

Lucrarea de laborator nr. 2

Macromodelarea și analiza SPICE a amplificatoarelor operaționale

Scopul lucrării: însușirea principiilor modelării și macromodelării dispozitivelor și circuitelor electronice; studiul și proiectarea macromodelor amplificatoarelor operaționale; însușirea tehnicilor de simulare pentru analiza SPICE a macromodelor AO și determinarea principalelor caracteristici ale acestora.

1. Scopul macromodelării:

Programul PSpice este un simulator la nivel de dispozitiv care calculează răspunsul prin rezolvarea numerică a sistemului de ecuații a circuitului construit pe baza legilor lui Kirchhoff și a ecuațiilor caracteristice de funcționare ale elementelor de circuit, ceea ce îi conferă o foarte bună precizie. Însă, în cazul circuitelor complexe care pot conține multe circuite integrate apare dezavantajul unui timp de simulare foarte mare. Din acest motiv, în unele analize care se fac pentru verificarea funcționării de principiu a circuitului, nu este necesar să se folosească descrierea internă completă a tuturor circuitelor integrate din componența sa. Astfel, este mult mai avantajos să se folosească pentru anumite dispozitive sau circuite integrate **macromodele** care să păstreze, pe de o parte, caracteristicile funcționale importante ale circuitului modelat și, pe de altă parte, să aibă o structură alcătuită în principal din surse comandate, surse independente, elemente pasive (R, L, C) și, eventual, un număr strict necesar de diode și tranzistoare. Rezultatul va fi acela că circuitul complex care conține macromodele va fi, din punct de vedere al simulatorului, mai simplu iar analiza se va putea efectua într-un timp mai scurt.

Un alt motiv al macromodelării este acela că producătorii de circuite integrate doresc, în general, să păstreze confidențialitatea cu privire la structura internă detaliată a circuitelor pe care le furnizează. Ca urmare, ei pun la dispoziție utilizatorilor, pe lângă datele de catalog cu privire la performanțele circuitelor integrate sau dispozitivelor respective, macromodele descrise ca subcircuit în format SPICE. Aceste macromodele pot fi folosite de utilizatori pentru realizarea simulărilor circuitelor implementate cu dispozitivele sau circuitele integrate respective.

Macromodelele, în general, nu pot simula decât o parte din caracteristicile circuitului integrat real, dar, în schimb, realizează un compromis acceptabil între precizie și timpul de analiză.

În prezent sunt definite macromodele pentru marea majoritate a dispozitivele sau circuitele integrate tradiționale. Macromodelele corespunzătoare unei categorii de circuite integrate folosesc, în general, aceeași topologie (structură) de circuit cu care se pot modela majoritatea caracteristicilor importante. Câteva exemple de dispozitive sau circuite integrate pentru care în simulatoarele de circuit se folosesc macromodele sunt: amplificatoarele operaționale, comutatoare integrate, multiplexoare analogice, referințe de tensiune, tiristoare, etc.

Programul OrCad PSpice conține o multitudine de biblioteci de dispozitive semiconductoare dar și de macromodele ale unor dispozitive sau circuite produse de diverse firme (Analog Devices, Harris, Motorola, Texas Instruments, National Semiconductor, Siemens, Philips, Maxim, BurrBrown etc.). Pentru programul OrCad PSpice ver. 9.2 bibliotecile de modele și macromodele (fișierele cu extensia **.lib**) sunt localizate și pot fi vizualizate în directorul unde este instalat programul urmând calea:

... \OrCad\Capture\Library\Ps spice\

Observație: În timpul vizualizării fișierelor cu bibliotecile de modele și macromodele nu trebuie efectuate nici un fel de modificări asupra acestora. La închidere, fișierele nu trebuie salvate dacă, eventual, a suferit modificări.

2. Macromodelarea amplificatoarelor operaționale

O categorie importantă de circuite integrate a căror macromodele se folosesc pe scară largă în analize o reprezintă amplificatoarele operaționale. Macromodelele amplificatoarelor operaționale se diferențiază după tipul etajului de intrare (cu tranzistoare bipolare, cu tranzistoare cu efect de câmp – TEC-J – sau cu tranzistore MOS), în rest topologia fiind identică.

