

*Caracteristica câștig – frecvență* (fig. 7) indică un câștig în buclă închisă, în bandă,  $G_{UR0} = 20\log |A_{UR0}| = 6,02\text{ dB}$ , o bandă de trecere de 316 kHz ( $f_{sr} = 316\text{ kHz}$ ). Panta de scădere a câștigului la

frecvențe înalte ( $-20$  dB/dec) și variația fazei ( $-45^\circ$ /dec) sunt caracteristice amplificatoarelor compensate în frecvență, cu pol dominant.

Din datele cursorilor de pe graficul *caracteristicii statice de transfer*, se determină: nivelurile de saturație ale AO,  $U_{Osat}^\pm = \pm 11,1155$  V ( $\min y = -11,1155$  V;  $\max y = 11,1155$  V), amplitudinea maximă a semnalului amplificat nedistorsionat,  $U_{om,max} = 10$  V, domeniul maxim al semnalului de intrare care este amplificat liniar,  $U_{im,max}^\pm = \pm 5$  V, și amplificarea de tensiune a circuitului (*panta regiunii liniare a caracteristicii*),  $A_{UR0} = dy/dx = -9,9998$  V/5V = -2. Poziționarea unui cursor în originea axelor ( $vv3 = U_i = 0$  V) arată că tensiunea de offset la ieșire este de 3,3929 mV. O tensiune de offset la ieșire de 3,1 mV este văzută și pe forma de undă a semnalului de ieșire (fig. 6).

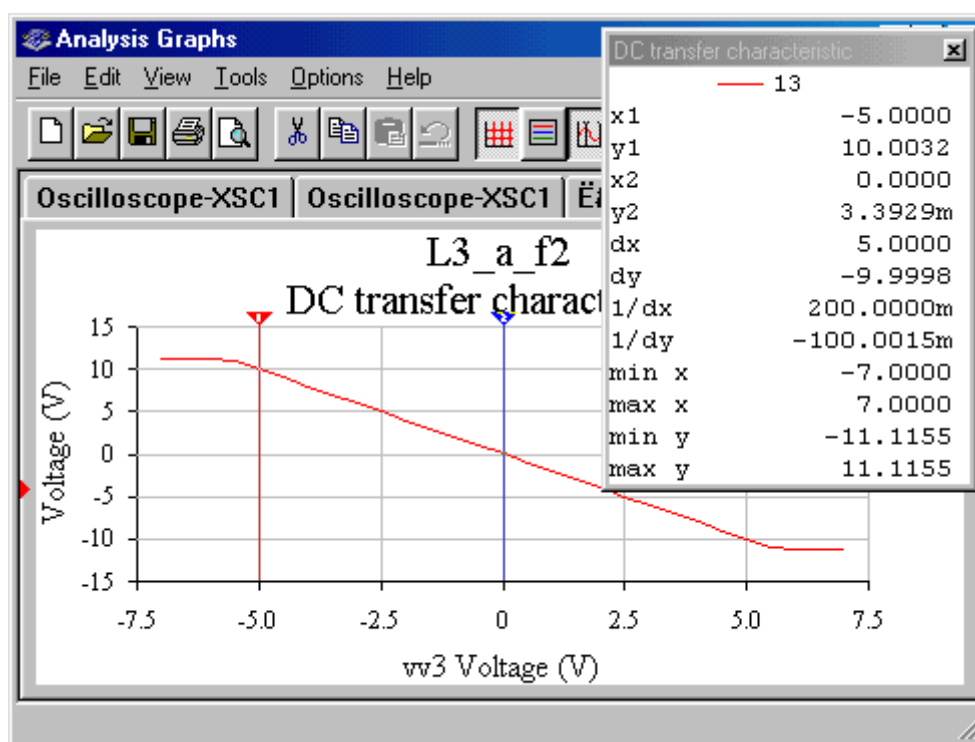


Fig. 9

**Rezultate teoretice.** Amplificarea în buclă închisă este  $A_{UR0} = -R_2/R_1 = -20\text{k}\Omega/10\text{k}\Omega = -2$ . Folosind valoarea parametrului  $f_t$  al AO tip LM747 ( $f_t = 1$  MHz), se determină  $f_{sr} = f_t / |A_{UR0}| = 1\text{ MHz}/2 = 500$  kHz. Nivelurile de saturație sunt inferioare tensiunilor de alimentare (aproximativ 11,5 V).



### c. AO\_N.

Se configurează amplificatorul de c.c., de tip neinversor, cu rezistență de sarcină  $R_4 = 5,6 \text{ k}\Omega$  (fig. 10). Pentru amplificatorul de c.c., de tip neinversor, se repetă simulările și analizele efectuate pentru montajul de tip inversor.

