

# STRUJNO - NAPONSKE KARAKTERISTIKE MOSFET-a U PODRUČJU ISPOD NAPONA PRAGA

---

**Svetinović, Borna**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:949506>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija**

**STRUJNO - NAPONSKE KARAKTERISTIKE MOSFET-a  
U PODRUČJU ISPOD NAPONA PRAGA**

**Završni rad**

**Borna Svetinović**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 17.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Borna Svetinović
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4583, 24.07.2018.
<b>OIB studenta:</b>	12190932428
<b>Mentor:</b>	Izv.prof.dr.sc. Tomislav Matić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Strujno-naponske karakteristike MOSFET-a u području ispod napona praga
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektronika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	17.09.2021.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	22.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 23.09.2021.

**Ime i prezime studenta:**

Borna Svetinović

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4583, 24.07.2018.

**Turnitin podudaranje [%]:**

6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Strujno-naponske karakteristike MOSFET-a u području ispod napona praga**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.prof.dr.sc. Tomislav Matić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OSNOVE UNIPOLARNIH TRANZISTORA</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. SPOJNI FET</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2. MOSFET</b> .....	<b>3</b>
<b>3. SVOJSTVA MOSFET-a</b> .....	<b>6</b>
<b>3.1. NAPON PRAGA</b> .....	<b>6</b>
<b>3.2. STATIČKE KARAKTERISTIKE MOSFET-a</b> .....	<b>7</b>
3.2.1. Triodno područje .....	8
3.2.2. Područje zasićenja .....	8
<b>3.3. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE MOSFET-a</b> .....	<b>9</b>
<b>4. RAD MOSFET-a U PODRUČJU ISPOD NAPONA PRAGA</b> .....	<b>12</b>
<b>4.1. STRUJNO - NAPONSKE KARAKTERISTIKE MOSFET-a U PODRUČJU ISPOD     NAPONA PRAGA</b> .....	<b>12</b>
<b>4.2. PRIMJENA MOSFET-a U PODRUČJIMA ISPOD NAPONA PRAGA</b> .....	<b>14</b>
<b>5. SPICE MODEL TRANZISTORA</b> .....	<b>15</b>
<b>6. REZULTATI SIMULACIJE</b> .....	<b>16</b>
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>21</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>22</b>
<b>POPIS KRATICA</b> .....	<b>24</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>25</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>26</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>27</b>

# 1. UVOD

Tranzistori su izumljeni 1974. godine, a zamijenili su korištenje vakuumskih cijevi. Njihova sve raširenija primjena je dovela do razvoja tehnologije tranzistora od PMOS tranzistora preko NMOS sve do CMOS, što sve ide k cilju manje potrošnje energije i veće brzine rada. Potreba za manjom potrošnjom energije je bitna za očuvanje okoliša te je bitna i za sklopove jer kako se povećava toplina koju emitiraju sklopovi, dolazi do stvaranja grešaka i kvarova na uređajima. Jedan od načina kojim se postiže manja potrošnja energije jest primjena MOSFET-a koji rade u području ispod napona praga.

U drugom poglavlju rada ukratko su opisane osnove bipolarnih spojnih tranzistora, JFET i MOSFET. Treće poglavlje detaljno opisuje ponašanje MOSFET-a u statičkom i dinamičkom načinu rada te opisuje njegove strujno - naponske karakteristike. Četvrto poglavlje objašnjava strujno - naponske karakteristike MOSFET-a u području ispod napona praga te govori o primjenama takvoga MOSFET-a. Peto poglavlje govori o programu SPICE i SPICE modelima MOSFET-a koji će biti primijenjen za simulacije u području ispod napona praga te će biti prikazani parametri modela. U šestom poglavlju će biti prikazane strujno - naponske karakteristike MOSFET-a preko simulacije te će biti objašnjene sheme i način izvođenja simulacije. Posljednje, sedmo poglavlje je zaključak koji se temelji na radu i dobivenim rezultatima simulacija.

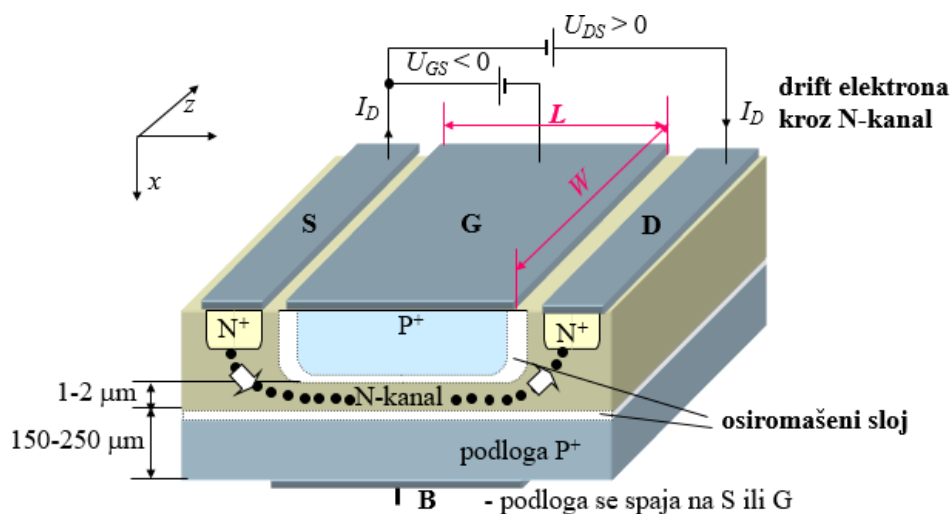
## 1.1. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Definirati strujno-naponske karakteristike MOSFET-a u području ispod napona praga. Napisati pregled stanja tehnike primjene MOSFET tranzistora u području ispod napona praga. Za dostupne SPICE modele MOSFET-a u različitim poluvodičkim tehnologijama simulirati strujno-naponske karakteristike tranzistora. Usporediti karakteristike modela za različite poluvodičke tehnologije i analizirati rezultate simulacije.

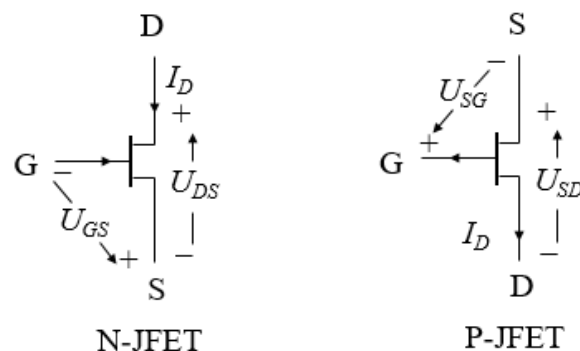
## 2. OSNOVE UNIPOLARNIH TRANZISTORA

### 2.1. SPOJNI FET

Spojni FET (JFET - eng. Junction Field Effect Transistor) se u današnje vrijeme rijetko izrađuje kao zasebni element. Najčešće se koristi N - kanalni JFET (Slika 2.1.), osim u slučaju kada se koristi u ulozi diferencijalnog pojačala u integriranim operacijskim pojačalima, tada se koriste i P - kanalni. Kod JFET-a, napon upravljačke elektrode mijenja širinu osiromašenog područja nepropusno polariziranog PN - spoja, tim istim PN – spojem upravljačka elektroda je odvojena od vodljivog kanala. Napon upravljačke elektrode također upravlja i otpornosti vodljivog kanala u volumenu poluvodiča. Na Slici 2.2. su prikazani simboli JFET-a.



