

Tranzistorul MOS

1. Prezentare general

Tranzistorul MOS (**Metal Oxide Semiconductor**) este un dispozitiv semiconductor, realizat din siliciu, care are **trei terminale**, denumite **DREN** , **GRIL** , respectiv **SURS** .

În func ie de particularit ile sale constructive, tranzistoarele MOS se împart în dou mari categorii:

- tranzistoare MOS cu canal indus
- tranzistoare MOS cu canal ini ial

Canalele amintite mai sus reprezint elementul din structura intern a tranzistorului MOS care asigur transferul de sarcin electric între dren i surs . Prin transferul de sarcin electric între cele dou terminale se asigur apari ia fenomenelor de conduc ie electric în tranzistor i astfel, apari ia curentului electric prin acesta.

În plus, în func ie de tipul materialului semiconductor din care este construit canalul, tranzistoarele MOS se împart în 2 tipuri i anume:

- tranzistoare MOS cu canal de tip N (canalul tranzistorului este realizat dintr-un material semiconductor de tip N)
- tranzistoare MOS cu canal de tip P (canalul tranzistorului este realizat dintr-un material semiconductor de tip P)

În circuitele electronice, tranzistoarele MOS sunt simbolizate ca în Figura 1.

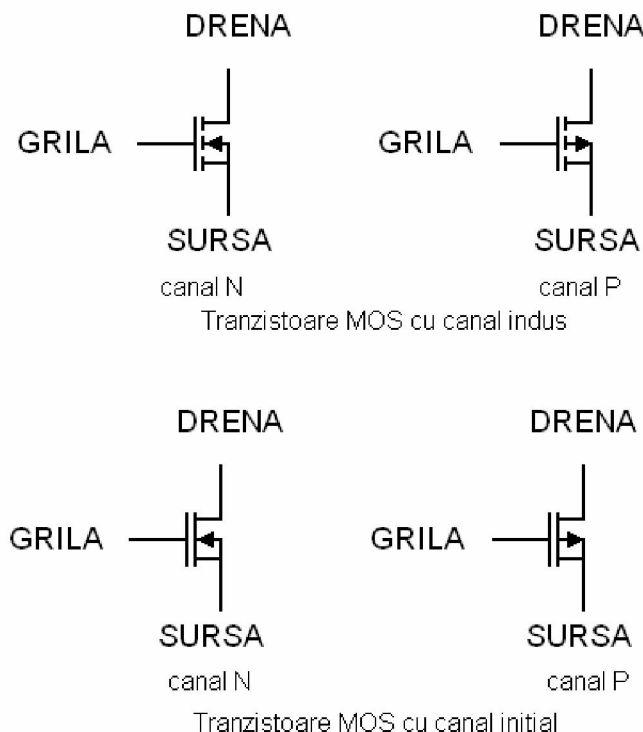


Figura 1. Simbolul electronic al tranzistoarelor MOS.

La nivelul tranzistorului MOS apar 4 m rimi electrice:

- 1 curent electric i anume curentul care este generat între DREN i SURS :
 - i_D – curentul de dren
- 3 tensiuni electrice i anume tensiunile între terminalele tranzistoarelor:
 - v_{GS} – tensiunea gril -surs
 - v_{DS} – tensiunea dren -surs
 - v_{GD} – tensiunea gril -dren

Sensul curentului de dren depinde de valorile poten ialelor electrice aplicate pe dren , respectiv surs i de tipul canalului din structura tranzistorului. Astfel, pentru tranzistoarele cu canal N, dac poten ialul electric al drenei este superior poten ialului electric al sursei, atunci sensul curentului electric prin tranzistor este de la dren spre surs . În caz contrar, sensul curentului prin tranzistor este de la surs spre dren . La tranzistoarele cu canal P sensul curentului se inverseaz în raport cu cazul tranzistoarelor de tip N.