Se setează **generatorul de funcții** pe semnal sinusoidal, cu amplitudinea  $U_{im} = 10 \text{ mV}$ , frecvența  $1 \text{ kHz}$  și se simulează circuitul. Formele de undă ale semnalelor de intrare și de ieșire, sinfaze (fig. 11), arată că amplificatorul este de tip neinversor și, în banda frecvențelor de trecere, amplificarea de tensiune în buclă închisă este  $A_{UR0} = U_{om}/U_{im} = 30\text{mV}/10\text{mV} = 3$ .

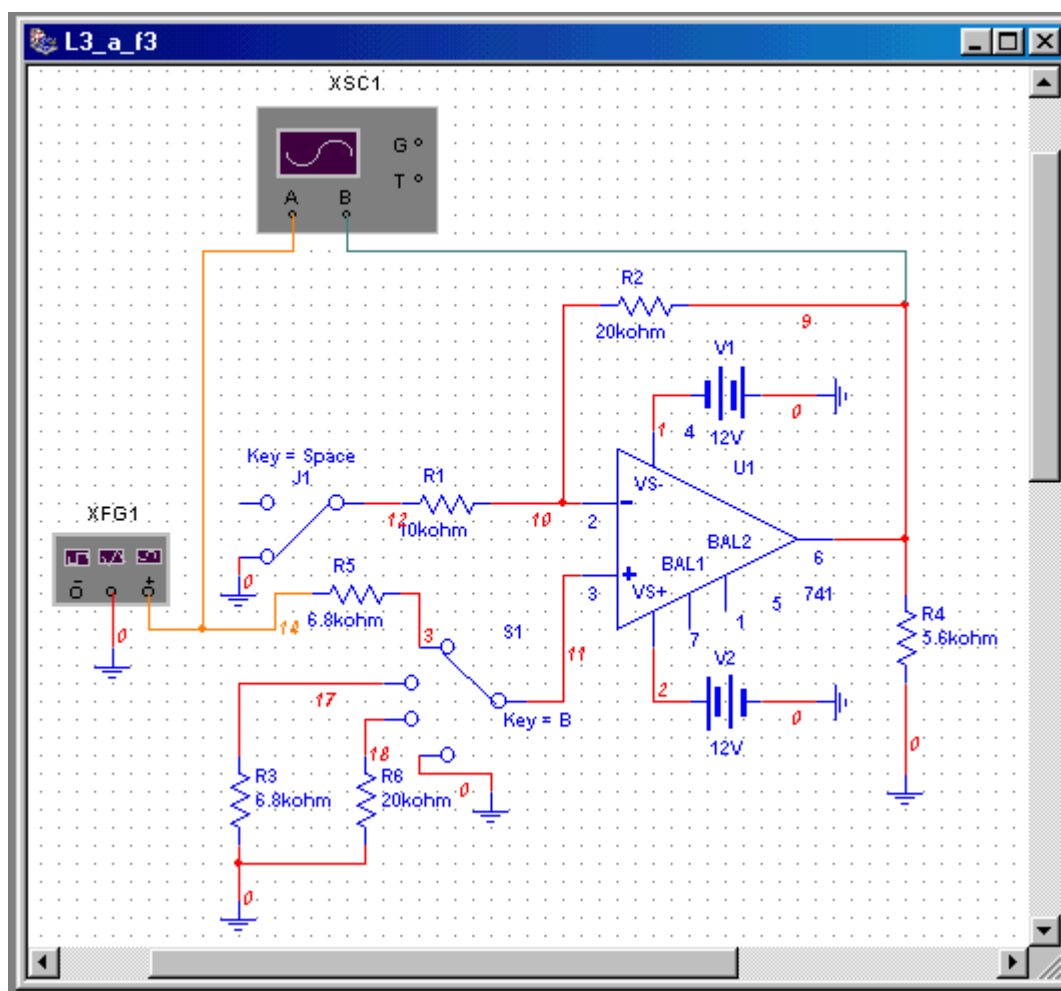


Fig. 10

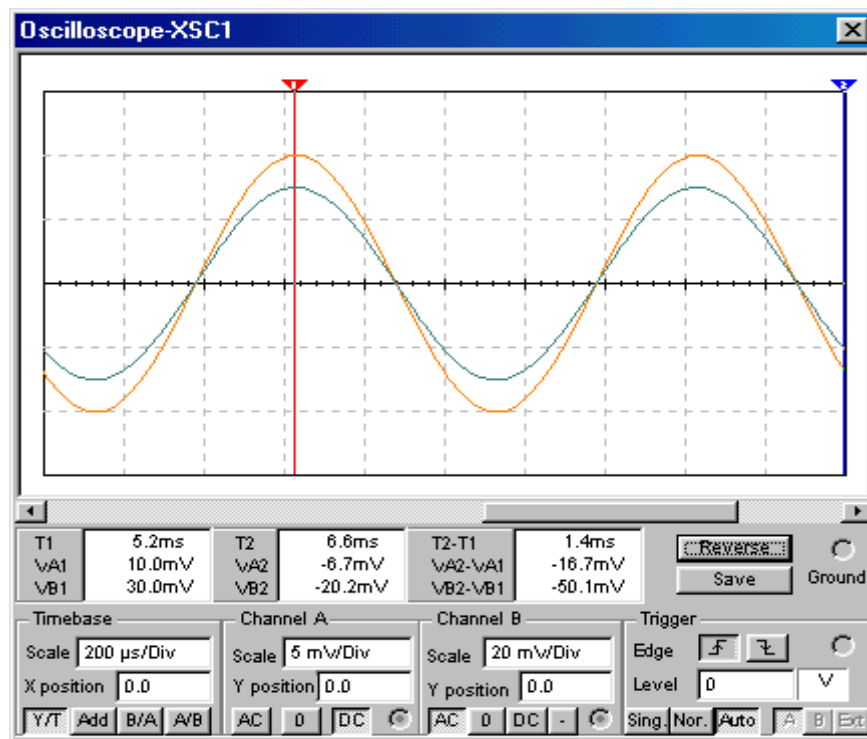


Fig. 11

**Răspunsul în frecvență.** Caracteristicile de frecvență ale amplificatorului inversor se obțin ca rezultat al analizei în c.a. Pentru aceasta, se selectează **Simulate/Analyses/AC Analysis**, se fixează parametrii analizei, în tab-ul **Analysis Parameters**, și se