Macromodelele amplificatoarelor operaționale utilizează elemente ideale de circuit, atât pasive cât și active, împreună cu un etaj diferențial de intrare format din tranzistoare de același tip cu cele din etajul de intrare al AO reale pentru a simula cât mai fidel anumite caracteristici ale acestora. Macromodelul, datorită structurii simplificate, nu poate simula toate caracteristicile unui AO real. Astfel, variația cu temperatura a parametrilor AO, rejectia surselor de alimentare (PSRR), zgomotul, etc. nu pot fi simulate de către macromodel.

În continuare se prezintă macromodelul amplificatoarelor operaționale a căror etaj diferențial de intrare este realizat cu tranzistoare bipolare de tip npn.

În Fig.1 se prezintă schema reală a amplificatorului operațional $\mu A741$ iar în Fig. 2 este reprezentată structura de circuit a macromodelului amplificatoarelor operaționale.

Macromodelul modelează următorii parametri de catalog a unui amplificator operațional:

- curenții de intrare I_B^+, I_B^- .
- curentul de offset și tensiunea de offset la intrare (I_{OS} și V_{OS}).
- viteza de variație a ieșirii (slew-rate) pozitivă și negativă (SR^+, SR^-).
- valoarea finită a rezistenței de intrare pe modul comun.
- valoarea finită a amplificării în buclă deschisă, A_{VO} , polul dominant, f_p , și rezerva de fază, $\Delta\varphi_0$.
- rejectia finită a semnalului de mod comun, CMRR.
- curentul consumat din sursele de alimentare (puterea disipată).
- impedanța de ieșire variabilă cu frecvența.
- limitarea curentului maxim la ieșire, I_{SC} , și a excursiei de tensiune la ieșire, V_{out}^+, V_{out}^- .

Determinarea valorii elementelor de circuit din cadrul macromodelului se face pe baza parametrilor de catalog menționați mai sus. Fiecare element din cadrul macromodelului are un rol bine definit în modelarea unei anumite caracteristici a AO. De exemplu, capacitatea $C1$ modelează rezerva de fază iar sursa de curent Fb modelează, printre altele, amplificarea în buclă deschisă a amplificatorului.

Mai multe detalii privind modul și relațiile de calcul al valorii elementelor de circuit dn cadrul macromodelului pot fi găsite în [BUR], partea I, cap. XI.