Referin ele tensiunilor depind de tipul canalului utilizat în structura tranzistorului MOS. În Figura 2 sunt prezentate sensul curentului (pentru cazul în care poten ialul electric al drenei este mai mare decât cel al sursei), respectiv referin ele tensiunilor de terminal. În această figur s-a reprezentat i curentul din grila tranzistorului notat i_G , de i valoarea acestui curent este întotdeauna nul , datorit unui strat izolator din structura tranzistorului MOS.

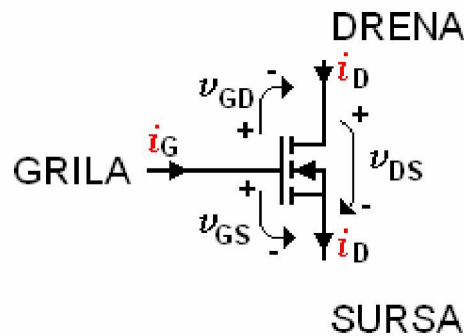


Figura 2. M rimile electrice ale tranzistoarelor MOS; curentul $i_G=0$ întotdeauna.

2. Func ionarea tranzistorului MOS

Principiile de func ionare ale celor două categorii de tranzistoare MOS cu canal indus, respectiv cele cu canal ini ial sunt similare, i din acest motiv, în continuare, se vor prezenta numai tranzistoarele MOS cu canal indus, fiind scoase în eviden numai diferen ele între cele 2 categorii de tranzistoare.

Rela iile dintre m rimile electrice ale tranzistorului MOS depind de regimul de func ionare al acestuia. Tranzistorul MOS poate func iona în 3 regiuni de func ionare distincte, determinate de rela iile care se stabilesc între tensiunile tranzistorului. Astfel, regiunile de func ionare ale tranzistorului MOS sunt:

- **REGIUNEA DE BLOCARE:**

- o condi ia de func ionare: $v_{GS} < V_{TH}$ (canal N)
unde V_{TH} reprezint un parametru al tranzistorului MOS, numit **tensiune de prag**; valoarea tensiunii de prag V_{TH} tensiuni este:
 - § pozitiv , pentru tranzistorul MOS cu canal indus de tip N,
 - § negativ pentru tranzistorul MOS cu canal indus de tip P;
 - § negativ pentru tranzistorul MOS cu canal ini ial de tip N,
 - § pozitiv pentru un tranzistor MOS cu canal ini ial de tip P;
- o în această regiune, func ionarea tranzistorului MOS este descris de ecua ia de func ionare:

$$i_D = 0$$

curentul tranzistorului în regiunea de blocare

- o în această regiune, comportamentul tranzistorului MOS poate fi exploatat pentru prelucrarea sau generarea semnalelor digitale.

- **REGIUNEA LINIAR :**

- o condi ia de func ionare: $v_{GS} > V_{TH}$ i $v_{DS} < v_{GS} - V_{TH}$
- o în aceast regiune, func ionarea tranzistorului MOS este descris de ecua ia de func ionare:

$$i_D = 2 \cdot k \cdot \left(v_{GS} - V_{TH} - \frac{v_{DS}}{2} \right) \cdot v_{DS}$$

unde **k** este un parametru al tranzistorului, a c rei valoare se exprim în $\frac{mA}{V^2}$ (miliamperi împ r it la vol i la p trat).

- o în aceast regiune, tranzistorul MOS se comport ca o rezisten a c rei valoare poate fi controlat de tensiunea gril -surs .

