

## 1. EXTRACTIA DE PARAMETRI

Prin extractie de parametri se înțelege determinarea parametrilor de model ce caracterizează un dispozitiv electronic, utilizând datele experimentale. De exemplu, fie următorul model de dioda semiconductoră (semnal mare, joasă frecvență):

$$I_D = I_0 \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{q \cdot (V_D - R_s \cdot I_D)}{n \cdot K \cdot T} \right] - 1 \right\}$$

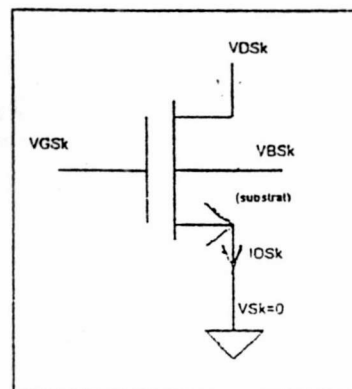
Parametrii de model ce caracterizează dispozitivul sînt  $n$ ,  $R_s$  și  $I_0$ . Determinarea lor se poate face cu ajutorul graficelor măsurătorilor (eventual extrapolate) obținute din diverse regiuni de funcționare a dispozitivului - nivel de injecție mic, mediu sau mare (v. Indrumarul de laborator, lucrarea nr.1 - "Diodă semiconductoră"). Acest tip de extractie se poate numi **SECVENȚIAL**, deoarece fiecare parametru este determinat separat, fără a lua în considerare eventuale interdependențe.

Extractia de parametri este utilă fie ca o verificare în procesul de fabricație al dispozitivelor electronice, fie în simularea de circuite (de exemplu cu programul SPICE) - pentru descrierea unui dispozitiv.

## 2. EXTRACTIA OPTIMALA DE PARAMETRI

Spre deosebire de extractia de parametri secvențială, utilizată în lucrările de laborator anterioare, extractia optimală înseamnă calculul **SIMULTAN** al parametrilor de model. Se folosește, în general, o metodă iterativă de optimizare, iar parametrii sînt deduși prin "potrivirea" curbelor teoretice pe punctele experimentale.

Vom ilustra în continuare principiul extractiei optimale luînd ca exemplu un tranzistor MOS:



Fie setul de  $n$  puncte experimentale obținute prin măsurarea curentului  $IDS_k$  la diverse tensiuni  $VGS_k$ ,  $VDS_k$ ,  $VBS_k$ :

$$IDS_k, VGS_k, VBS_k, VDS_k, (k=1..n)$$

Se construiește o funcție de eroare,  $F$ :

$$F = \sum_{k=1}^n (f_k)^2$$

Pentru exemplul ales forma functiilor  $f_k$  este:

$$f_k = \frac{[IDS_k - IDS(VGS_k, VDS_k, VBS_k, \langle p \rangle)]}{IDS_k}, \quad k = 1..n$$

Notatiile folosite au urmatoarea semnificatie:  $IDS_k$  reprezinta curentul de drena masurat in conditiile aplicarii pe terminale a tensiunilor  $VGS_k$ ,  $VDS_k$ ,  $VBS_k$ , iar  $IDS(VGS_k, VDS_k, VBS_k, \langle p \rangle)$  reprezinta curentul de drena calculat la aceleasi tensiuni, pe baza unui model de dispozitiv ce contine setul de parametri de model  $\langle p \rangle = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ . Functia  $f_k$  este denumita reziduul corespunzator punctului experimental  $k$ .

Prin intermediul unei metode iterative se cauta valorile parametrilor  $p_1, \dots, p_m$  pentru care valoarea functiei  $F$  este minima:

$$\min(F)$$

$\langle p \rangle$

Altfel spus, se cauta acele valori ale parametrilor  $p_1, \dots, p_m$  pentru care graficele caracteristicilor teoretice se "potrivesc" cel mai bine cu punctele experimentale. Criteriul de "apropiere" este, deci, minimizarea sumei patratelor diferentelor curbe teoretice - puncte experimentale.

Problema este cunoscuta sub numele de "Problema celor mai mici patrate neliniare" - modelul fiind, in general, o functie neliniara in raport cu parametrii  $p_1, \dots, p_m$  - si este o forma particulara de problema de optimizare. Rezolvarea acestui tip de probleme este posibila numai cu ajutorul unui calculator electronic, printr-o metoda iterativa.