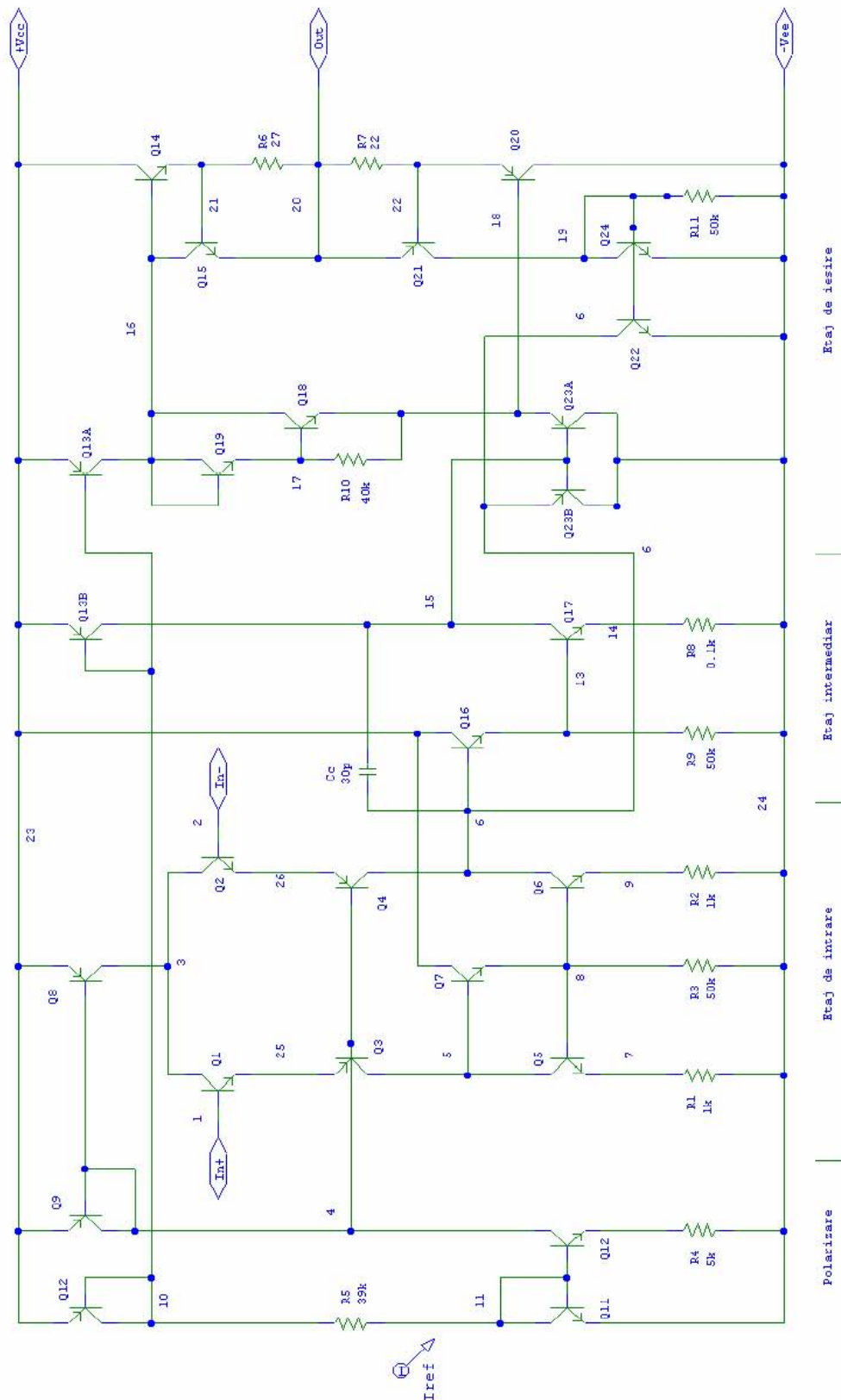
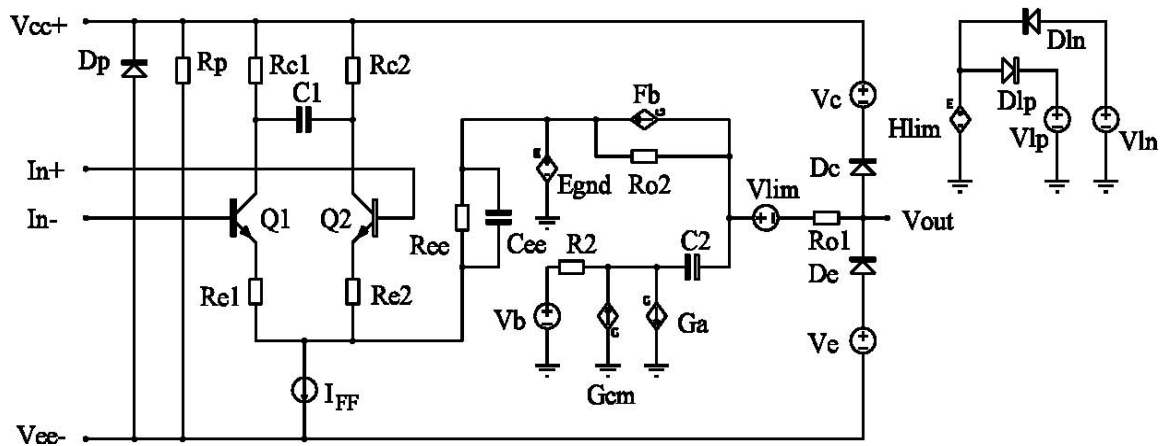