- **REGIUNEA DE SATURA IE:**

- o condi ia de func ionare: $v_{GS} > V_{TH}$ i $v_{DS} > v_{GS} - V_{TH}$
- o în aceast regiune, func ionarea tranzistorului MOS este descris de ecua ia de func ionare:

$$i_D = k \cdot (v_{GS} - V_{TH})^2$$

curentul tranzistorului în regiunea de satua ie

- o în aceast regiune de func ionare tranzistorul MOS poate fi utilizat pentru prelucrarea analogic a semnalelor, fiind singura regiune de func ionare în care tranzistorul MOS poate **AMPLIFICA LINIAR** semnalele (informa ia);

3. Modelarea func ion rii tranzistorului MOS În regim variabil de semnal mic

Din ecua iile de func ionare ale tranzistorului MOS, specifice regiunilor de func ionare, se constat c tranzistorul MOS este un **ELEMENT DE CIRCUIT NELINIAR**. Analiza circuitelor care con in elemente de circuit neliniare este dificil . Din acest motiv, întotdeauna este util ca, pentru aceste elemente de circuit neliniare, s se dezvolte **MODELE LINIARE**, valabile în anumite condi ii de func ionare. La fel se pune problema i în cazul tranzistoarelor MOS.

Modelarea func ion rii tranzistorului MOS în variabil de semnal mic.

Deoarece tranzistorul MOS poate amplifica liniar numai în regiunea de satura ie, este util s se dezvolte un model, care s descrie comportamentul dinamic al tranzistorului (la varia iile m rimilor sale electrice) în aceast regiune de func ionare.

Modelul prezentat în continuare se poate aplica numai în cazul în care tranzistorul MOS func ioneaz în regim variabil de semnal mic.

Un tranzistor MOS func ioneaz în regim variabil de semnal mic dac m rimile sale electrice au valori variabile în timp, iar amplitudinea varia iei tensiunii GRIL -SURS este mai mic decât o valoare de aproximativ 12,5[mV]: $v_{GS} < 12,5[mV]$. În aceste condi ii, comportamentul tranzistorului MOS poate fi considerat ca fiind LINIAR i în consecin poate fi modelat prin intermediul unui circuit LINIAR.

Din ecua ia de func ionare a tranzistorului MOS valabil în regiunea de satura ie se remarc faptul c valoarea curentului de dren i_D variaza în func ie de tensiunea gril -surs v_{GS} . Valoarea varia iei curentului de dren i_D se poate determina determinând derivata curentului i_D în func ie de tensiunea v_{GS} pentru cazul în care valoarea curentului de DREN este men inut la o valoare constant , notat I_D . Valoarea derivatei respective se noteaz cu g_m i se nume te **PANTA** tranzistorului MOS:

$$g_m \stackrel{\text{definitie}}{=} \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{i_D=I_D}$$

inând cont de ecua ia de func ionare a tranzistorului MOS valabil în regiunea de satura ie, rela ia de calcul a pantei tranzistorului este:

$$g_m = 2\sqrt{k \cdot I_D}$$

unde I_D este **curentul CONTINUU** prin DRENA tranzistorului.

Panta tranzistorului MOS descrie complet comportamentul tranzistorului MOS în regim variabil de semnal mic, astfel încât, circuitul echivalent al tranzistorului, care modeleaz comportamentul acestuia în regimul de func ionare amintit, este cel prezentat în Figura 3. În acest circuit, m rimile electrice I_g , I_s i I_d reprezint amplitudinile curen ilor de gril , surs , respectiv dren , iar V_{gs} reprezint amplitudinea tensiunii gril -surs . Circuitul prezentat este valabil numai dac frecven a de lucru a tranzistorului MOS este plasat în domeniul frecven e frecven elor joase i medii, adic este mai mic decât aproximativ **1MHz**.

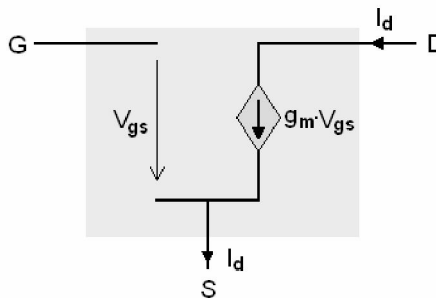


Figura 3. Circuitul echivalent ale modelului tranzistorului MOS în regim variabil de semnal mic, pentru frecven e joase i medii.

