

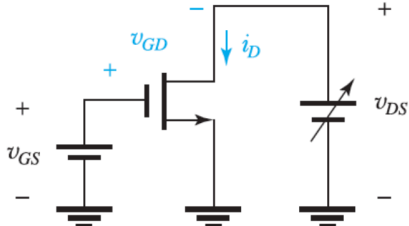
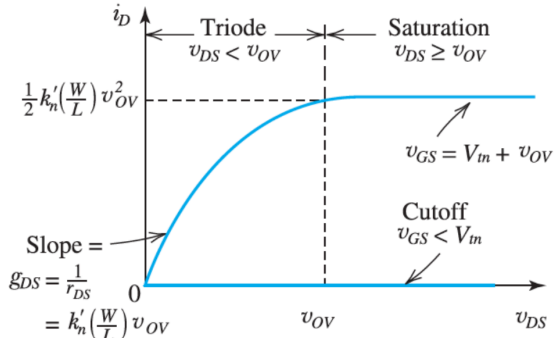
1 STRUJNO-NAPONSKE KARAKTERISTIKE MOSFET-A

1.1 $i_D - v_{DS}$ karakteristike MOSFET-a

U tabeli 1.1 je dat prikaz odgovarajućih uslova i izraza za rad n-kanalnog MOSFET-a u tri moguća režima: zakočenje, omski ili linearni režim (*triode*) i zasićenje. Prva dva režima rada su potrebna ukoliko se MOSFET koristi kao prekidač. Sa druge strane, ukoliko se MOSFET koristi za dizajn pojačavača, mora raditi u režimu zasićenja. Kolo prikazano u tabeli koje se sastoji od jednog MOSFET-a i dva jednosmjerna izvora v_{GS} i v_{DS} može poslužiti za određivanje $i_D - v_{DS}$ karakteristike n-kanalnog MOSFET-a. Krive se dobijaju tako što se napon v_{GS} drži konstantnim, dok se napon v_{DS} mijenja, a mjeri se struja drena i_D . Dvije ovakve karakteristike prikazane su u tabeli 1.1 za napon $v_{GS} < V_m$ i za napon $v_{GS} = V_m + v_{OV}$, pri čemu je V_m napon praga n-kanalnog MOSFET-a.

Kako je prikazano u tabeli 1.1, granica između omske oblasti i oblasti zasićenja određena je uslovom da li je napon v_{DS} manji ili veći od napona v_{OV} (*overdrive*) na kojem MOSFET radi. Ekvivalentan način je upoređivanje napona između gejta i drena sa naponom praga. Naime, za omski režim rada, potrebno je da napon na gejt u bude veći od napona na drejnu, najmanje za vrijednost napona praga, što osigurava kontinualan kanal. Sa druge strane, za rad MOSFET-a u zasićenju kanal mora biti „prekinut“ (*pinched off*) na strani drena, što se ostvaruje držanjem napona drena iznad razlike napona gejta i napona praga, odnosno ne smije se dozvoliti da napon drena padne ispod napona gejta za više od napona praga, slika 1.1.

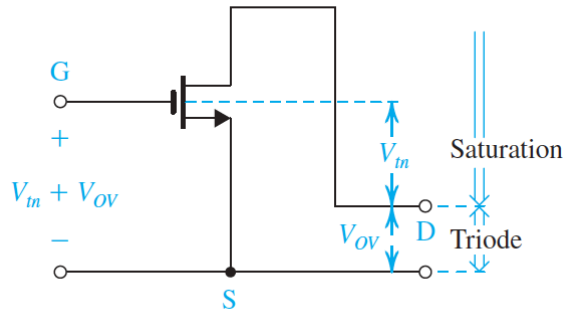
Tabela 1.1 Režimi rada n-kanalnog MOSFET-a

	
$v_{GS} < V_m$: nema kanala; MOSFET je zakočen; $i_D = 0$ $v_{GS} = V_m + v_{OV}$: kanal je indukovao; tranzistor radi u omskom režimu ili u zasićenju u zavisnosti da li je kanal kontinualan ili prekinut na strani drena;	
<i>Omski režim rada</i> $v_{GD} > V_m$ ili $v_{DS} < v_{OV}$ Tada je: $i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_{tn})v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right]$ ili ekvivalentno: $i_D = k'_n \frac{W}{L} \left(v_{OV} - \frac{1}{2}v_{DS} \right) v_{DS}$	<i>Režim zasićenja</i> $v_{GD} \leq V_m$ ili $v_{DS} \geq v_{OV}$ Tada je: $i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{tn})^2$ ili ekvivalentno: $i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} v_{OV}^2$