Sl. 2.1. Pojednostavljeni presjek N - kanalnog JFET-a [1]



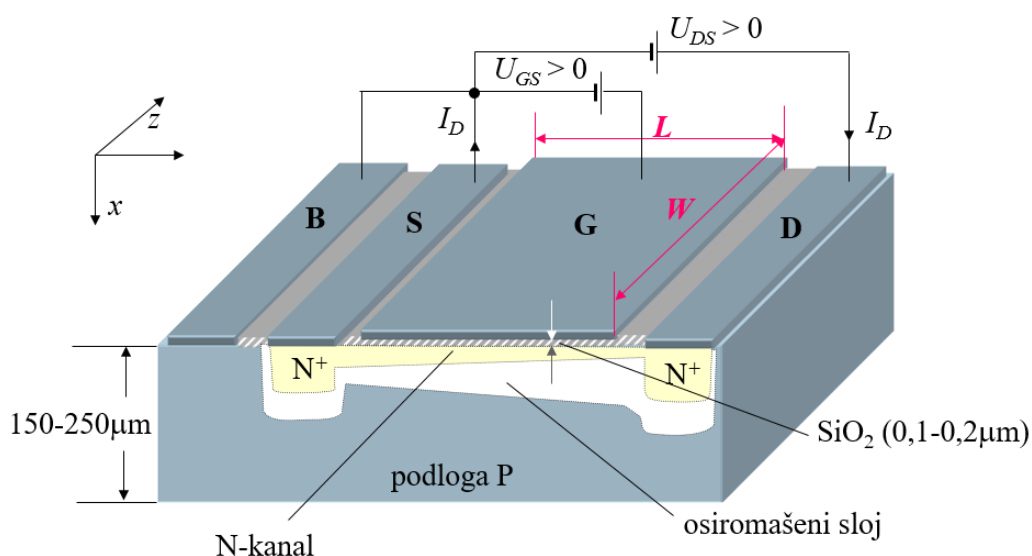
Sl. 2.2. N - kanalni i P - kanalni JFET [1]

Kada je napon  $U_{DS} = 0$  kroz kanal neće teći struja  $I_D$ , ali će postojati mala struja nepropusne polarizacije PN - spoja koja teče između upravljačke elektrode G i uvida S, međutim ta struja je zanemariva. Kada je napon  $U_{DS} > 0$  kroz tranzistor počinje teći struja  $I_D$ .

## 2.2. MOSFET

MIS (eng. Metal Insulator Semiconductor) tranzistori su jedni od najkorištenijih tranzistora, pogotovo ako govorimo o njihovoj upotrebi u digitalnim integriranim sklopovima. MOSFET (eng. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, FET) tranzistori su unipolarni MIS tranzistori. Pošto većina MIS tranzistora upotrebljava silicij kao poluvodič, silicijev dioksid kao izolator i aluminij kao metal upravljačke elektrode, za takve tranzistore počeo se koristiti naziv MOSFET.

Osnovna struktura MOSFET-a (Slika 2.3.), sastoji se od podloge B koja je lagano dopirana P - tip materijalima, a difuzijom su stvoreni  $N^+$  - slojevi, uvid S i odvod D. Između njih se nalazi, na površini, vodljivi N - kanal koji se inducira djelovanjem napona na upravljačkoj elektrodi. Upravljačka elektroda G je odvojena pomoću tankog sloja silicijevog dioksida od kanala na površini silicija.



Sl. 2.3. Presjek N - kanalnog MOSFET-a [1]

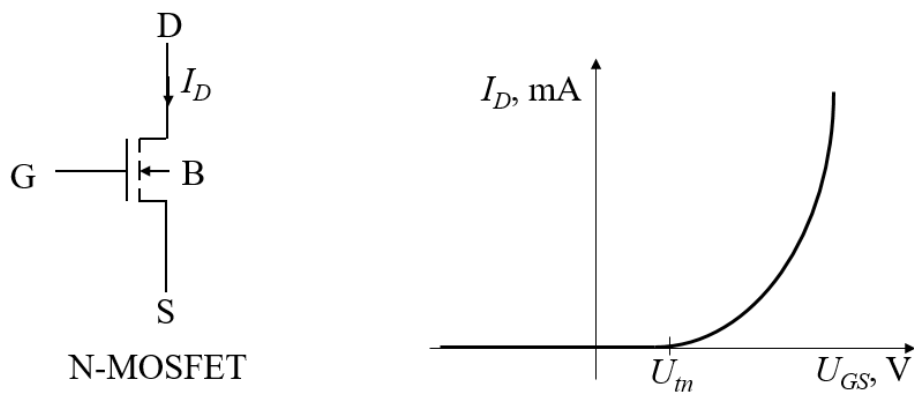
Iznimno važan parametar MOSFET-a je napon praga koji je najniži mogući napon koji se mora dovesti kako bi se inducirao kanal kod MOSFET-a. Napon koji je odgovoran za induciranje kanala N - kanalnog MOSFET-a je napon  $U_{GS}$ . Pozitivni napon  $U_{GS}$  mora biti veći ili jednak naponu praga



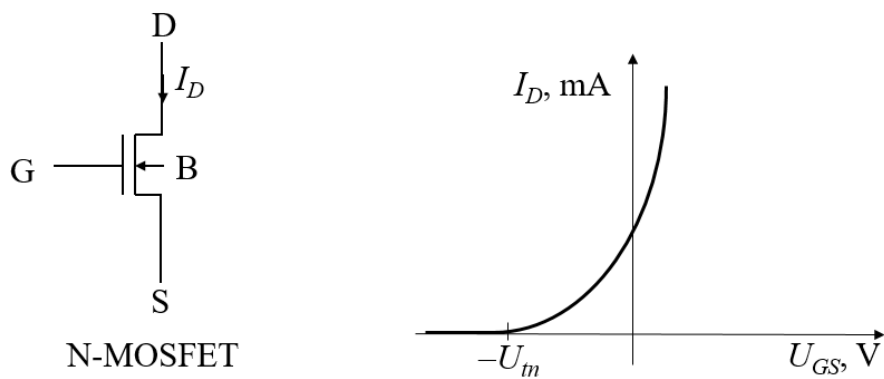
$U_m$  kako bi došlo do induciranje kanala. Kod P - kanalnog MOSFET-a, da bi došlo do indukcije kanala, napon  $U_{GS}$  mora imati manju vrijednost od napona praga  $-U_m$ .

Nije uvijek slučaj da napon  $U_{GS}$  mora biti pozitivan kako bi došlo do indukcije kanala. Postoji vrsta N - kanalnih MOSFET-a u kojima postoji kanal čak i kada je napon  $U_{GS} = 0$ . Kod takvih vrsta MOSFET-a je potrebno dovesti negativan napon  $U_{GS}$  kako bi razgradili taj kanal. Takav slučaj je karakterističan za MOSFET-e osiromašenog tipa.

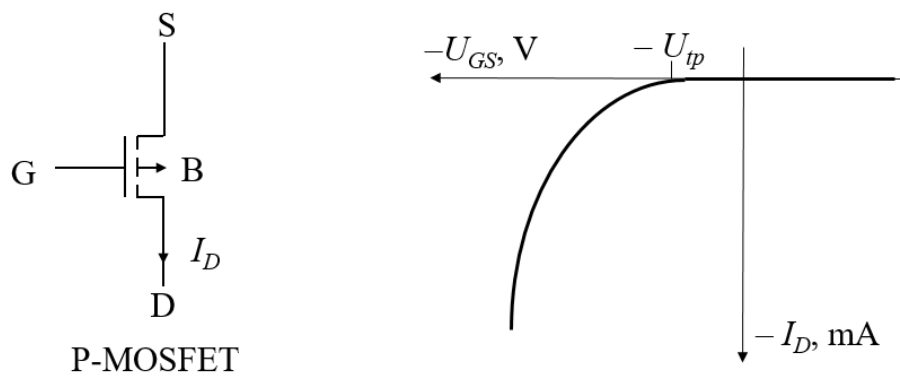
Na slikama 2.4. - 2.7. [1] se nalaze simboli i prienosne karakteristike MOSFET-a.



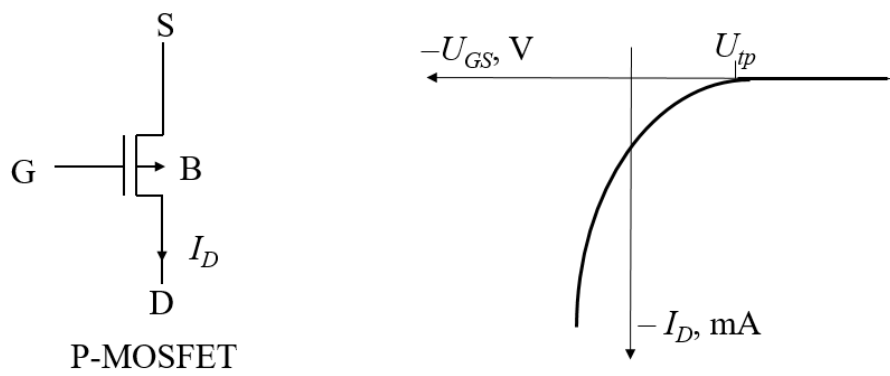
Sl. 2.4. N - kanalni MOSFET obogaćenog tipa