Pentru frecven e mai mari decât aproximativ **1MHz** (domeniul frecven elor înalte), func ionarea tranzistorului MOS este afectat de anumite fenomene dinamice, de natur capacitiv , care pot fi modelate prin intermediul unor CAPACIT I PARAZITE, reunite în parametrii nota i c_{gs} , respectiv c_{ds} . Circuitul echivalent valabil în acest caz este prezentat în Figura 4.

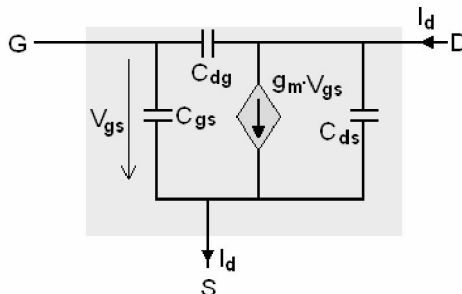


Figura 4. Circuitul echivalent ale modelului tranzistorului MOS în regim variabil de semnal mic, pentru frecven e înalte.

4. Polarizarea tranzistoarelor MOS

Regiunea de func ionare a tranzistorului MOS este impus prin polarizarea acestuia. Circuitul electronic care realizeaz polarizarea tranzistorului MOS se nume te circuit de polarizare.

În cazul sistemelor electronice analogice, circuitul de polarizare trebuie astfel proiectat încât s asigure func ionarea tranzistorului MOS în **Regiunea de Satura ie**.

Prin polarizarea tranzistorului MOS, la nivelul acestuia se stabilesc m rimii electrice **CONTINUE** (curen i electrici de terminal, respectiv tensiuni electrice între terminale).

O pereche de mrimi electrice **CONTINUE**, compus dintr-un curent de terminal i o tensiune între 2 terminale formeaz **PUNCTUL STATIC de FUNC IONARE** al tranzistorului respectiv (pe scurt PSF-ul tranzistorului). PSF-ul tranzistorului furnizeaz informa ii despre regiunea în care acesta func ioneaz . Din acest motiv, în sistemele electronice analogice, circuitul de polarizare al tranzistorului MOS trebuie astfel proiectat încât s asigure plasarea PSFului tranzistorului respectiv în regiunea de satura ie.

Pentru tranzistoarele MOS, perechea de mrimi electrice care define te PSF-ul este:

- curentul continuu din dren : I_D
- tensiunea continuu dren -surs : V_{DS}

Circuite de polarizare pentru tranzistoarele MOS

Circuitele de polarizare ale tranzistoarelor MOS au rolul de a impune func ionarea tranzistoarelor MOS, în regim de curent continuu, în **regiunea de satura ie**. Din acest motiv, circuitul de polarizare trebuie astfel proiectat încât s determine ca tensiunile electrice CONTINUE, stabilite între terminalele tranzistorului MOS, s satisfac urm toarele condi ii:

$$V_{GS} > V_{TH} \quad \text{si} \quad V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

Dac aceste condi ii nu sunt satisf cute, atunci tranzistorul MOS nu func ioneaz în regiunea de satura ie.

În continuare se va discuta cazul **tranzistoarelor MOS cu canal de tip n**.

a. Circuit de polarizare cu divizor rezistiv în gril

Pentru tranzistoarele MOS cu canal indus, circuitul de polarizare elementar este prezentat în Figura 5. Circuitul prezentat se nume te cu divizor rezistiv în gril deoarece grupul de rezistoare R_{G1} R_{G2} compun un divizor rezistiv pentru tensiunea de alimentare V_{DD} , a c rui tensiune de ie ire se consider a fi din grila tranzistorului MOS la masa circuitului.