selectează variabila de ieșire (potențialul nodului 9). *Caracteristicile câștig – frecvență și fază – frecvență* sunt date în fig. 12.

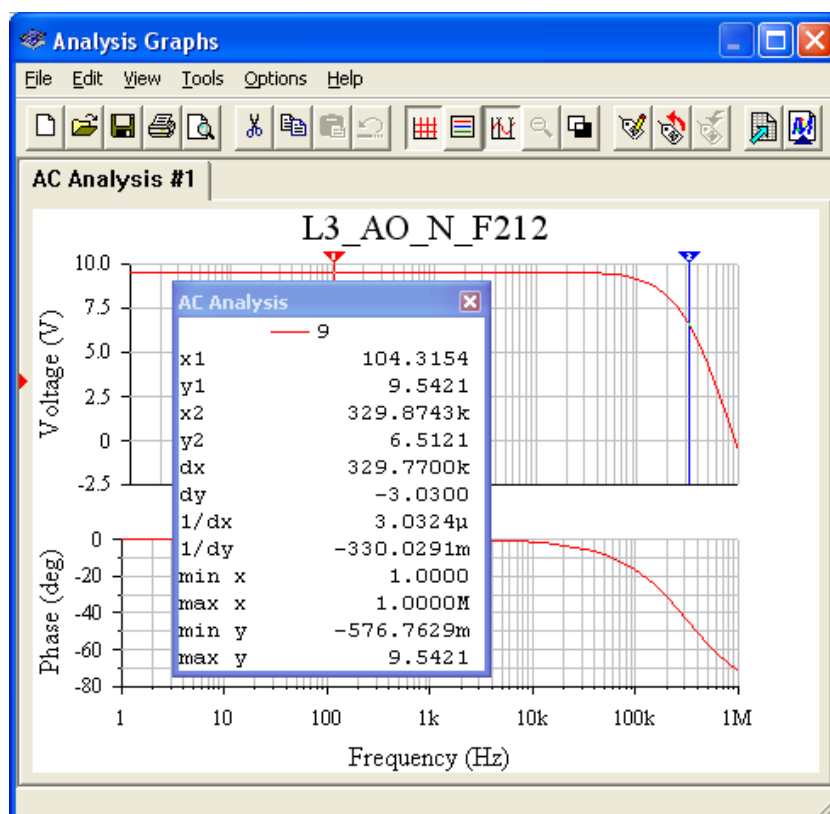


Fig. 12

**Caracteristica statică de transfer.** Caracteristica statică de transfer a amplificatorului furnizează informații privind amplificarea în buclă închisă a circuitului și amplitudinea maximă a semnalului de ieșire nedistorsionat, prin nivelurile de saturație ale amplificatorului, ca și domeniul maxim al semnalului de intrare care este amplificat liniar. Pentru obținerea caracteristicii statice de transfer, se folosește submeniul de analiză **DC Sweep Analysis**, în același mod ca în cazul amplificatorului inversor. *Caracteristica statică de transfer* a amplificatorului neinversor este dată în fig. 13.