Sl. 2.5. N - kanalni MOSFET osiromašenog tipa



Sl. 2.6. P - kanalni MOSFET obogaćenog tipa



Sl. 2.7. P - kanalni MOSFET osiromašenog tipa

### 3. SVOJSTVA MOSFET-a

#### 3.1. NAPON PRAGA

Napon praga je definiran kao napon  $U_{GS}$ , koji je potreban da bi se koncentracija manjinskih nosilaca tranzistora izjednačila s koncentracijom većinskih nosilaca u neutralnom volumenu. Nakon što se postigne ravnoteža, dolazi do stvaranja kanala kod MOSFET-a. Napon praga se opisuje sljedećim izrazom [2]:

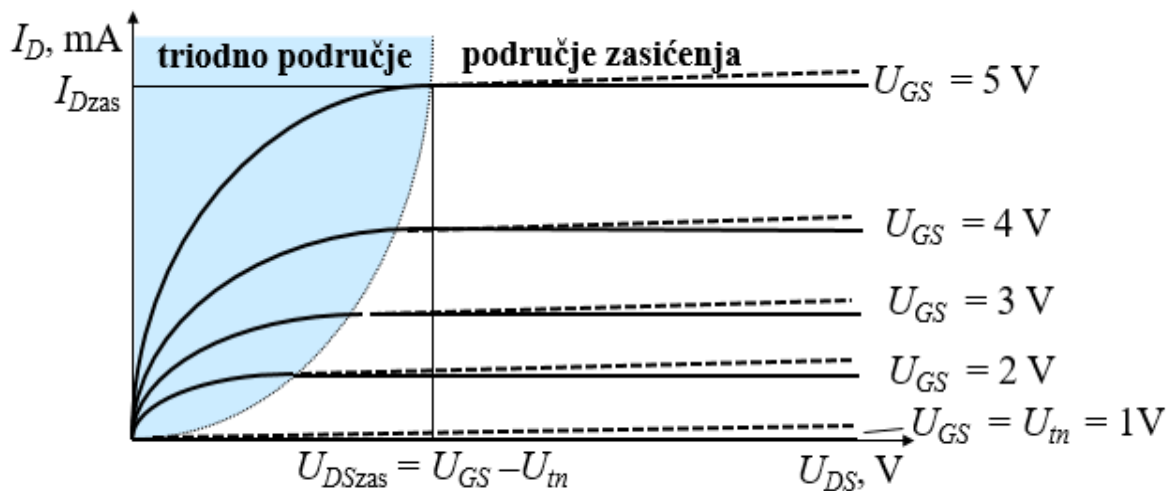
$$U_{tn,p} = \Phi_{ms} - \frac{Q_i}{C_i} - \frac{Q_d}{C_i} + 2\varphi_F. \quad (3.1.)$$

Navedeni izraz (3.1.) uzima u obzir sve najbitnije utjecaje za napon praga kod MOS komponente te izraz vrijedi za P - tip i za N - tip podloge. Prva dva člana opisuju ioniziranje pojasa te su oni uvijek negativni, bez obzira na vrstu podloge. Treći član jednadžbe prikazuje naboj osiromašenog područja koji je negativan kada se nalazi P - podloga ili kada je N - kanalni FET, a pozitivan je kada je N - podloga ili je P - kanalni FET. Posljednji član  $2\varphi_F$  definira se kao  $2*(E_i - E_f)/q$  u neutralnoj podlozi. Ovisno o tipu vodljivosti podloge,  $2\varphi_F$  može biti pozitivan ili negativan.

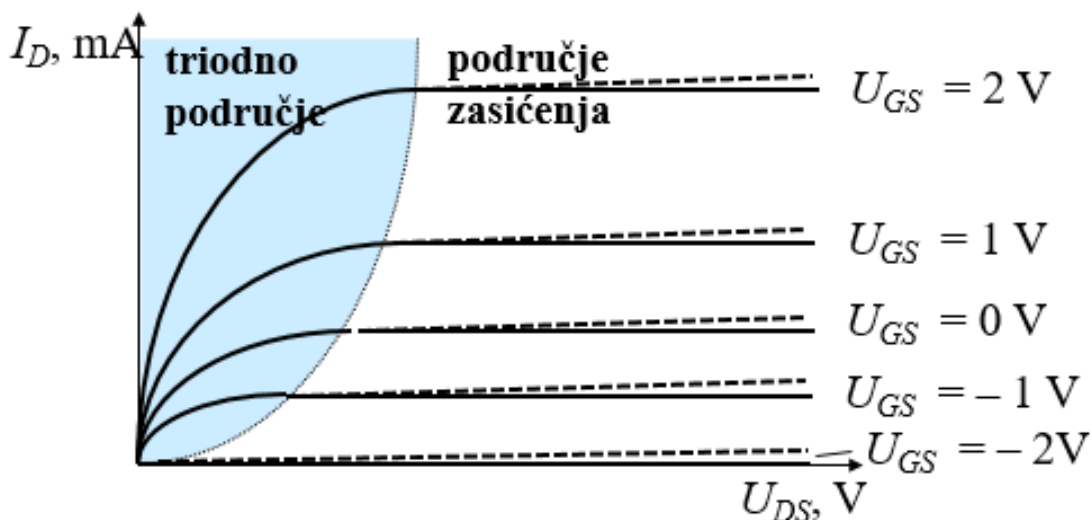
Kod N - kanalnog MOSFET-a, napon praga će jedino biti negativan ako je P - podloga slabo dopirana. Kada govorimo o jakoj dopiranoj P - podlozi, najviše će prevladavati član  $Q_d$  što će krajnje rezultirati s pozitivnim naponom praga. Kada govorimo o P - kanalnom MOSFET-u, svi članovi izraza (3.1.) će biti negativni, što će rezultirati s negativnim naponom praga. Svi članovi izraza (3.1.) ovise o koncentraciji primjesa u podlozi, osim drugog  $Q_i/C_i$ . Napon koji treba dovesti između metala i poluvodiča na P - kanalni MOSFET treba biti negativan, kako bi se inducirao kanal i kako bi se postigla inverzija. Takav tranzistor radi u obogaćenom načinu rada kao što se može vidjeti na slici 2.6. Također, za induciranje kanala i ostvarivanje inverzije kod N - kanalnog MOSFET-a potrebno je dovesti pozitivan napon koji je veći od napona praga. Takav MOSFET, također, radi u obogaćenom načinu rada. Dva spomenuta tipa MOSFET-a se nazivaju obogaćeni MOS tranzistori. Kod N - kanalnih osiromašenih tipova tranzistora, može postojati kanal s negativnim naponom, pa čak i bez napona. Kako bi se taj kanal razgradio, potrebno je dovesti napon manje vrijednosti (negativniji) od napona praga.

### 3.2. STATIČKE KARAKTERISTIKE MOSFET-a

MOS tranzistori se, također, nazivaju i površinski FET. Kontroliraju struju kroz tanki kanal na površini poluvodiča. Protok struje je tek omogućen kada postoji inverzijski sloj. Statičke karakteristike MOS tranzistora predstavljaju ovisnosti struje odvoda  $I_D$  o naponima  $U_{DS}$  i  $U_{GS}$ . Statičke karakteristike MOSFET-a se još nazivaju i  $I - U$  karakteristike. Postoje dva područja rada koja se mogu primijetiti na  $I - U$  karakteristikama MOSFET-a, triodno područje i područje zasićenja (Slika 3.1. i Slika 3.2.). Prvo se izvode karakteristike triodnog područja pa se onda pretpostavlja da će biti struja  $I_D$  konstantna u području zasićenja.



Sl. 3.1.  $I - U$  karakteristike N - kanalnog obogaćenog MOSFET-a [1]



Sl. 3.2.  $I - U$  karakteristike N - kanalnog osiromašenog MOSFET-a [1]

### 3.2.1. Triodno područje

U triodnom području struja odvoda raste s naponom  $U_{DS}$  kada vrijedi  $U_{GS} > U_{tn}$ . Struja  $I_D$  raste i ponaša se prema izrazu [2]:

$$I_D = \mu_n C_i \cdot \frac{W}{L} \left[ (U_{GS} - U_{tn}) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]. \quad (3.2.)$$

Izraz (3.2.) vrijedi za cijelo triodno područje. Rast struje  $I_D$  vrijedi sve dok vrijedi izraz [2]:

$$\frac{dI_D}{dU_{DS}} \geq 0. \quad (3.3.)$$

Pri niskim naponima  $U_{DS}$ -a, posljednji član izraza (3.2.)  $U_{DS}^2 / 2$  može se zanemariti. U trenutku kada vrijedi da je  $U_{GS} > U_{tn}$ , MOSFET će biti predstavljen kao linearni otpor. Linearni otpor će se izračunavati po izrazu (3.4.) [1] te bit će jednak za statički i dinamički otpor.