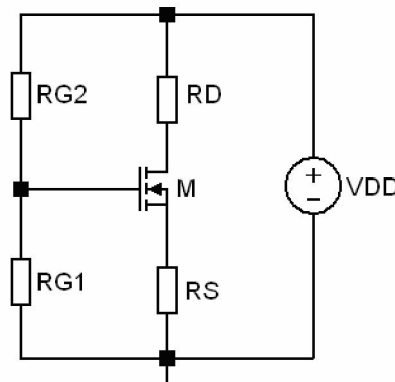
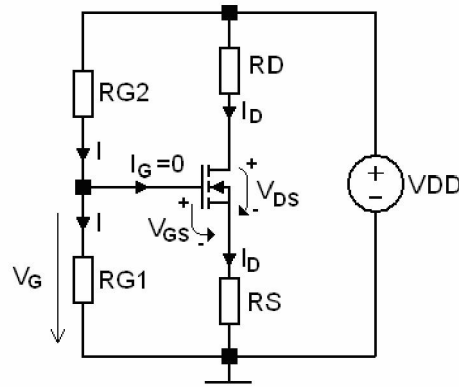


Figura 5. Circuit elementar de polarizare cu divizor rezistiv în gril .

În continuare se prezint modul în care se determin valoarea PSF-ul tranzistorului MOS. Calculele se vor efectua pe circuitul din figura de mai jos:



- Se determina valoarea tensiunii V_G aplicând TK2 pe bucla **RG2, RG1 si VDD** si apoi aplicând legea lui Ohm pe **RG1**:

$$R_{G2} \cdot I + R_{G1} \cdot I - V_{GG} = 0$$

$$V_G = R_{G1} \cdot I$$

Rezult :

$$V_G = \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} \cdot V_{DD}$$

- 2. Determinarea curentului I_D :**

Se presupune c tranzistorul MOS lucreaz în regiunea de saturatie. În acest caz, tranzistorul MOS func ioneaz după ecua ia:

$$I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Aplicînd TK2 pe bucla **RG1, VGS, RS** rezult :

$$V_{GS} + R_S \cdot I_D - V_G = 0$$

unde V_G are expresia din rela ia dedus la punctul 1. Ecuatiile de mai sus formeaz un sistem de ecua ii, în necunoscutele V_{GS} si I_D .

Din cele 2 necunoscute, mai întâi se determin întotdeauna necunoscuta V_{GS} .

Din cele 2 solu ii posibile pentru tensiunea V_{GS} , întotdeauna se alege solu ia care satisface conditia:

$$V_{GS} > V_{TH}$$

unde V_{TH} este tensiunea de prag a tranzistorului; dac nici una din solu iile ob inute pentru V_{GS} nu satisface această condi ie, atunci tranzistorul MOS func ioneaz în regiunea de blocare i în acest caz $I_D = 0$.

Dup determinarea tensiunii V_{GS} , curentul I_D se calculeaz din ecua ia de func ionare a tranzistorului MOS $I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$.

- **Determinarea tensiunii V_{DS} :**

se aplica TK2 pe bucla **RD, VDS, RS, VDD**:

$$R_D \cdot I_D + V_{DS} + R_S \cdot I_D - V_{DD} = 0$$

Rezulta:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot (R_D + R_S)$$

- **Verificare presupunere initiala**

S-a presupus ca tranzistorul MOS func ioneaz în regiunea de satura ie. La final, această presupunere trebuie verificat . Tranzistorul MOS func ioneaz în regiunea de satura ie dac valorile tensiunilor V_{GS} si V_{DS} calculate ca mai sus satisfac conditia:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

b. Circuit cu autopolarizare a grilei

Pentru polarizarea tranzistoarelor MOS cu **canal ini ial**, pe lângă circuitul de polarizare cu divizor rezistiv în gril se mai utilizează încă un circuit de polarizare, denumit **circuit cu autopolarizare a grilei**. Acest circuit de polarizare este mai simplu și poate fi utilizat numai în cazul tranzistoarelor MOS cu canal ini ial, deoarece utilizarea acestuia se bazează pe faptul că tranzistoarele MOS cu canal ini ial au tensiunea de prag V_{TH} de semn contrar tensiunii de prag a tranzistoarelor MOS cu canal indus. De exemplu, pentru tranzistoarele cu canal de tip N, cele care au canal indus au valoarea $V_{TH} > 0[V]$, iar cele care au canal ini ial, au valoarea $V_{TH} < 0[V]$. Structura circuitului cu autopolarizare a grilei este prezentat în Figura 6.

