

Analize statistice

Analizele statistice constau în efectuarea repetată a unei analize standard (.DC, .AC, .TRAN), în funcție de parametrii de model cărora le sunt specificate toleranțe. Analizele statistice sunt .MC (Monte Carlo) și .WCASE (cazul cel mai defavorabil) și nu pot fi efectuate simultan.

.MC (analiza Monte Carlo)

Forma generală a comenzii este următoarea:

.MC <nr rulări> <analiză> <var ieșire> <funcție> [opțiune]* [SEED=valoare]

<nr rulări> reprezintă numărul total de repetări ale analizei standard. Prima rulare utilizează valorile nominale ale tuturor parametrilor de model. Următoarele rulări utilizează variații ale parametrilor de model, conform toleranțelor DEV și/sau LOT specificate. Toleranțele DEV (ale unui dispozitiv individual) sunt independente, fiecare dispozitiv variind independent, în timp ce toleranța LOT (a lotului de dispozitive) determină ca toate dispozitivele cu modelul respectiv să utilizeze aceleași ajustări ale parametrului de model.

<analiză> specifică un tip de analiză standard (.DC, .AC sau .TRAN). La prima rulare a analizei .MC se efectuează toate analizele conținute în fișierul circuitului. La rulările următoare ale analizei .MC se efectuează numai analiza standard menționată.

<var ieșire> reprezintă variabila pentru care se dorește tipărirea valorilor în urma analizei și are același format cu variabila de ieșire din comanda .PRINT.

<funcție> specifică operația aplicată valorilor variabilei de ieșire, pentru a selecta una din ele. Această valoare constituie baza comparației între rularea nominală și cele următoare. <funcție> poate fi una din următoarele:

- YMAX - găsește valoarea absolută a diferenței maxime a fiecărei forme de undă față de rularea nominală;
- MAX - găsește valoarea maximă a fiecărei forme de undă;
- MIN - găsește valoarea minimă a fiecărei forme de undă;
- RISE_EDGE(<valoare>) - găsește primul eveniment când forma de undă trece peste <valoare> pragului. Forma de undă trebuie să conțină unul sau mai multe puncte situate la/sub <valoare>, urmate de cel puțin unul peste <valoare>;
- FALL_EDGE(<valoare>) - găsește primul eveniment când forma de undă trece sub <valoare> pragului. Forma de undă trebuie să conțină unul sau mai multe puncte situate la/peste <valoare>, urmate de cel puțin unul sub <valoare>;

[opțiune]* poate fi una sau mai multe din următoarele:

- LIST - determină tipărirea valorilor actualizate ale parametrilor de model, pentru fiecare rulare;
- OUTPUT <tip> - generează una/mai multe ieșiri în urma analizei, prin intermediul comenzilor .PRINT, .PLOT, .PROBE. Dacă această opțiune este omisă, numai rularea nominală va genera o ieșire. <tip> poate fi unul din următoarele:
 - ALL - determină generarea tuturor ieșirilor după cea corespunzătoare rulării nominale;
 - FIRST <N> - generează ieșiri doar pentru primele N rulări;

- EVERY <N> - generează ieșiri pentru fiecare a N-a rulare;
- RUNS <N>* - efectuează analiza și generează ieșiri numai pentru rulările specificate în listă (lista poate conține maxim 25 de valori).
- RANGE(<val min>,<val max>) - restricționează domeniul de variație în care este evaluată <funcția>. În locul <val min> sau <val max> se poate utiliza caracterul asterisc (*), semnificând toate valorile posibile.

Exemple:

YMAX RANGE(*,2) - YMAX este evaluat pentru toate valorile variabilei analizei (timp, frecvență etc) mai mici sau egale decât 2;

MAX RANGE(1,*) - găsește maximum variabilei de ieșire pentru valorile variabilei analizei mai mari sau egale decât 1.