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\mu_n \varepsilon_s \frac{W}{d_{ox} L} (U_{GS} - U_{tn})} = \frac{1}{K (U_{GS} - U_{tn})}, \quad (3.4.)$$

Faktor K se izračunava prema izrazu [1]:

$$K = \mu_n \varepsilon_s \frac{W}{d_{ox} L}. \quad (3.5.)$$

### 3.2.2. Područje zasićenja

Rastom napona  $U_{DS}$  on dolazi do vrijednosti za koju vrijedi  $U_{DS} = U_{GS} - U_{tn} = U_{DSzas}$ . Kada napon  $U_{DS}$  postigne vrijednost  $U_{DSzas}$ , na strani odvoda dolazi do prekida kanala te prestaje rast struja  $I_D$ , tada će se ta struja  $I_D$  nazivati strujom zasićenja. Daljnjim povećavanjem napona  $U_{DS}$ , struja  $I_D$  će zadržavati konstantan iznos, praktički će vrijediti  $I_{Dzas} = \text{const}$  te tada imamo pravo zasićenje. Zbog toga je taj dio izlaznih karakteristika nazvano područje zasićenja. Struja  $I_D$  se može u području zasićenja lako izračunati te tada vrijedi izraz [1]:

$$I_{Dzas} = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{tn})^2. \quad (3.6.)$$

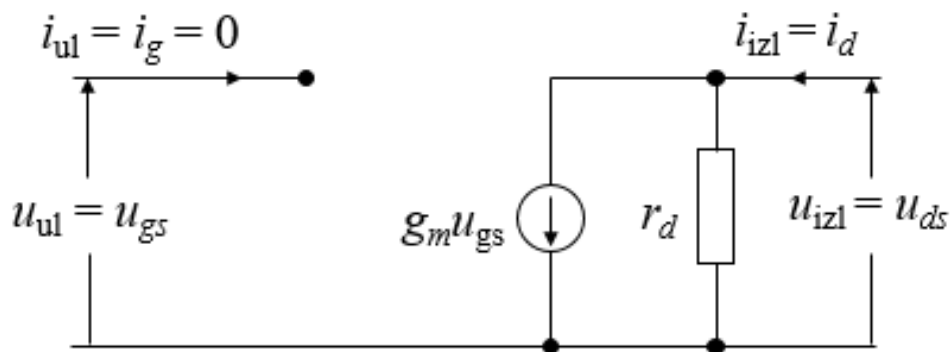
$I - U$  karakteristike kod P - MOSFET-a dobivaju se tako da se promjeni predznak kod svih veličina u izrazima za triodno područje (3.7.) [1] i područje zasićenja (3.8.) [1].

$$-I_D = \mu_n C_i \cdot \frac{W}{L} \left[ -(-U_{GS} - (-U_{tn}))U_{DS} - \frac{(-U_{DS})^2}{2} \right], \quad (3.7.)$$

$$-I_{Dzas} = \frac{K}{2} (-U_{GS} - (-U_{tn}))^2. \quad (3.8.)$$

### 3.3. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE MOSFET-a

MOSFET se u dinamičkim spojevima može prikazati nadomjesnom shemom prikazanoj na Slici 3.3. Nadomjesna shema je identična kao kod JFET-a. Karakteristike MOSFET-a pri malim signalima i oko radne točke se može linearizirati. Linearni parametri mogu se dobiti deriviranjem izraza koji je poveza s naponom i strujom, mjerenjem ili grafičkim putem preko  $I - U$  karakteristika. Glavni parametar kod dinamičkog rada je strmina  $g_m$  i izlazna dinamička vodljivost  $g_d$ .



Sl. 3.3. Nadomjesni spoj MOSFET-a [1]

Izlazna dinamička vodljivost  $g_d$  je predstavljena nagibom izlaznih karakteristika. Ona se može izračunavati deriviranjem kada se MOSFET nalazi u triodnom području i dobije se pomoću izraza [1]:

$$g_{d \text{ triodno}} = \frac{1}{r_d} = \left( \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right)_{U_{GS}=\text{konst}} = K(U_{GS} - U_{tn} - U_{DS}). \quad (3.9.)$$

Kada govorimo o području zasićenja i kada postoji modulacija kanala onda se  $g_d$  izračunava prema izrazu [1]:

$$g_d \text{ zasićenje} = \frac{I_D}{U_A} = \lambda I_D. \quad (3.20.)$$

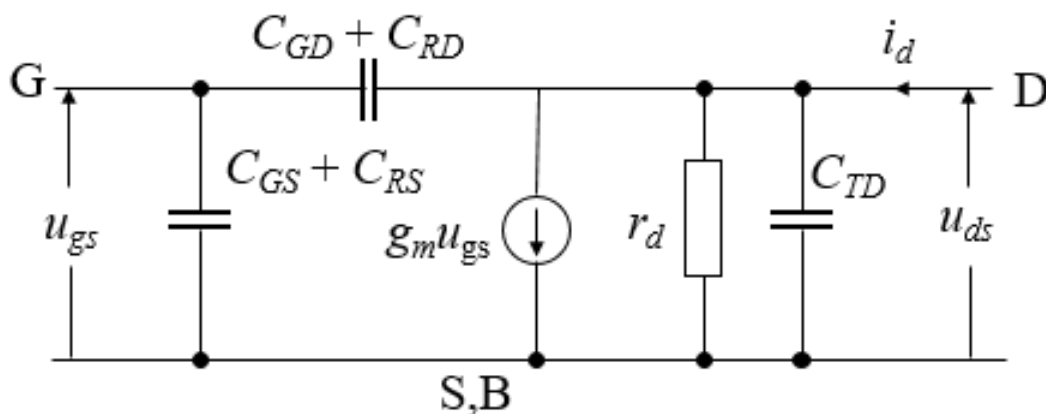
Kada nema modulacije kanala onda je  $g_d = 0$ .

Strmina  $g_m$  je predstavljena nagibom prijenosnih karakteristika, ali se također može dobiti iz izlaznih karakteristika. Za izračunavanje strmine koriste se izrazi [1]:

$$g_m \text{ triodno} = \frac{1}{r_d} = \left( \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right)_{U_{DS}=\text{konst}} = K U_{DS}, \quad (3.31.)$$

$$g_m \text{ zasićenje} = K(U_{GS} - U_{tn}) = \sqrt{2KI_D}. \quad (3.42.)$$

Na visokim frekvencijama kod MOSFET-a se uračunavaju i (parazitski) kapaciteti te onda se koristi nadomjesna shema sa Slike 3.4.



Sl. 3.4. Nadomjesni sklop na visokim frekvencijama [1]

$C_{GS}$  i  $C_{GD}$  su MOS kapaciteti upravljačke elektrode G i kanali na strani odvoda i uvoda. U triodnom području kanal je jednako širok preko cijele duljine  $C_{GS} = C_{GD} = C_i * WL/2$ , gdje je  $C_i = \epsilon_i / d_{ox}$ . U zasićenju je širina kanala na strani odvoda D jednaka nuli  $C_{GD} = 0$ , ali  $C_{GS} = 2 C_i WL/3$ .

$C_{TS}$  i  $C_{TD}$  su reda veličine MOS kapaciteta koji predstavljaju kapacitete osiromašenih slojeva nepropusno polariziranih slojeva između odvoda D i podloge V te uvoda S i podloge B.

$C_{RS}$  i  $C_{RD}$  su MOS kapaciteti koji nastaju zbog preklapanja metalizacije upravljačke elektrode G i difuzijskog područja uvoda D. Nastaju zbog tehnoloških razloga.