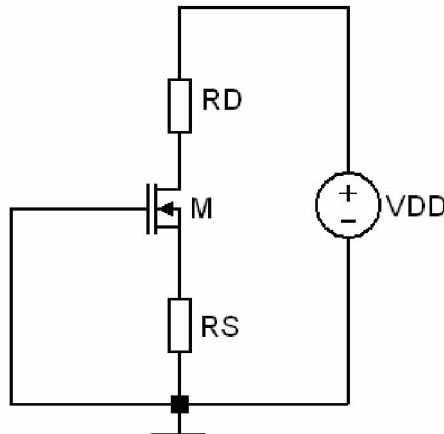
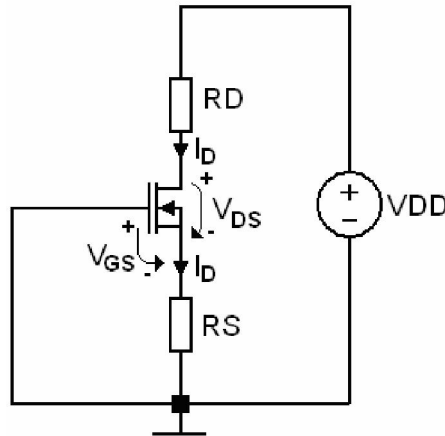


Figura 6. Circuit cu autopolarizare a grilei – valabil numai pentru tranzistoarele MOS cu canal ini ial.

Punctul Static de Func ionare a acestui tranzistor se determină pe circuitul de calcul din figura de mai jos.



- 1. Determinarea curentului I_D :

Se presupune c ă tranzistorul MOS lucreaz ă în regiunea de saturatie. În acest caz, tranzistorul MOS func ioneaz ă după ecua ția:

$$I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Aplicînd TK2 pe bucla **V_{GS}, R_S** rezult ă :

$$V_{GS} + R_S \cdot I_D = 0$$

Ecuatiile de mai sus formeaz ă un sistem de ecua ții, în necunoscutele V_{GS} și I_D .

Din cele 2 necunoscute, mai întăi se determin ă întotdeauna necunoscuta V_{GS} .

Din cele 2 solu ții posibile pentru tensiunea V_{GS} , întotdeauna se alege solu ția care satisface condiția:

$$V_{GS} > V_{TH}$$

unde V_{TH} este tensiunea de prag a tranzistorului; dac ă nici una din solu țiile ob ținute pentru V_{GS} nu satisface această condi ție, atunci tranzistorul MOS func ioneaz ă în regiunea de blocare i în acest caz $I_D = 0$.

Dup ă determinarea tensiunii V_{GS} , curentul I_D se calculeaz ă din ecua ția de func ționare a tranzistorului MOS $I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$.

- Determinarea tensiunii V_{DS} :**

se aplica TK2 pe bucla **R_D, V_{DS}, R_S, V_{DD}**:

$$R_D \cdot I_D + V_{DS} + R_S \cdot I_D - V_{DD} = 0$$

Rezulta:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot (R_D + R_S)$$

- **Verificare presupunere initiala**

S-a presupus ca tranzistorul MOS func ioneaz în regiunea de satura ie. La final, această presupunere trebuie verificat . Tranzistorul MOS func ioneaz în regiunea de satura ie dac valorile tensiunilor V_{GS} si V_{DS} calculate ca mai sus satisfac conditia:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

În cazurile prezentate mai sus, s-a considerat c tranzistoarele MOS au canal de tip N. Pentru cele cu canal de tip P, circuitele de polarizare au aceea i structur , dar bornele sursei de alimentare V_{DD} sunt inversate fa de cazul tranzistorului MOS cu canal N – adic , borna “-” se leag la R_D i R_{G2} , iar borna “+” reprezint masa circuitului.