Dacă opțiunea RANGE este omisă, <funcția> este evaluată pe întregul domeniu de variație al variabilei analizei, fiind echivalentă cu RANGE(*,*).

[SEED=valoare] - definește numărul care stă la baza generatorului de numere aleatoare din cadrul analizei .MC. Numărul trebuie să fie un întreg impar cuprins între 1 și 32767, iar valoarea sa implicită este 17533.

Exemple:

- 1) .MC 10 TRAN V(5) YMAX
- 2) .MC 20 DC IC(Q1) YMAX LIST
- 3) .MC 15 AC VP(8) YMAX LIST OUTPUT ALL
- 4) .MC 10 TRAN V(2) YMAX SEED=9321

În exemplul 1) analiza .MC constă în 10 rulări ale unei analize .TRAN. Pentru variabila de ieșire V(5) se vor tipări diferențele maxime absolute dintre formele de undă corespunzătoare rulărilor secundare și cea nominală.

În exemplul 2) analiza .MC constă în 20 rulări ale unei analize .DC. Pentru variabila de ieșire IC(Q1) se vor tipări diferențele maxime absolute dintre formele de undă corespunzătoare rulărilor secundare și cea nominală. Pentru fiecare rulare se vor tipări valorile actualizate ale parametrilor de model.

În exemplul 3) analiza .MC constă în 15 rulări ale unei analize .AC. Pentru faza tensiunii nodului 8 se vor tipări diferențele maxime absolute dintre formele de undă corespunzătoare rulărilor secundare și cea nominală. Pentru fiecare rulare se vor tipări valorile actualizate ale parametrilor de model. Se vor genera ieșiri pentru toate rulările.

Exemplul 4) este similar cu exemplul 1), cu diferența că se stabilește numărul care stă la baza generatorului de numere aleatoare.

Aplicație rezolvată: Analiza Monte Carlo a unui circuit

Pentru a înțelege modul în care se efectuează analiza Monte Carlo (.MC) și cum sunt furnizate rezultatele, se consideră un circuit RC simplu (filtru trece-bandă) în care rezistoarele au rezistențe cu toleranțe de 20%. Se efectuează o analiză .MC cu 20 de rulări, în care analiza standard este .AC.

Fișierul circuitului este următorul:

```
*Analiza Monte Carlo  
VIN 1 0 AC 1
```

```

C1 1 2 1u
R1 2 0 RMOD 1k
R2 2 3 RMOD 100
C2 3 0 100n
.MODEL RMOD RES(R=1 DEV=20%)
.AC DEC 20 10 100k
.MC 10 AC V(3) YMAX LIST OUTPUT ALL
.PROBE V(3)
.END

```

Prima rulare a analizei .MC este realizată pentru valoarea nominală a parametrului de model R (factorul de multiplicare al rezistenței), adică $R=1$. În celelalte 19 rulări valorile parametrului R variază în limitele toleranței de 20%, în mod independent pentru fiecare din cele două rezistoare R1 și R2. Prezența în comanda .MC a opțiunii LIST determină tipărirea în fișierul de ieșire, pentru fiecare rulare, a valorilor parametrului R corespunzător fiecărui rezistor. De exemplu, în primele două rulări, valorile actualizate ale parametrului de model R utilizat de rezistoarele R1 și R2 sunt prezentate astfel:

```

**** UPDATED MODEL PARAMETERS TEMPERATURE=27.000 DEG C
          MONTE CARLO NOMINAL
*****
CURRENT MODEL PARAMETERS FOR DEVICES REFERENCING RMOD
          R1          R2
R          1.0000E+00  1.0000E+00

**** UPDATED MODEL PARAMETERS TEMPERATURE = 27.000 DEG C
          MONTE CARLO PASS 2
*****
CURRENT MODEL PARAMETERS FOR DEVICES REFERENCING RMOD
          R1          R2
R          9.7702E-01  9.9044E-01