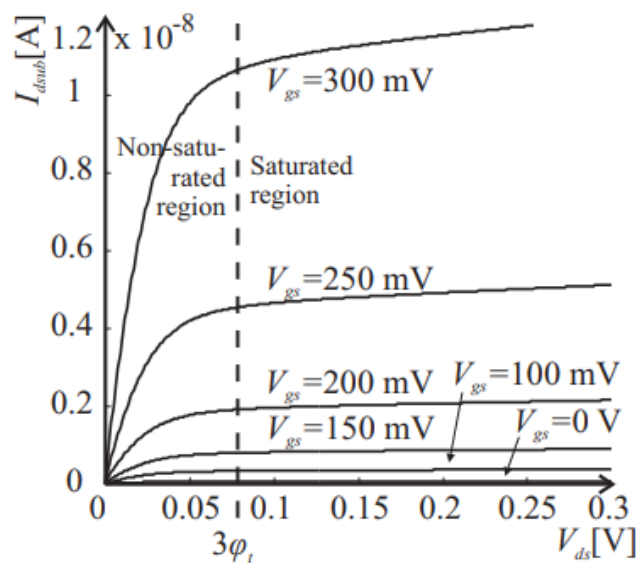
Kako bi se mogao formirati potpuni kanal, upravljačka dioda se mora protezati od S do D. Preklapanje aluminijske metalizacije elektrode G s dijelom uvoda i odvoda stvaraju se parazitski kapaciteti  $C_{RS}$  i  $C_{RD}$ . Kako je ulaz sklopa na elektrodi G i izlaz je elektroda D, parazitski kapacitet  $C_{RD}$  uvodi nepoželjnu povratnu vezu izlaza na ulaz. Stvaranje povratne veze se naziva Millerov efekt. Preklapanje uvoda se sprječava samopodešavanjem područja upravljačke elektrode. Dva glavna načina samopodešavanja su: upotreba implantacije za poravnavanje uvoda i odvoda s upravljačkom elektrodom i upotreba polisilicija umjesto metala za upravljačku elektrodu.



## 4. RAD MOSFET-a U PODRUČJU ISPOD NAPONA PRAGA

### 4.1. STRUJNO - NAPONSKE KARAKTERISTIKE MOSFET-a U PODRUČJU ISPOD NAPONA PRAGA

Kada je MOSFET u području ispod napona praga, on radi u području slabe inverzije. U tom slučaju je bitno da napon napajanja  $U_{DD}$  bude ispod napona praga  $U_{in}$ . On tada ima dva područja rada, a to su triodno područje i područje zasićenja (Slika 4.1.).



Sl. 4.1.  $I_{Dsub} - V_{DS}$  karakteristike N - kanalnog MOSFET [4]

Struja  $I_{Dsub}$  se računa izrazima (4.1.) i (4.2.) [4]. Kao što se može vidjeti na Slici 4.1. ta dva područja su podijeljena u ovisnosti je li napon  $U_{DS}$  veći ili manji od  $3U_t$ .

$$I_{Dsub} = I_0 e^{\frac{U_{GS} - U_{tn}}{nU_t}} \left( 1 - e^{-\frac{U_{DS}}{U_t}} \right), \quad U_{DS} < 3U_t, \quad (4.1.)$$

$$I_{Dsub} = I_0 e^{\frac{U_{GS} - U_{tn}}{nU_t}}, \quad U_{DS} > 3U_t. \quad (4.2.)$$

Parametar  $I_0$  je struja draina kada vrijedi da je  $U_{GS} = U_{in}$  te za njega vrijedi izraz [5]:

$$I_0 = \mu_0 C_i \frac{W}{L} (n - 1) U_t^2. \quad (4.3.)$$

Parametri u izrazu (4.3.) su:

- $\mu_0$  jest pokretljivost nosioca u kanalu (permeabilnost),
- $C_i$  je kapacitet oksidnog sloja te se računa kao  $C_i = \epsilon_i / d_{ox}$ ,  $\epsilon_i$  je dielektrična konstanta (permitivnost) koja se računa  $\epsilon_i = \epsilon_r * \epsilon_0$  ( $\epsilon_r$  je relativna dielektrična permitivnost materijala, za SiO<sub>2</sub> jest 3.82 [1];  $\epsilon_0$  je permitivnost vakuuma),  $d_{ox}$  je debljina oksidnog sloja,
- $W$  je širina kanala
- $L$  je duljina kanala,
- $n$  je faktor nagiba područja ispod napona praga koji se računa izrazom (4.4.) [5], u kojem je  $C_d$  kapacitet osiromašenog sloja,
- $U_t$  je toplinski napon koji se računa izrazom (4.5.) [5].

$$n = 1 + \frac{C_d}{C_i}, \quad (4.4.)$$

$$U_t = \frac{k T}{q}. \quad (4.5.)$$

Parametri izraza (4.5.) za toplinski napon su:

- $k$  jest Boltzmannova konstanta,
- $q$  je naboj elektrona, a
- $T$  je temperatura u kelvinima. Pri sobnoj temperaturi (27°C iliti 300K), toplinski napon iznosi 25.8mV.

Prema izrazima (4.1.) i (4.2.) možemo primijetiti da struja draina  $I_{Dsub}$  ne ovisi o naponu  $U_{DS}$  kada je napon  $U_{DS} > 3 U_t = 78\text{mV}$ . Kada je napon  $U_{DS}$  veći od 78mV tada se zanemaruje zagrada u izrazu (4.1.) jer je  $e^{-3} \ll 1$ . Kada je napon  $U_{DS}$  u rasponu  $[0, 3U_t]$ , ovisnost struje  $I_{Dsub}$  o  $U_{DS}$  je eksponencijalna. Velika razlika između jake inverzije i slabe inverzije je to što u jakoj inverziji struja  $I_d$  ovisi o kvadratnoj funkciji napona  $U_{GS}$  i  $U_{DS}$ , dok u slaboj inverziji je eksponencijalna ovisnost struje  $I_{Dsub}$  od naponima  $U_{GS}$  i  $U_{DS}$  ( $I_{Dsub} \approx e^{U_{ds}, U_{gs}}$ , za triodno područje i  $I_{Dsub} \approx e^{U_{gs}}$  za područje zasićenja).

## **4.2. PRIMJENA MOSFET-a U PODRUČJIMA ISPOD NAPONA PRAGA**

MOSFET u području ispod napona praga troši manje struje, ali pri tome je sporiji. Kada MOSFET radi u području ispod napona praga, on je savršen za uređaje kojima je nužnije imati manju potrošnju struje. Također je dobar u uređajima u kojima nije nužna visoka frekvencija obrade signala. Takvi uređaji su medicinski uređaji (npr. elektrostimulator srca tzv. pacemaker i slušni aparati [6, 7] ), električni ručni sat [8, 9] i uređaji s vlastitim napajanjem kao što su beskontaktne kartice [10]. Jedan od prvih uređaja koje je zahtijevao slabu potrošnju struje jest električni sat. Mobitel je također primjer uređaja u kojem se primjenjuje MOSFET u području ispod napona praga jer on je, u principu, većinu vremena u stanju mirovanja kada zahtjeva najmanju potrošnju struje. Mobitel u stanju mirovanja samo čeka da ga korisnik upotrijebi kako bi izašao iz stanja mirovanja [11]. Mikrosenzori su uređaji koji također koriste MOSFET u području ispod napona praga te se oni koriste u raznim načinima kao što su: zdravstvene svrhe [12], praćenje staništa u prirodi [6, 7] te radio frekvencijska identifikacija (RFID) [10].

## 5. SPICE MODEL TRANZISTORA

SPICE (eng. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) je računalni program koji se koristi za simulaciju elektroničkih sklopova. Godine 1973. D. O. Pederson i L. W. Nagel su razvili program na sveučilištu u Berkleyu, SAD [3]. Program sadrži mnogo različitih elektroničkih elemenata kao što su: PN – dioda, Schottkyjevih dioda, Zenerova dioda, LE dioda, PNP i NPN bipolarni spojni tranzistori, N i P kanalni JFET-i te N i P kanalni MOSFET-i. Program SPICE nudi veliku količinu modela tranzistora dostupnih za simulaciju.

Modeli MOSFET-a koje će se koristiti za simulacije su modeli:

- tsmc180n nmos [13] i
- eecmosn nmos [14].

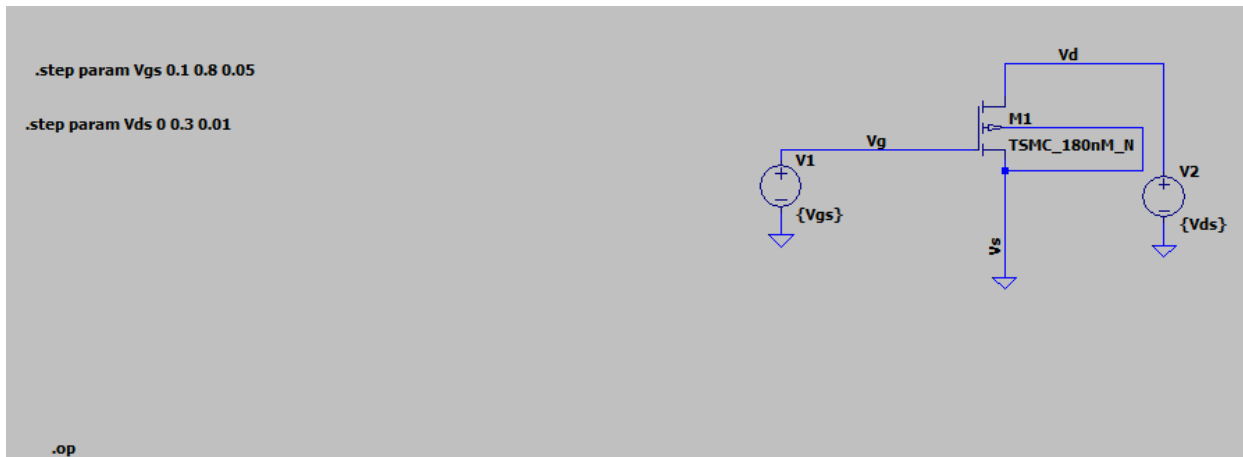
Ključni parametri (modela tsmc180n nmos i eecmosn nmos) za izračunavanje struje  $I_{Dsub}$  pomoću izraza (4.1.)(4.2.)(4.3.) su:

- $NFactor$  - faktor nagiba područja ispod napona praga (Subthreshold swing factor) [-]
- $L$  – duljina kanala [m]
- $W$  – širina kanala [m]
- $Vth0$  – napon praga [V]
- $Tox$  – debljina oksidnog sloja [m].