Algoritmul porneste de la un set de valori initiale ale parametrilor  $p_1, \dots, p_m$ . Pentru fiecare din parametri se pot impune o limita inferioara si o limita superioara. Necesitatea impunerii de limite parametrilor apare fie din cauza ca functia  $F$  poate prezenta o valoare minima corespunzatoare unui set de valori inacceptabile ale parametrilor (de exemplu - rezistente negative), fie din cauza faptului ca unii din parametri pot lua valori necontrolate in cursul iteratiilor, intirziind sau impiedicind convergenta procesului iterativ.

Trebuie observat faptul ca nu intotdeauna pot fi extrasi toti parametrii de model simultan, uneori fiind nevoie ca extractia sa se desfasoare pe grupuri de parametri.

### 3. DESCRIEREA PROGRAMULUI SI MODUL DE UTILIZARE

Programul pentru extractia optima a parametrilor folosit in lucrare se apeleaza cu comanda: EXTRDCE.

Programul dispune de urmatoarele functii principale:

- alegerea tipului de dispozitiv pentru care se face extractia de parametri;
- introducerea date masurate, citirea fisierelor de date;
- editarea valorilor initiale ale parametrilor si a limitelor de variatie ale acestora;
- reglarea criteriilor de convergenta ale algoritmului;
- executia extractiei optime;

- reprezentari grafice pentru editarea punctelor experimentale si pentru verificarea rezultatului extractiei la scara liniara si, numai acolo unde este cazul, la scara logaritmica;
- posibilitatea vizualizarii textului lucrarii de laborator si a folosirii unui calculator pentru prelucrari ale datelor.

Comenzile cele mai importante ale programului sint prezentate in cele ce urmeaza, tinind cont de succesiunea lor logica. Toate comenzile pot fi apelate din meniul principal, cu ajutorul sagetilor. Unele din ele se pot apela si mai simplu, prin apasarea unei taste functionale (tastele F1, ..., F12). Pentru fiecare comanda am specificat succesiunea optiunilor ce trebuie alese din meniu, precum si, acolo unde este cazul, tastele functionale de apel. In meniu se ajunge tastind F10.

- a) Citirea continutului lucrarii de laborator:

DOCUMENTATION

~~XXXXXXXXXX~~ L I I I  
I I

- b) Selectia unui dispozitiv:

EXTRACTION  
DEVICE SELECT

(sau F9)

In acest fel se poate alege unul din dispozitivele pentru care programul poseda modele: dioda, tranzistor MOS, tranzistor bipolar.

- c) Citirea unui fisier care contine punctele experimentale (datele masurate):

FILE  
OPEN DATA FILE

(sau F3)

- d) Introducerea unui nou set de masuratori:

FILE  
NEW DATA

- e) Vizualizarea/editarea valorilor dateilor masurate:

EDIT  
DATA

(sau F4)

- f) Alegerea axelor pentru reprezentare grafica si a tipului de reprezentare (liniara sau logaritmica):

GRAPHICS  
SELECT AXIS

g) Scalarea convenabila a reprezentarii grafice:

GRAPHICS  
DATA RANGE

h) Editarea punctelor experimentale prin intermediul reprezentarii grafice:

GRAPHICS  
EDIT POINTS

i) Alegerea parametrilor în vederea extractiei:

EXTRACTION  
PARAMETER SELECT

În acest fel la extractie pot participa numai o parte din parametri, ceilalți rămânând la valorile initiale.

j) Vizualizarea/editarea valorilor și a limitelor parametrilor:

EDIT  
PARAMETERS

k) Editarea unor marimi de initializare și vizualizarea informațiilor privind convergența algoritmului:

EDIT  
INFO

(sau F8)

Prin această opțiune se pot fixa criteriile de convergență, se poate renunța la impunerea de limite parametrilor (subcomanda CONSTRAINTS), pot fi alese anumite marimi de initializare și se obțin informații cu privire la evoluția procesului iterativ. Cele mai importante informații obținute în acest mod sînt:

- valoarea sumei patratelor ("Sum of squares");
- erori de convergență ("Errors");
- criteriul de convergență satisfăcut ("Convergence").

i) Pornirea extractiei:

EXTRACTION  
START EXTRACTION

(sau F7)

m) Trasarea curbelor teoretice și compararea cu punctele experimentale:

GRAPHICS  
DRAW



n) Apelarea calculatorului "de buzunar":

## CALCULATOR

### 4. MODELE DE DISPOZITIVE ELECTRONICE

a) Modele pentru dioda semiconductoră.