```

În fișierul de ieșire sunt prezentate deviațiile maxime absolute ale caracteristicii V(3) față de caracteristica nominală sub forma următoare:

```

**** SORTED DEVIATIONS OF V(3)          TEMPERATURE = 27.000 DEG C
          MONTE CARLO SUMMARY
*****
Mean Deviation = 1.6486E-03
Sigma = .0421

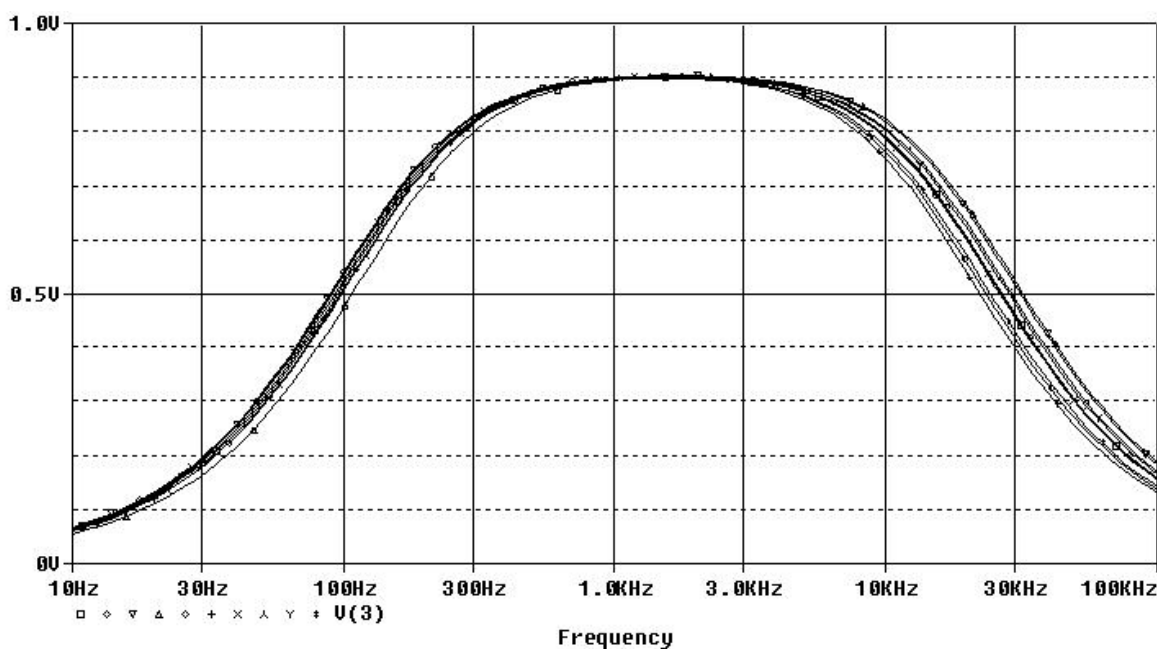
RUN          MAX DEVIATION FROM NOMINAL

Pass 4          .065 (1.54 sigma) higher at F = 28.1840E+03
                (113.56% of Nominal)
Pass 6          .063 (1.50 sigma) lower at F = 22.3870E+03
                (88.743% of Nominal)
Pass 3          .0562 (1.33 sigma) higher at F = 28.1840E+03
                (111.72% of Nominal)
Pass 5          .0444 (1.05 sigma) lower at F = 22.3870E+03
                (92.073% of Nominal)
Pass 10         .0321 (.76 sigma) lower at F = 22.3870E+03
                (94.272% of Nominal)
Pass 8          .0306 (.73 sigma) higher at F = 25.1190E+03
                (105.89% of Nominal)
Pass 9          .0224 (.53 sigma) higher at F = 25.1190E+03
                (104.31% of Nominal)

```

Pass 7 .0118 (.28 sigma) lower at F = 100
 (97.708% of Nominal)
 Pass 2 8.1246E-03 (.19 sigma) lower at F = 100
 (98.428% of Nominal)