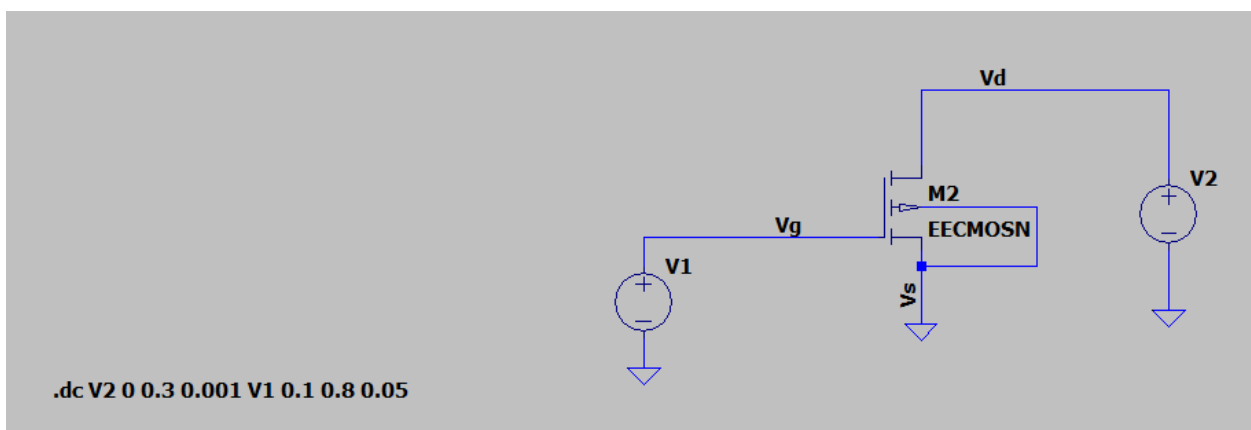
Ulazne veličine za navedene parametre dostupne su u izvorima [13, 14].

## 6. REZULTATI SIMULACIJE

Navedeni modeli MOSFET-a će biti prikazani u shemi kako bi se mogle prikazati strujno-naponske karakteristike. Odabrani način spajanja je spoj zajedničkog sourcea (ZS) te su sheme prikazane na slikama 6.1. i 6.2.



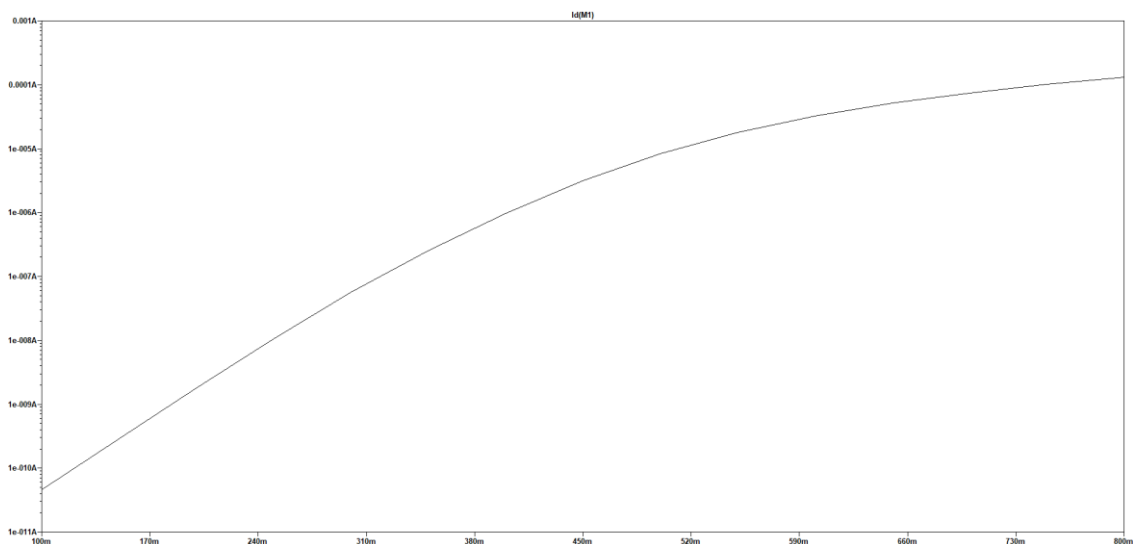
Sl. 6.1. Shema modela tsmc180n



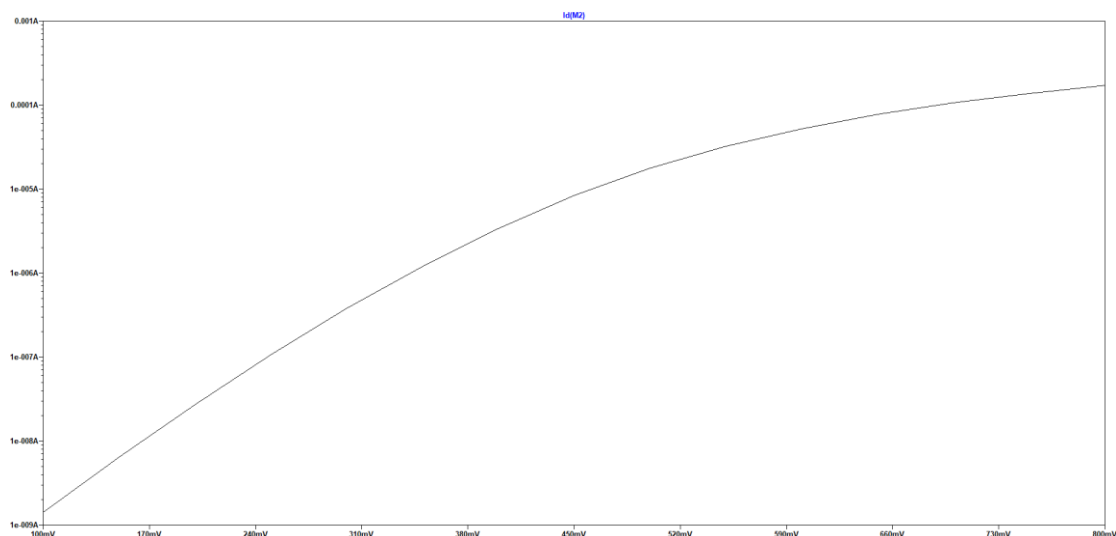
Sl. 6.2. Shema modela EECSMOSN

Vrijednosti parametara modela su uneseni preko `.include` funkcije, tako da se mora napisati odredište u kojima se nalaze datoteke s parametrima. Za shemu `tsmc180n` modela (Slika 6.1.) su naponski izvori zadani preko varijable. Varijable postavljamo naredbom `.step` koja funkcionira tako da se prvo navede parametar koji se koristi, onda ide početna vrijednost, zatim krajnja vrijednost, a zadnja vrijednost predstavlja iznos za koliko će se napon pojačati. Funkcija `.op` postavlja shemu da radi u DC režimu te postavlja sve kapacitete kao prekide, a induktivitete predstavlja kao kratke spojeve. Za shemu `EECMOSN` je korištena naredba `DC sweep` koja omogućava da se lakše unose iznosi te radi jednako kao funkcije `.step` i `.op`.

Prijenosne karakteristike modela, u logaritamskom mjerilu, su prikazane na slikama 6.3. i 6.4. Može se primijetiti linearnost karakteristike do napona praga.