Fig. 1 Schema electrică a amplificatorului operațional $\mu A741$

Fig. 2 Schema macromodelului Spice a amplificatorului operațional $\mu A741$

Macromodelul amplificatorului operațional $\mu A741$ este descris în format SPICE ca subcircuit astfel:

```

* -----
* connections:  non-inverting input
*               | inverting input
*               | | positive power supply
*               | | | negative power supply
*               | | | | output
*               | | | | |
.subckt uA741  1 2 3 4 5
*
c1  11 12 8.661E-12
c2   6  7 30.00E-12
dc   5 53 dy
de  54  5 dy
dlp 90 91 dx
dln 92 90 dx
dp   4  3 dx
egnd 99  0 poly(2),(3,0),(4,0) 0 .5 .5
fb   7 99 poly(5) vb vc ve vlp vln 0 10.61E6 -1E3 1E3 10E6 -10E6
ga   6  0 11 12 188.5E-6
gcm  0  6 10 99 5.961E-9
iee  10  4 dc 15.16E-6
hlim 90  0 vlim 1K
q1  11  2 13 qx
q2  12  1 14 qx
r2   6  9 100.0E3
rc1  3 11 5.305E3
rc2  3 12 5.305E3
re1  13 10 1.836E3
re2  14 10 1.836E3
ree  10 99 13.19E6
ro1  8  5 50
ro2  7 99 100
rp   3  4 18.16E3
vb   9  0 dc 0
vc   3 53 dc 1
ve  54  4 dc 1
vlim 7  8 dc 0
vlp  91  0 dc 40
vln  0 92 dc 40
.model dx D(Is=800.0E-18 Rs=1)
.model dy D(Is=800.0E-18 Rs=1m Cjo=10p)
.model qx NPN(Is=800.0E-18 Bf=93.75)
.ends

```

Acest macromodel poate fi găsit în fișierul bibliotecă **opamp.lib** și poate fi instanțiat în schemele de test viitoare ținându-se cont de numele atribuit subcircuitului (UA741) și ordinea terminalelor sale. Semnificația terminalelor macromodelului este prezentată în liniile

de comentariu care preced definiția subcircuitului.

În cadrul fișierelor de simulare (.cir) specificarea fișierelor cu bibliotecile de modele poate fi realizată prin comanda

.lib nom.lib

unde “nom.lib” este un fișier care conține lista tuturor bibliotecilor de modele preinstalate în cadrul programului OrcCad Pspice.

3. Aplicații – simularea macromodelului AO UA741 și determinarea principalelor caracteristici ale unui AO.

În cele ce urmează se vor implementa diverse configurații de test pentru simularea și determinarea principalelor caracteristici și mărimi care caracterizează un AO UA741.

Se recomandă editarea circuitelor de test direct în fișierul .cir, fără editare de schemă.

3.1. Caracteristica de amplificare în buclă deschisă:

Pentru a determina caracteristica de amplificare în buclă deschisă a AO, se utilizează configurația din figura de mai jos, în care V_{in} este o sursă de semnal mic iar sursele de alimentare V_{cc} și V_{ee} au valoarea de 15V.

Să se descrie fișierul de intrare (.cir) pentru circuitul de test și să se efectueze o analiză AC în intervalul de frecvențe de la 0.1Hz la 100KHz.

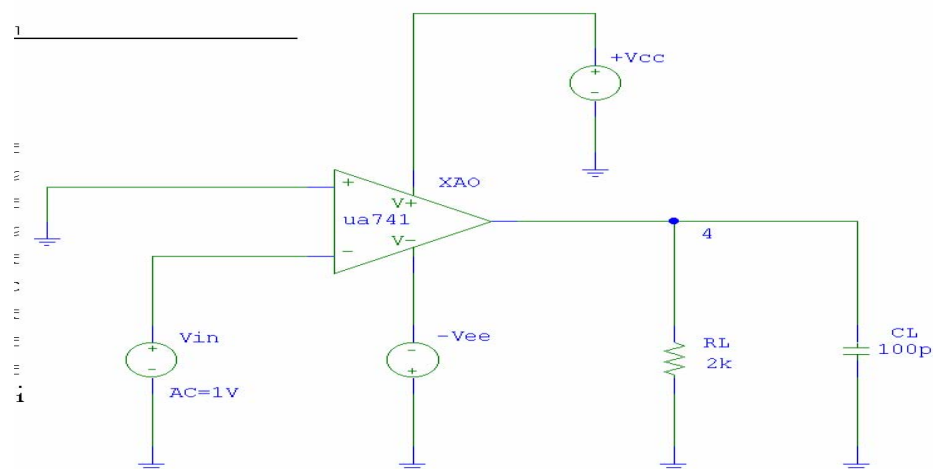


Fig. 3. Circuitul de test pentru determinarea caracteristicii de amplificare în buclă deschisă.