1) Modelul "Dioda"

Este un model empiric (v. lucrarea nr. 1 din Indrumarul de laborator - "Dioda semiconductoră"):

$$V_D = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_D + I_0}{I_0}\right) + R_S \cdot I_D$$

Parametrii de model sînt:

$n$  - factorul de idealitate,

$I_0$ [ $\mu$ A] - curentul de saturatie,

$R_S$ [Ohm] - rezistența serie; modelează efectele de la nivel mare de injecție.

2) Modelul "Dioda2"

Este modelul analitic studiat la cursul de D.C.E.:

$$I_D = I_{0dif} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V_D - R_S \cdot I_D)}{K \cdot T}\right) - 1 \right] + I_{0gr} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V_D - R_S \cdot I_D)}{2 \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right]$$

Parametrii de model:

$I_{0dif}$ [ $\mu$ A] - componenta de difuzie a curentului rezidual,

$I_{0gr}$ [ $\mu$ A] - componenta de generare-recombinare a curentului rezidual,

$R_S$ [Ohm] - rezistența serie.

3) Modelul "Cap. bariera"

Modelul dependentei capacității de bariera a jonctiunii de tensiunea inversă aplicată ( $V_R$ ):

$$C_b = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{V_R}{\Phi}\right)^m}$$

Parametrii de model:

$C_0$ [pF] - capacitatea în absența polarizării,

$m$ ,

$\Phi$ [V] - bariera internă de potențial a jonctiunii.

Este modelul de tranzistor MOS - LEVEL 1 folosit in programul SPICE:

Regiunea de blocare:

$$I_{DS} = 0, \quad V_{GS} < V_T$$

Regiunea cvasi-liniara:

$$I_{DS} = K \cdot \left( V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) \cdot V_{DS} \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}), \quad V_{GS} > V_T, V_{DS} < V_{DSsat}$$

Regiunea de saturatie:

$$I_{DS} = \frac{K}{2} \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}), \quad V_{GS} > V_T, V_{DS} > V_{DSsat}$$

Unde:

$$V_T = V_{T0} + \phi_S + \gamma \cdot \left( \sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S} \right) - \text{tensiunea de prag}$$

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T - \text{tensiunea de saturatie,}$$

$$K = \frac{\mu \cdot C_{ox} \cdot W}{L}, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2 \cdot \epsilon_S \cdot q \cdot NB}}{C_{ox}} - \text{factorul de substrat,} \quad (2)$$

$\mu$  = mobilitatea purtatorilor,

$C_{ox}$  = capacitatea specifica a stratului de oxid,

$W$  = latimea canalului,

$L$  = lungimea canalului,

$\epsilon_S$  = permitivitatea semiconductorului,

$q$  = sarcina electronului,

$NB$  = concentratia de impuritati a substratului,

$\Phi/2$  = potentialul Fermi al substratului.

Parametrii de model:

$K$  [mA/V<sup>2</sup>],

$V_{T0}$  [V],

$\Phi$  [V],

$\gamma$  [V<sup>1/2</sup>],

$\lambda$  [1/V] - modeleaza dependenta curentului  $I_{DS}$  de tensiunea  $V_{DS}$ , la saturatie.

c) Model pentru tranzistor bipolar (NPN): "NPN".

(V. lucrarea nr.2 din Indrumarul de laborator - "Modelarea tranzistoarelor bipolare în regim static"):

$$I_C = \frac{IS_0}{1 + \theta \cdot \exp\left(\frac{q \cdot V_{BE}}{2 \cdot K \cdot T}\right)} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{BE}}{K \cdot T}\right) - \exp\left(\frac{q \cdot V_{BC}}{K \cdot T}\right) \right] \cdot \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_A}\right)$$

$$I_B = \frac{IS_0}{\beta_F} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{BE}}{K \cdot T}\right) - \exp\left(\frac{q \cdot V_{BC}}{K \cdot T}\right) \right] + C_2 \cdot IS_0 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot V_{BE}}{n_{EL} \cdot K \cdot T}\right)$$

• Parametrii de model:

• ISo[ $\mu$ A],

$\beta_F$  - valoarea maxima (de palier),

C2, nEL - acești doi parametri modelează efectele la nivel mic de injecție,

$\theta$  - modelează efectele la nivel mare de injecție,

VA[V] - tensiunea Early; modelează dependența curentului Ic de tensiunea Vbc, în RAN.