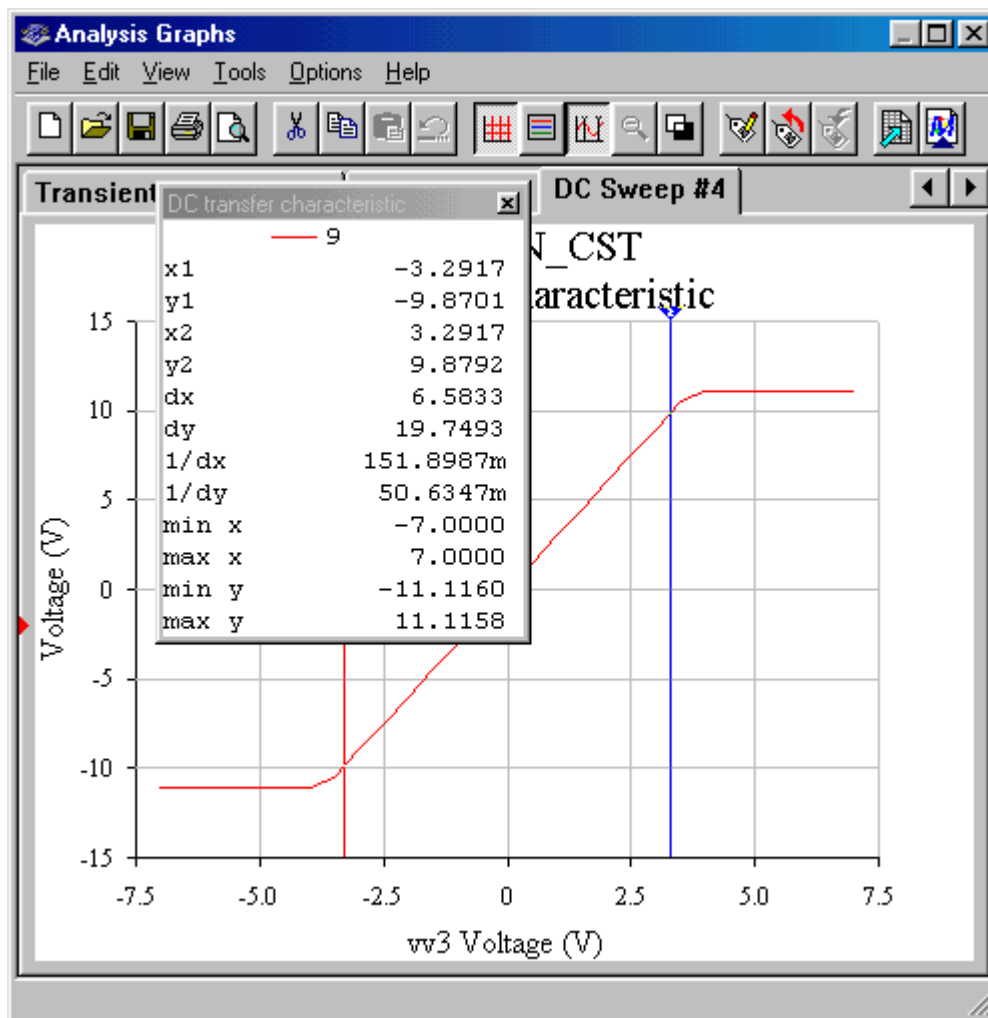


Fig. 13

**Rezultatele simulării.** *Diagrama câștig – frecvență* (fig. 12) indică un câștig în buclă închisă, în bandă,  $G_{UR0} = 9,5411$  dB, o bandă de trecere de 330 kHz ( $f_{sr} = 330$  kHz). Panta de scădere a câștigului la frecvențe înalte este  $-20$  dB/decadă, iar faza amplificării în banda de trecere este  $0^\circ$ .

Din datele cursorilor de pe graficul *caracteristicii statice de transfer*, se determină: nivelurile de saturație ale AO,  $U_{O\text{sat}}^{\pm} = \pm 11,1158 \text{ V}$ , amplitudinea maximă a semnalului amplificat nedistorsionat,  $U_{om,\text{max}} = 10 \text{ V}$ , domeniul maxim al semnalului de intrare care este amplificat liniar,  $U_{im,\text{max}}^{\pm} = \pm 3,2917 \text{ V}$ , și amplificarea de tensiune a circuitului (panta regiunii liniare a caracteristicii),  $A_{UR0} = dy/dx = 19,7493\text{V}/6,5833\text{V} = 3$ . Poziționarea unui cursor în originea axelor ( $v_{v3} = U_i = 0 \text{ V}$ ) arată că tensiunea de offset la ieșire este de  $3,3929 \text{ mV}$ .

**Rezultate teoretice.** Amplificarea în buclă închisă este  $A_{UR0} = 1 + R_2/R_1 = 1 + 20\text{k}\Omega/10\text{k}\Omega = 3$ ; banda de trecere a amplificatorului este  $f_{sr} = f_t/A_{UR0} = 1\text{MHz}/3 = 333 \text{ kHz}$ . Nivelurile de saturație ale AO nu se modifică.