După efectuarea simulării, să se vizualizeze în *Probe* caracteristica de amplificare în buclă deschisă, în decibeli, $V_{db}(4)$ și caracteristica de fază, $V_p(4)$, și să se determine:

- amplificarea în buclă deschisă la A_{V0} .
- banda de frecvență la -3dB.
- rezerva de fază
- frecvența la care amplificarea în buclă deschisă devine unitară (f_{0dB}).

3.2. Caracteristica de variație a CMRR cu frecvența

Factorul de rejecție a modului comun (CMRR) este definit ca raportul dintre amplificarea de mod diferențial și amplificarea de mod comun. Pentru a simula cu Spice variația CMRR cu frecvența se utilizează o configurație de circuit în care amplificarea de mod diferențial este unitară. În acest mod, CMRR va fi egal cu inversa amplificării de mod comun.

Configurația de circuit pentru simularea variației CMRR cu frecvența este prezentată în figura de mai jos. Semnalul furnizat de sursa V_{in} este un semnal de mod comun. Dacă sursei V_{in} i se specifică valoarea AC 1, atunci amplificarea de mod comun este numeric egală cu nivelul ieșirii.

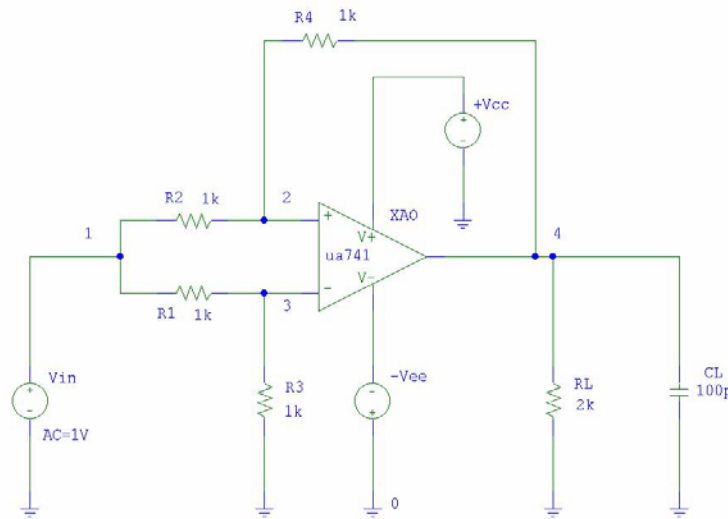


Fig. 4 Circuitul pentru determinarea CMRR

Creați și editați un nou fișier .cir pentru circuitul de test. Efectuați analiza în domeniul frecvență în intervalul 1Hz – 1MHz.

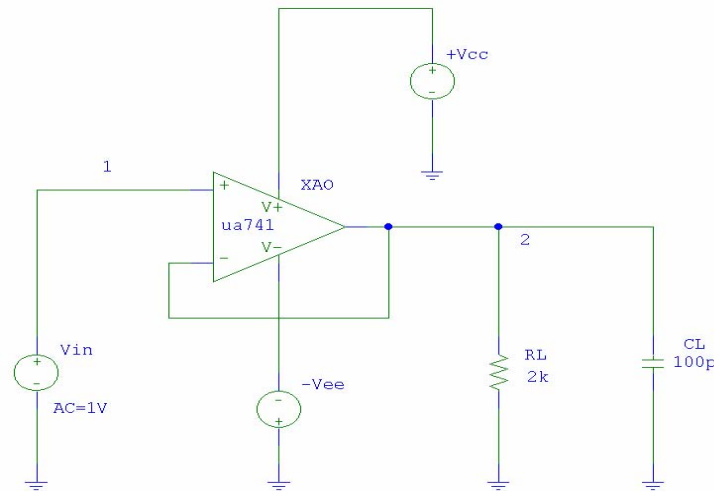
Caracteristica de variație a CMRR (în decibeli) cu frecvența se vizualizează în *Probe* cu expresia: $-DB(V(4))$. Determinați de pe caracteristică valoarea maximă a CMRR.