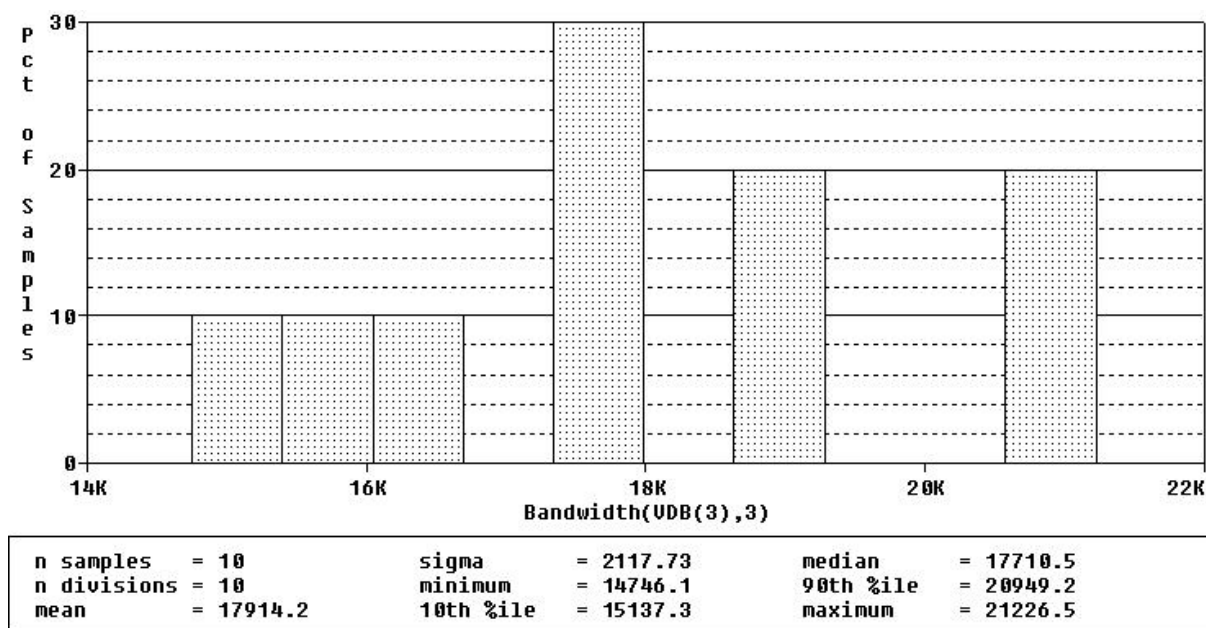
Prin intermediul comenzii .PROBE se pot reprezenta grafic toate formele de undă corespunzătoare rulărilor analizei .MC dacă aceasta conține opțiunea OUTPUT ALL. În caz contrar, se poate reprezenta grafic numai forma de undă corespunzătoare rulării nominale. Pentru aplicația curentă, funcțiile de transfer ale filtrului, corespunzătoare tuturor rulărilor analizei .MC, sunt ilustrate în figura de mai jos.



În aplicația curentă se constată că variația rezistențelor rezistoarelor R1 și R2 determină variația benzii filtrului. Utilizând comanda .PROBE, pentru a calcula banda filtrului corespunzătoare fiecărei rulări a analizei .MC, se va selecta și evalua funcția țintă *Bandwidth* astfel: *Trace/Goal Functions/Bandwidth/Eval*. Această funcție are primul argument VDB(3), al doilea 3 și va marca pe fiecare caracteristică două puncte în care VDB(3) este mai mică cu 3 dB față de valoarea maximă. Ieșirea funcției este diferența frecvențelor corespunzătoare celor două puncte și reprezintă banda filtrului. Definiția funcției țintă *Bandwidth* este următoarea:

```
Bandwidth(1,db_level) = x2-x1
{
1|Search forward level(max-db_level,p)!1
Search forward level(max-db_level,n)!2;
}
```