Aceste ecuații modelează numai funcționarea tranzistorului în regiunea activă normală.

## 5. DESFĂȘURAREA LUCRĂRII

Extracția parametrilor diodelor semiconductoare.

5.1. Selectați modelul "Dioda". Citiți fișierul de date D4.DAT. Acest fișier conține măsurători efectuate de studenți în cadrul lucrării de dioda semiconductoare.

Vizualizați valorile măsurătorilor, apoi editați punctele experimentale prin reprezentare grafică. Vizualizați graficul curbilor teoretice (care sînt trasate pe baza valorilor inițiale ale parametrilor). Porniți extracția, după care vizualizați din nou graficul curbilor teoretice. Vizualizați și notați valorile parametrilor de model și a sumei patratelor (SMP) în linia corespunzătoare diodei D4 din tabelul 1.

Tabelul 1.

Dioda	I <sub>0</sub> [ $\mu$ A]	n	Rs [ $\Omega$ ]	SMP
D4	2,8036			
BA159_X				
BS550-2				
DSIM				

5.2. Selectați modelul "Dioda2". Citiți același fișier de date (D4.DAT), apoi procedați ca la punctul anterior<sup>1</sup>. Înainte de vizualizarea curbilor teoretice alegeți reprezentarea grafică logaritmică. Comparați valoarea parametrului Rs cu cea determinată la punctul anterior.

Folosind acest model se pot estima valorile componentelor de difuzie și de generare-recombinare ale curentului rezidual, I<sub>odif</sub> și I<sub>ogr</sub>. Comparați suma I<sub>odif</sub>+I<sub>ogr</sub> cu parametrul I<sub>0</sub> determinat la punctul anterior.

<sup>1</sup>Se vor selecta pentru extracție numai parametrii I<sub>odif</sub>, I<sub>ogr</sub> și Rs

5.3. Selectati modelul "Dioda". Cititi fisierul BA159\_X.DAT. Acest fisier contine date din masuratori efectuate pe o dioda tip BA159. Procedati ca la punctul 5.1 si completati linia corespunzatoare diodei BA159 din tabelul 1.

5.4. Selectati modelul "Dioda". Cititi fisierul BS550-2.DAT. Fisierul contine date din masuratori efectuate pe o dioda Schottky. Procedati ca la punctele anterioare. Daca algoritmul nu converge, reluati extractia. Completati linia corespunzatoare diodei BS550-2 din tabelul 1. Comparati valorile parametrilor  $I_0$ ,  $n$  si  $R_s$  cu cele obtinute pentru diode pn.

5.5. Selectati modelul "Dioda". Cititi fisierul DSIM.DAT. Fisierul contine date obtinute cu ajutorul programului folosit in lucrarea de laborator de simulare a regimului static al jonctiunii pn. Procedati ca la punctele anterioare si completati ultima linie a tabelului 1. Comparati valorile parametrilor cu cele obtinute pentru diode reale.

5.6. Selectati modelul "Cap. bariera". Cititi fisierul BB125C.DAT. Datele din acest fisier reprezinta dependenta capacitatii diodei varicap BB125 de tensiunea inversa aplicata. Dupa extractia parametrilor verificati potrivirea curbelor teoretice cu punctele experimentale. Notati valorile parametrilor  $C_0$ ,  $m$ ,  $\Phi$ .

Extractia parametrilor tranzistoarelor MOS.

5.7 Selectati modelul "NMOS". Cititi fisierul NMOSLIN.DAT. Acest fisier contine masuratori efectuate in regiunea cvasi-liniara de functionare (tensiuni VDS mici). Selectati tensiunea VGS pe axa X de reprezentare grafica. Porniti extractia parametrilor. In cazul in care algoritmul nu converge editati informatia privitoare la procesul de extractie si modificati valoarea parametrului Marquardt la 1, dupa care porniti din nou extractia. Vizualizati caracteristicile teoretice  $I_{DS}(V_{GS})$ , apoi  $I_{DS}(V_{DS})$ . Notati valorile parametrilor de model in prima linie din tabelul 2.