3.3. Slew-rate-ul pozitiv și negativ (SR^+ , SR^-)

Slew-rate-ul reprezintă o măsură a vitezei de variație a ieșirii amplificatorului operațional când la intrare are loc o comutație. Viteza de variație finită a ieșirii (se măsoară în V/ μ s) se datorează curentului maxim limitat pe care îl poate furniza etajul de ieșire al amplificatoarelor operaționale.

Pentru a determina slew-rate-ul amplificatorului operațional se folosește configurația de repetor, așa cum este prezentată în figura de mai jos. La intrare se aplică o formă de undă dreptunghiulară cu variație între $\pm 5V$, timpi de tranziție mici (de ex. $t_r=t_f=0.5\mu s$) și perioadă de 80 μs .

În urma analizei în domeniul timp se vor vizualiza forma de undă de la intrare împreună cu forma de undă a tensiunii de la ieșirea AO. Pe baza formei de undă de la ieșire să se determine valorile pentru SR^+ și SR^- .



3.4 Impedanța de ieșire

Determinați variația cu frecvența a impedanței de ieșire a AO. Indicație: se va utiliza configurația AO cu buclă deschisă, în care ambele intrări sunt conectate la masă iar la ieșire, în locul capacității CL, se aplică o sursă de curent de semnal mic (AC 1)

Efectuați analiza în domeniul de frecvență în intervalul 1Hz – 1MHz. și reprezentați în *Probe* expresia care să reprezinte impedanța de la la ieșirea AO.

Observație: Se va ține cont la scrierea expresiei impedanței de ieșire a AO că impedanța văzută de sursa de test este dată de RL în paralel cu impedanța de ieșire a AO.

Determinați de pe grafic valorile impedanței de ieșire a AO la joasă frecvență (R_{out_dc}) și la înaltă frecvență (R_{out_ac}). Verificați dacă rezistoarele Ro1 și Ro2 din macromodel îndeplinesc relațiile: $Ro1 = R_{out_ac}$ și $Ro2 = R_{out_dc} - R_{out_ac}$.

3.5 Distorsiuni armonice

Folosind configurația de repetor, să se determine coeficientul de distorsiuni armonice al AO pentru cazul în care la intrare se aplică o formă de undă sinusoidală cu frecvența de 1kHz. Coeficientul de distorsiuni armonice se va determina cu comanda .FOUR pentru trei valori ale amplitudinii 1V, 5V și 10V. Pentru aceasta se va efectua o analiză parametrică în domeniul timp pe durata a 5 perioade a formei de undă de la intrare, analiză ce va fi repetată cu comanda .STEP pentru cele trei valori ale amplitudinii.

Observații: PSpice calculează coeficientul de distorsiuni armonice pe baza componentelor Fourier a formei de undă a tensiunii de ieșire. Aceste componente Fourier sunt calculate pe baza valorilor tensiunii de ieșire din ultima perioadă a formei sale de undă rezultată în urma analizei. Valorile formei de undă din ultima perioadă sunt valori situate echidistant în timp egal cu pasul de tipărire (primul parametru din comnda.TRAN). În concluzie, ori de câte ori se dorește calculul distorsiunilor armonice sau a componentelor Fourier analiza în domeniul timp trebuie să îndeplinească următoarele două condiții:

- timpul final de simulare să fie mai mare decât perioada formei de undă a tensiunii căreia i se calculează componentele Fourier.
- În comanda .TRAN pasul de tipărire și pasul maxim de calcul să fie stabiliți astfel încât nr. de puncte de calcul pe o perioadă a formei de undă să fie cel puțin 50. Al treilea parametru din comanda .TRAN (timpul de la care datele sunt memorate) să fie stabilit 0 sau o valoare cel mult egală cu momentul de timp al începutului ultimei perioade a formei de undă.

Bibliografie:

[BUR] D. Burdia, G.S. Popescu - Proiectarea asistată de calculator a circuitelor electronice: SPICE și VHDL, Ed. MatrixROM, București -1999

Timp de lucru: 3 ore.