Utilizând comanda .PROBE se pot reprezenta grafic sub formă de histogramă funcțiile țintă ce caracterizează formele de undă generate de analiza .MC. Pentru aplicația curentă ne interesează distribuția statistică a benzii filtrului. Această histogramă se generează astfel: *Plot/Axis Settings/X Axis/Performance Analysis*, după care se selectează *Trace/Add Trace/Goal Functions/Bandwidth(1,db_level)* cu argumentele VDB(3), respectiv 3.



.WCASE (Analiza sensibilităților/a cazului cel mai defavorabil)

Comanda .WCASE determină efectuarea calculului sensibilităților și generarea cazului cel mai defavorabil al unei variabile de ieșire a unui circuit. Spre deosebire de analiza .MC, în fiecare rulare a analizei .WCASE este variat numai un singur parametru, pentru a se calcula sensibilitățile variabilei de ieșire față de fiecare parametru de model. După determinarea tuturor sensibilităților se mai efectuează încă o rulare în care toți parametrii sunt variați astfel încât să fie generată forma de undă din situația cea mai defavorabilă. Rulările corespunzătoare determinării sensibilităților și situației cea mai defavorabilă implică variații ale parametrilor de model cărora le sunt specificate toleranțe DEV și/sau LOT.

Forma generală a comenzii este următoarea:

.WCASE <analiză> <var ieșire> <funcție> [opțiune]*

<analiză> poate fi una din următoarele: .DC, .AC sau .TRAN. Această analiză este efectuată în mod repetat în rulările analizei .WCASE, iar celelalte analize din fișierul circuitului sunt efectuate numai în rularea nominală.

<var ieșire> are un format identic cu cel al variabilei de ieșire din comanda .PRINT.

<funcție> specifică operația aplicată valorilor variabilei de ieșire, pentru a selecta una din ele. Această valoare constituie baza comparației între rularea nominală și cele următoare. <funcție> poate fi una din următoarele:

- YMAX - găsește valoarea absolută a diferenței maxime a fiecărei forme de undă față de rularea nominală;
- MAX - găsește valoarea maximă a fiecărei forme de undă;
- MIN - găsește valoarea minimă a fiecărei forme de undă;
- RISE_EDGE(<valoare>) - găsește primul eveniment când forma de undă trece peste <valoare> pragului. Forma de undă trebuie să conțină unul sau mai multe puncte situate la/sub <valoare>, urmate de cel puțin unul peste <valoare>;
- FALL_EDGE(<valoare>) - găsește primul eveniment când forma de undă trece sub <valoare> pragului. Forma de undă trebuie să conțină unul sau mai multe puncte situate la/peste <valoare>, urmate de cel puțin unul sub <valoare>;

[opțiune]* poate fi una sau mai multe din următoarele:

- LIST - determină tipărirea valorilor actualizate ale parametrilor de model, pentru fiecare rulare a analizei .WCASE;
- OUTPUT ALL - determină tipărirea ieșirilor rulărilor corespunzătoare calculului sensibilităților, după cea corespunzătoare rulării nominale. Ieșirea fiecărei rulări poate fi generată prin intermediul comenzilor .PRINT, .PLOT, .PROBE. Dacă această opțiune este omisă, vor genera ieșiri numai rulările nominale și cea corespunzătoare situației cea mai defavorabilă. Această opțiune asigură salvarea informației de sensibilitate pentru comanda .PROBE;
- RANGE(<val min>,<val max>) - restricționează domeniul de variație în care este evaluată <funcția>. În locul <val min> sau <val max> se poate utiliza caracterul asterisc (*), semnificând toate valorile posibile.

Exemple:

YMAX RANGE(*,2) - YMAX este evaluat pentru toate valorile variabilei analizei (timp, frecvență etc) mai mici sau egale decât 2;

MAX RANGE(1,*) - găsește maximum variabilei de ieșire pentru valorile variabilei analizei mai mari sau egale decât 1.