Tabelul 2 - NMOSLIN

$V_{To}[V]$	$K[mA/V^2]$	$\Phi[V]$	$\gamma[V^{1/2}]$	$\lambda[1/V]$	COMP

5.8. Selectati acelasi model si acelasi fisier de date. Modificati valoarea initiala a parametrului  $\lambda$  la 0. Eliminati parametrul  $\lambda$  din setul de parametri. Extrageți din nou valorile celorlalti parametri si completati a II-a linie a tabelului 2. Comparati valorile parametrilor si a sumei patratelor cu cele obtinute la punctul anterior.

5.9. Selectati modelul "NMOS" si fisierul de date NMOSSAT.DAT care contine masuratori efectuate pe o plaja larga de tensiuni VDS, inclusiv in regiunea de saturatie a dispozitivului.

Dupa extractia parametrilor vizualizati caracteristicile  $I_{DS}(V_{DS})$ , alegind o limita superioara a reprezentarii pe axa Y (curentul  $I_{DS}$ ) de 0.05 mA. Completati prima linie a tabelului 3 cu valorile parametrilor si a sumei patratelor.

Notati valorile parametrilor tranzistorului. Comparati valoarea parametrului  $\lambda$  cu cele de la punctele anterioare. Calculati valorile capacitatii  $C_{ox}[pF/cm^2]$ , si concentratiei de impuritati a substratului  $NB[1/cm^2]$  cu formulele (1) si (2).

Se cunosc:  $\epsilon_s = 1e-12$  F/cm,  $q = 1.6e-19$  C,  $W/L = 3/4$ ,  $\mu = 600$  cm<sup>2</sup>/V·s.

Tabelul 3. - NMOSAT

$V_{T0}$ [V]	$K$ [mA/V <sup>2</sup> ]	$\phi$ [V]	$\lambda$ [V <sup>-1</sup> ]	$L_{Ab}$ [1/V]	SMP

5.10. Selectati modelul "NMOS" si fisierul NMOSLIN.DAT. Editati informatia asupra initializarii procesului iterativ si eliminati limitele impuse parametrilor ("Constraints"). Porniti extractia parametrilor. Completati a II-a linie a tabelului 3. Ce efect are absenta limitelor admisibile de variatie a parametrilor asupra algoritmului si valorilor parametrilor?

Extractia parametrilor tranzistoarelor bipolare.

5.11. Selectati modelul "NPN" si cititi fisierul de date NPND.DAT. Alegeți reprezentarea grafica  $I_c(V_{ce})$ . Porniti extractia parametrilor. Vizualizati si notati valorile parametrilor de mode In tabelul 4. Vizualizati caracteristicile teoretice  $I_c(V_{ce})$  -scara liniara-, apoi  $I_c(V_{be})$  si la scara logaritmica si la scara liniara. Pentru vizualizarea detaliilor caracteristicii  $I_c(V_{ce})$  alegeți o valoare maxima a axei Y (curentul  $I_c$ ) de 0.2 mA.

Tabelul 4.

$I_{So}$ [mA]	$\beta_F$	C2	nEL	$\phi$	$V_A$ [V]	SMP

## 6. INTREBARI

a) Care este avantajul folosirii extractiei optimale a parametrilor In cazul modelelor diodei semiconductoare fata de metoda secventiala utilizata In lucrarea de dioda?

b) Cum explicati diferentele intre valorile parametrilor  $i$  si  $m$  extrasi la punctul 5.6 si valorile "tipice" 0.7-0.9V pentru  $i$  si 0.3-0.5 pentru  $m$ ?

c) De ce nu se poate conta pe valoarea parametrului  $L_{mb}$  obtinuta la punctul 5.7 al lucrarii?

d) Sint corecte din punct de vedere fizic valorile parametrilor tranzistorului MOS "obtinute" punctul 5.10?

e) Ce legatura este Intre parametri  $L_{mb}$  (modelul "NMOS") si  $V_A$  (modelul "NPN")?

f) De ce nu poate fi extras parametrul  $\beta$  din setul de date al tranzistorului bipolar?