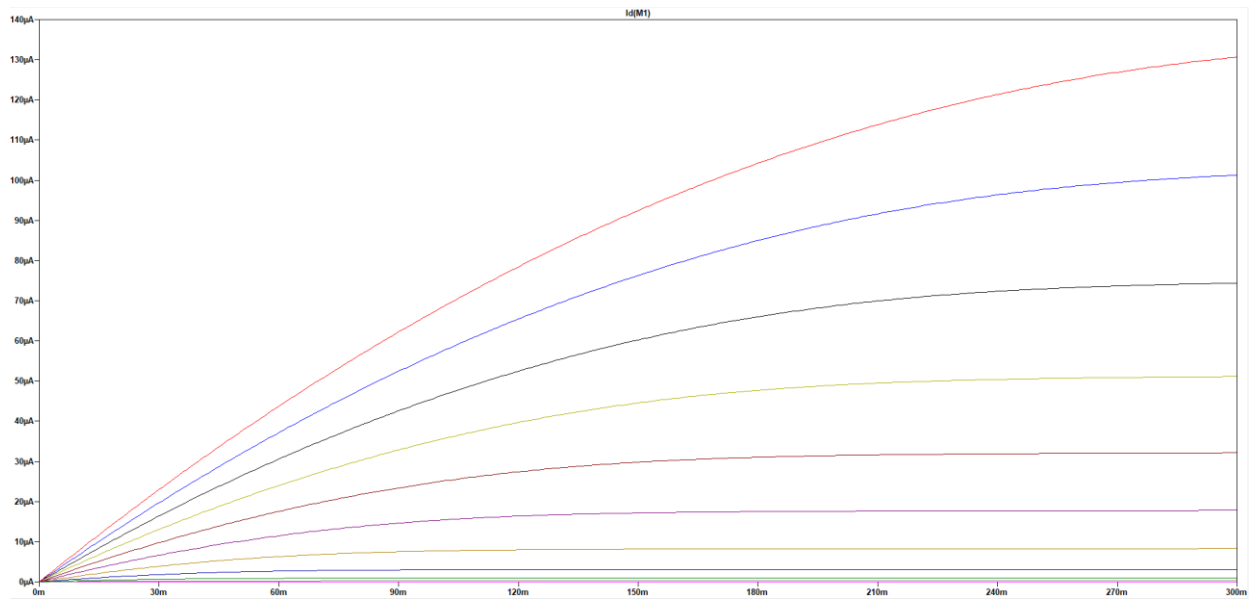


Sl. 6.3. Prijenosna karakteristika modela `tsmc180n`.

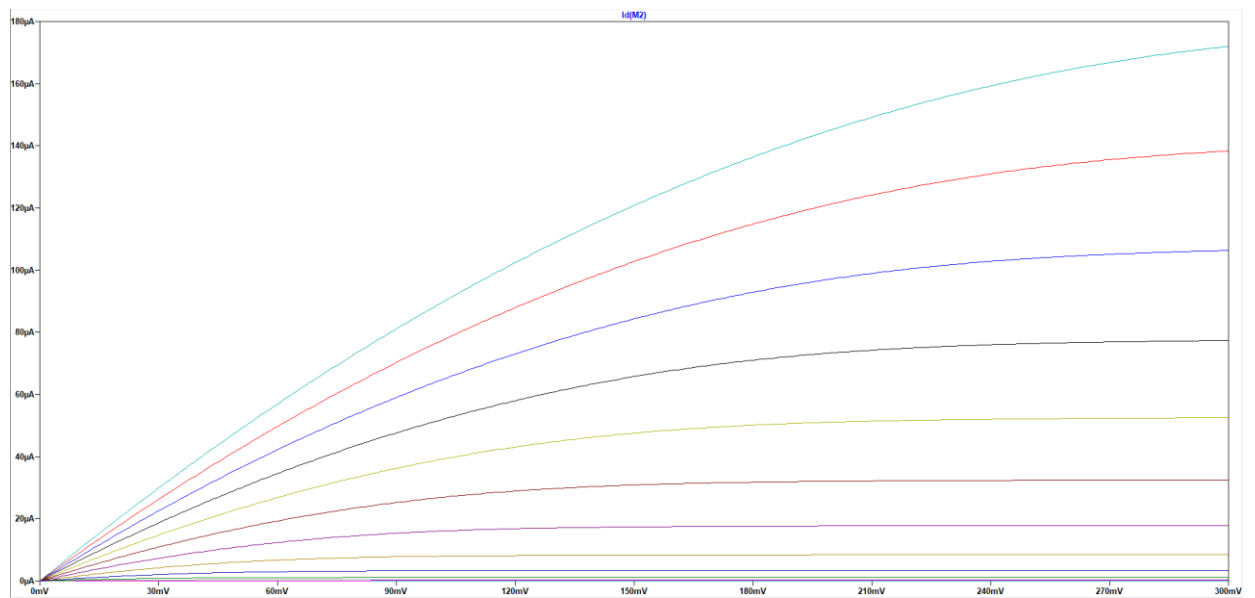


Sl. 6.4. Prijenosna karakteristika modela `EECMOSN`.

Rezultat simulacije izlaznih  $I - U$  karakteristika prikazane na slikama 6.5. i 6.6.