Dacă opțiunea RANGE este omisă, <funcția> este evaluată pe întregul domeniu de variație al variabilei analizei, fiind echivalentă cu RANGE(*,*);

- HI sau LOW - specifică direcția în care se deplasează <funcția> în rulare corespunzătoare cazului cel mai defavorabil, relativ la rulare nominală. Dacă <funcția> este YMAX sau MAX, direcția implicită este HI, altfel direcția implicită este LOW;

- VARY DEV|VARY LOT|VARY BOTH - orice dispozitiv care are un parametru de model căruia i se specifică oricare din toleranțele DEV sau LOT este inclus în analiza .WCASE. Analiza poate fi limitată numai la acele dispozitive care au toleranțe DEV, sau toleranțe LOT. Valoarea implicită este VARY BOTH;

- DEVICES(listă tipuri dispozitive) - în analiza .WCASE sunt incluse toate dispozitivele, însă acestea pot fi limitate prin listarea după cuvântul cheie DEVICES a unor tipuri de dispozitive. În această listă nu trebuie utilizate caracterele *spațiu* sau *tab*. De exemplu, dacă analiza .WCASE se dorește a fi efectuată numai pentru rezistoarele și tranzistoarele TEC-MOS din circuit, se va introduce: DEVICES RM.

Exemple:

- 1) .WCASE TRAN V(8) YMAX
- 2) .WCASE DC ID(M5) YMAX VARY DEV
- 3) .WCASE AC VP(9,7) YMAX DEVICES CL OUTPUT ALL

În exemplul 1) analiza .WCASE este efectuată pentru o analiză .TRAN. PSPICE găsește diferența maximă absolută dintre fiecare formă de undă corespunzătoare tensiunii V(8) și forma de undă nominală. Lipsind opțiunile, se vor genera ieșiri numai pentru rulare nominală și cea corespunzătoare cazului cel mai defavorabil.

În exemplul 2) analiza .WCASE este efectuată pentru o analiză .DC. PSPICE găsește diferența maximă absolută dintre fiecare formă de undă corespunzătoare curentului ID(M5) și forma de undă nominală. În analiză sunt incluse numai dispozitivele care au toleranțe DEV.

În exemplul 3) analiza .WCASE este efectuată pentru o analiză .AC. PSPICE găsește diferența maximă absolută dintre fiecare formă de undă corespunzătoare fazei VP(9,7) și

forma de undă nominală. În analiză sunt incluse numai condensatoarele și bobinele. Se generează ieșiri pentru toate rulările analizei.

Aplicație rezolvată: Analiza .WCASE a unui circuit

Se consideră același filtru trece-bandă RC ca cel din aplicația rezolvată la analiza .MC, căruia i se efectuează analiza cazului cel mai defavorabil. Se consideră că rezistoarele R1 și R2 utilizează același model în care parametrul de model R are toleranța DEV=20%. În fișierul circuitului va fi dezactivată analiza .MC și se va insera comanda .WCASE astfel:

```
.WCASE AC V(3) YMAX LIST OUTPUT ALL
```

Analiza .WCASE constă în patru rulări ale analizei AC. În prima rulare valoarea parametrul R este cea nominală. Urmează apoi două rulări corespunzătoare calculului sensibilităților tensiunii V(3) față de parametrul R al rezistoarelor R1 și R2, în care variația acestuia nu este aleatoare, ca în analiza .MC, ci este determinată de parametrul RELTOL conform relației:

$$valoare_actuală = valoare_nominală \cdot (1 + RELTOL).$$

Parametrul RELTOL are valoarea implicită 0.001 și poate fi inițializat în cadrul comenzii .OPTIONS. La ultima rulare, cea corespunzătoare cazului cel mai defavorabil, toți parametrii de model vor avea valorile variate la limita maximă a toleranței. Sensul de variație al valorii fiecărui parametru relativ la valoarea nominală este stabilit pe baza sensibilităților determinate în rulările anterioare și pe baza opțiunilor comenzii .WCASE. Astfel, în ultima rulare, toți parametrii de model ai fiecăruie rezistor vor avea valoarea furnizată de relația:

$$valoare_actuală = valoare_nominală \cdot (1 \pm toleranță).$$

Deoarece parametrului RELTOL nu i s-a atribuit o valoare prin intermediul comenzii .OPTIONS, acesta utilizează valoarea implicită 0.001. Ca urmare, valoarea parametrului R în cazul rulărilor corespunzătoare determinării sensibilităților este $1 \cdot (1 + 0.001) = 1.001$. În fișierul de ieșire va fi prezentat un sumar al acestor două rulări astfel:

```
****  SORTED DEVIATIONS OF V(3)      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
          SENSITIVITY SUMMARY
*****
Mean Deviation = -29.8020E-09
Sigma = 349.5500E-06

RUN          MAX DEVIATION FROM NOMINAL

R2 RMOD R    349.5800E-06 (1.00 sigma) lower at F = 25.1190E+03
              (.6727% change per 1% change in Model Parameter)
R1 RMOD R    349.5200E-06 (1.00 sigma) higher at F = 100
              (.6764% change per 1% change in Model Parameter)
```

Din datele prezentate rezultă că variația parametrului R al rezistorului R2 a produs o deviație maximă a tensiunii V(3) într-un punct în care aceasta este mai mică decât valoarea nominală. În schimb variația parametrului R al rezistorului R1 a produs o deviație maximă a tensiunii V(3) într-un punct în care aceasta este mai mare decât valoarea nominală.

Ultima rulare din cadrul analizei este efectuată considerând parametrul R al ambelor rezistoare R1 și R2 deviat la maxim, în limitele toleranței specificate (DEV=20%). În această rulare, corespunzătoare cazului cel mai defavorabil, sensul de variație a tensiunii V(3) este considerat *HI*, iar sensul în care este variat parametrul R al rezistoarelor R1 și R2 este determinat de rezultatul rulărilor pentru calculul sensibilităților. Astfel, parametrul R al

rezistorului R2 are valoarea $1 \cdot (1 - 0.2) = 0.8$, iar parametrul R al rezistorului R1 are valoarea $1 \cdot (1 + 0.2) = 1.2$. Informațiile corespunzătoare ultimei rulări ale analizei .WCASE sunt tipărite în fișierul de ieșire astfel:

```

****   UPDATED MODEL PARAMETERS      TEMPERATURE =   27.000 DEG C
              WORST CASE ALL DEVICES
*****
Device      MODEL PARAMETER  NEW VALUE
R1          RMOD   R         1.2          (Increased)
R2          RMOD   R         .8           (Decreased)

****   SORTED DEVIATIONS OF V(3)      TEMPERATURE =   27.000 DEG C
              WORST CASE SUMMARY
*****
Mean Deviation = .0778
Sigma = 0

RUN                      MAX DEVIATION FROM NOMINAL
WORST CASE ALL DEVICES  .0778 higher at F =  28.1840E+03
                        (116.23% of Nominal)

```

Reprezentarea grafică a formelor de undă a tensiunii V(3) corespunzătoare rulărilor analizei .WCASE este cea de mai jos. Caracteristicile corespunzătoare rulărilor pentru calculul sensibilităților nu se disting de cea nominală datorită deviațiilor foarte mici ale parametrului de model R față de valoarea sa nominală.

Exercițiu: Să se efectueze încă o analiză .WCASE filtrului trece-bandă RC astfel încât forma de undă a tensiunii V(3), corespunzătoare cazului cel mai defavorabil, să fie deviată spre valori mai mici decât în cazul rulării nominale.