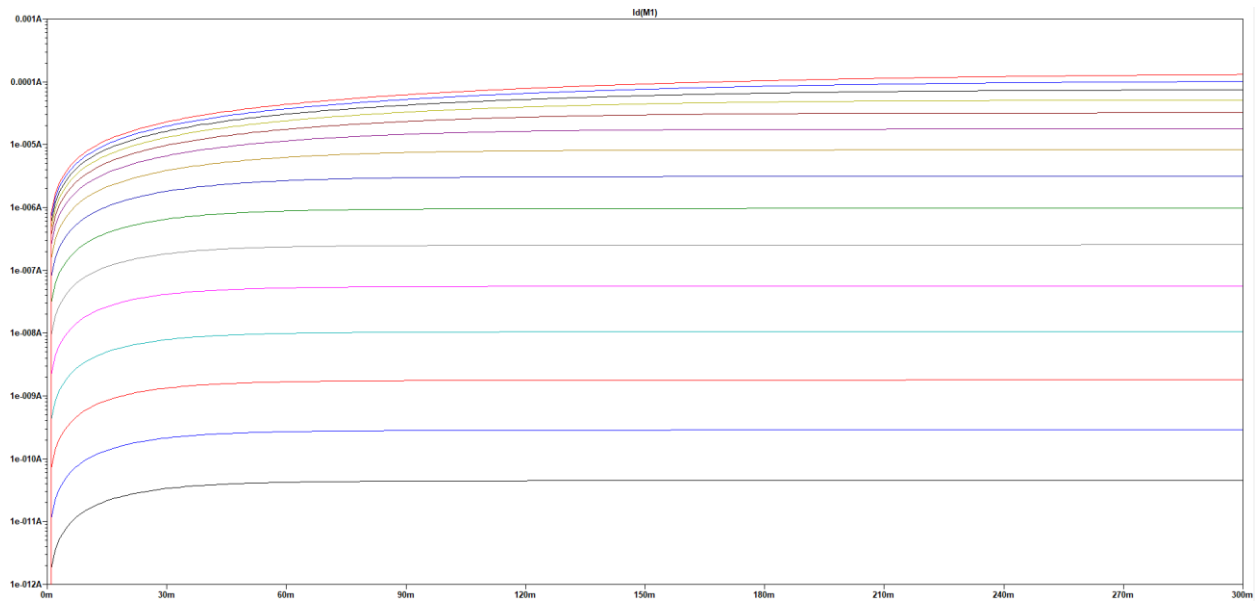


Sl. 6.5. Simulacija tsmc180n modela

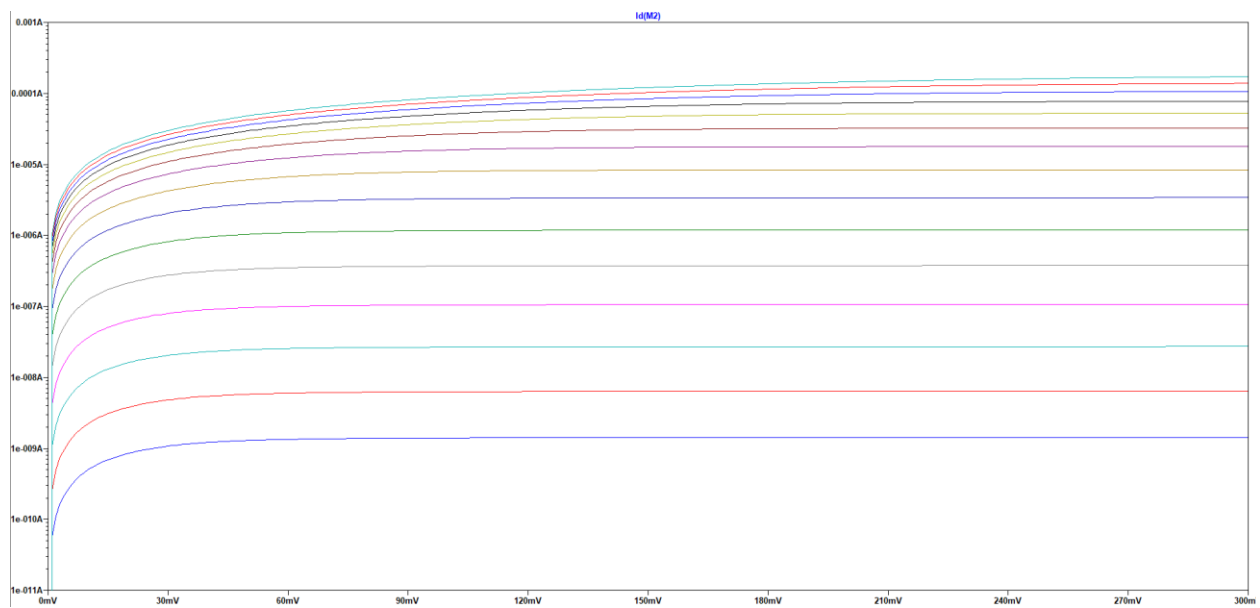


Sl. 6.6. Simulacija EECMOSN modela

Rezultati simulacije u logaritamskom mjerilu prikazani na slikama 6.7. i 6.8.



Sl. 6.7. Simulacija  $I - U$  karakteristika tsmc180n modela



Sl. 6.8. Simulacija  $I - U$  karakteristika EECMOSN modela



Na izlaznim karakteristikama mogu se primijetiti dva područja rada, triodno područje i područje zasićenja. Prelazak iz triodnog područja u područje zasićenja za napone  $U_{GS}$  ispod vrijednosti napona praga događa se kada napon  $U_{DS}$  dolazi do iznosa oko 80mV. Prelazak u područje zasićenja na simulaciji odgovara predviđanjima da će se prijelaz dogoditi kada napon  $U_{DS}$  dođe do iznosa  $U_{DS} > 3U_t$ . Kada napon  $U_{DS}$  ide preko 80mV, može se primijetiti da struja  $I_{Dsub}$  prestaje s naglim rastom. Može se još primijetiti da za male napone  $U_{GS}$  struja  $I_{Dsub}$  ima eksponencijalni oblik, što također odgovara području ispod napona praga. Kako su postavljeni jednaki naponi  $U_{GS}$  i  $U_{DS}$  možemo usporediti modele. Model EECMOSN na istim uvjetima ima veći iznos struje  $I_{Dsub}$  za  $40\mu A$ , nego model tsmc180n.

## 7. ZAKLJUČAK

Cilj elektronike jest stvaranje bržih i energetski efikasnijih tehnologija. Način da se postigne manja potrošnja je primjena MOSFET-a koji radi u području ispod napona praga. Primjena MOSFET-a u području ispod napona praga je vrlo važna i postaje sve raširenija. Ovakav način rada MOSFET-a nije savršen, jer kako se smanjuje potrošnja energije, smanjuje se i brzina rada uređaja.

Zadatak ovog rada je bio prikazati strujno-naponske karakteristike modela u području ispod napona praga. Prvo su prikazane teorijske postavke MOSFET-a u području ispod napona praga i kako možemo očekivati da će izgledati strujno-naponske karakteristike u simulaciji. Korišteni program za simulacije je SPICE i to pomoću dvaju SPICE modela N - kanalnih MOSFET-a, model tsmc180n i model EECMOSN. Prikazan je sklop, objašnjen način kao i funkcije korištene za simulaciju strujno-naponskih karakteristika. Rezultati simulacije strujno-naponskih karakteristika odgovaraju zadanim teorijskim pretpostavkama. Dobivene karakteristike za modele MOSFET-a su vrlo slične, može se primijetiti kako model EECMOSN u istim uvjetima provodi veći iznos struje draina, nego što to provodi model tsmc180n.

## LITERATURA

- [1] T. Švedek, Nastavni materijali iz predmeta Elektronika 1, FERIT, Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku
- [2] T. Švedek, Pulvodičke komponente i osnovni sklopovi, Graphis, Zagreb, 2001.
- [3] P. Biljanović, Poluvodički elektronički elementi, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [4] B. Dokic i A. Pajkanovic, Conventional and sub-threshold operation regimes of CMOS digital circuits, *Automatika*, 57 (3), 782-792, 2016.
- [5] S. M. Sharroush, Analysis of the subthreshold CMOS logic inverter, *Ain Shams Engineering Journal*, Issue 4, Volume 9, Page 1001-1017, December 2018.
- [6] A. Cerpa , J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, J. Zhao . Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology. *Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on data communications, Latin America and the Caribbean*; 31, 20–41., 2001.
- [7] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson. *Wireless sensor networks for habitat monitoring. ACM international workshop on wireless sensor networks and applications (WSNA)*; p. 88–97, 2002.
- [8] E. Biagioni, K. Bridges, The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species. *Int J High Performa Comput Appl*, Special issue on distributed sensor networks, 16(3), 315-324, 2002.
- [9] Y. Tsvividis, Eric Vittoz and the strong impact of weak inversion circuits, *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, 13(3), 2008.
- [10] B. Nath, F. Reynolds, R. Want, *RFID Technology and Applications*, *IEEE Pervasive Computing*, 5(1), 2006.
- [11] K.T. James, *Subthreshold leakage control techniques for low power digital circuits*, Doctor of philosophy thesis. Massachusetts Institute of technology, 1995.
- [12] L. Schwiebert, S. Gupta, J. Weinmann, Research challenges in wireless networks of biomedical sensors. *Proceedings of the 7th annual international conference on mobile computing and networking*, p. 151–65. 2001.
- [13] <https://europactice-ic.com/mpw-prototyping/asics/tsmc/> (zadnji pristup:17.9.2021.)

[14] L. Fuller, Notes on RIT CMOS processes, Testing and Design, Rochester Institute of Technology Electrical and Microelectronic Engineering, Dostupno na: <https://people.rit.edu/lffeee/CMOS.htm> (zadnji pristup: 10. 9. 2021.).

## **POPIS KRATICA**

DC	Direct – current
JFET	Junction – field – effect – transistor
MIS	Metal – insulator – semiconductor
MOSFET	metal – oxide – semiconductor – field – effect – transistor
NMOS	N – channel metal – oxide – semiconductor
PMOS	P – channel metal – oxide – semiconductor
RFID	Radio – frequency – identification
SPICE	Simulation – Program – with – Integrated – Circuit – Emphasis

## **SAŽETAK**

U radu su prikazane i analizirane strujno-naponske karakteristike MOSFET-a koji radi u području ispod napona praga. Za modeliranje je korišten program SPICE koji omogućava konstruiranje vlastitih spojeva i implementiranje različitih vrijednosti parametara modela. Njime je moguće napraviti simulaciju strujno-naponskih karakteristika željenog modela. Korišteni su tsmc180n i EECMOSN modeli. Rezultati simulacije odgovaraju teoretskim pretpostavkama.

### **KLJUČNE RJEČI:**

MOSFET, Područje ispod napona praga, Simulacija, SPICE, Strujno-naponske karakteristike

# **THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF MOSFET IN THE SUBTHRESHOLD REGION**

## **ABSTRACT**

The task of this paper is to present and analyse the current-voltage characteristics of MOSFET in the subthreshold region. The characteristics will be shown in a program that is called SPICE. The program gives the user the ability to build their own circuits and implement parameters of SPICE MOSFET models. With this program the current-voltage characteristics will be simulated for the wanted model. The used models are tsmc180n and EECMOSN. The result of the simulation matches the theoretical assumptions.

## **KEY WORDS:**

Current-voltage characteristics, MOSFET, Simulation, Subthreshold region, SPICE

## **ŽIVOTOPIS**

Borna Svetinović rođen je 11. srpnja 1999. godine u Osijeku. Osnovnoškolsko obrazovanje je završio u osnovnoj školi Vijenac 2014. godine u Osijeku. Nakon osnovne škole upisao je III. gimnaziju Osijek koju je završio i maturirao 2018. godine. Nakon završene srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.