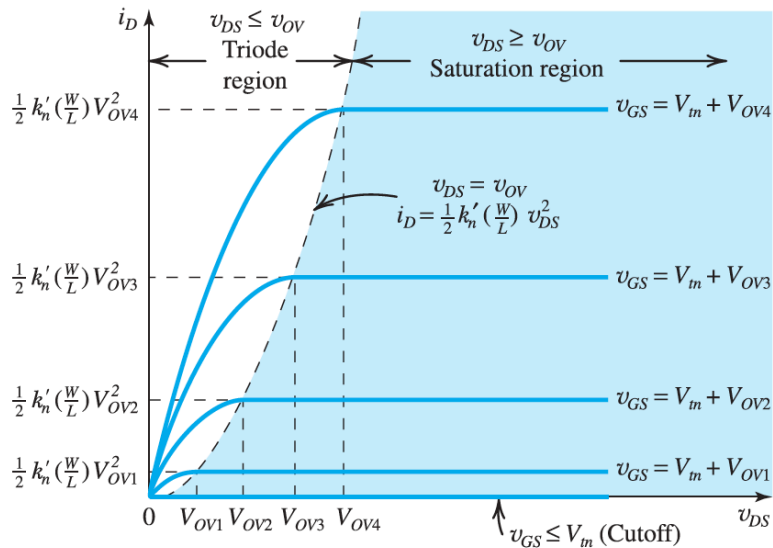
Na slici 1.2 prikazano je nekoliko $i_D - v_{DS}$ karakteristika za različite vrijednosti napona v_{GS} . Može se primijetiti da je napon v_{GS} veći od napona praga za odgovarajući *overdrive* napon, V_{OV1} , V_{OV2} , V_{OV3} i V_{OV4} . To je, zapravo, vrijednost napona drena, za koju odgovarajuća karakteristika mijenja režim rada tj. prelazi u zasićenje. Tada je struja drena direktno određena vrijednošću *overdrive* napona:

$\frac{1}{2}k_n V_{OV1}^2, \frac{1}{2}k_n V_{OV2}^2, \dots$ Na kraju, treba uočiti da je granica između omskog regiona i regiona zasićenja parabola opisana sljedećom relacijom:

$$i_D = \frac{1}{2}k_n' \frac{W}{L} v_{DS}^2 \quad (1.1)$$



slika 1.1 Relativni nivoi napona na terminalima n-kanalnog MOSFET-a za omski režim i režim zasićenja.



slika 1.2 $i_D - v_{DS}$ karakteristika n-kanalnog MOSFET-a.

1.2 $i_D - v_{GS}$ karakteristike MOSFET-a

MOSFET, kada se koristi za dizajn pojačavača, radi u režimu zasićenja. Kao što je prikazano na slici 1.2, u zasićenju struja je konstantna i određena naponom v_{GS} (ili v_{OV}) i ne zavisi od v_{DS} . Dakle, MOSFET se ponaša kao strujni izvor čija struja je određena naponom v_{GS} . MOSFET je, zapravo, naponom kontrolisani strujni izvor, pri čemu je v_{GS} kontrolni napon:

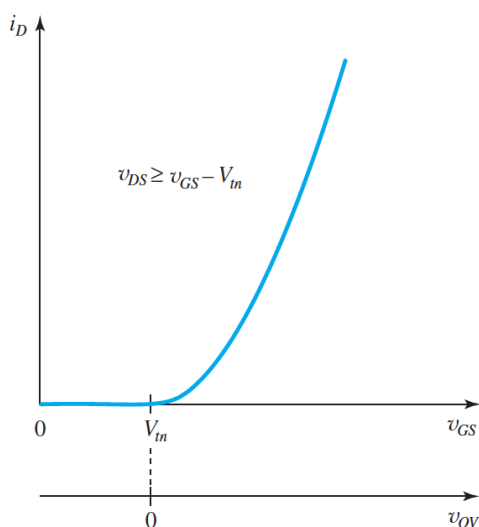
$$i_D = \frac{1}{2}k_n' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{tn})^2 \quad (1.2)$$

ili

$$i_D = \frac{1}{2}k_n' \frac{W}{L} v_{OV}^2 \quad (1.3)$$

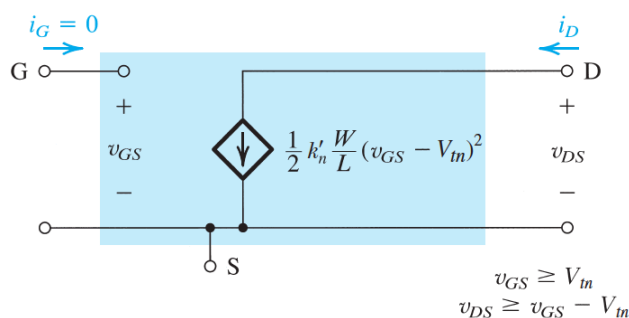
Ova relacija je u osnovi primjene MOSFET-a kao pojačavača. Iako je u pitanju nelinearna zavisnost, uz pomoć MOSFET-ova se mogu dobiti linearni pojačavači.

Na slici 1.3 prikazana je $i_D - v_{GS}$ karakteristika n-kanalnog MOSFET-a u zasićenju. Ukoliko se želi prikazati zavisnost struje drena od napona v_{OV} , potrebno je pomjeriti koordinatni početak u tačku $v_{GS} = V_{tn}$, slika 1.3.



slika 1.3 $i_D - v_{GS}$ karakteristika n-kanalnog MOSFET-a u zasićenju. $i_D - v_{OV}$ karakteristika se može dobiti jednostavnim pomjeranjem koordinatnog početka u tačku $v_{GS} = V_{tn}$.

Model MOSFET-a, kao naponom kontrolisanog strujnog izvora, je dat na slici 1.4. U pitanju je DC model. Strujni izvor je idealan, sa beskonačnom izlaznom otpornošću što znači da struja i_D ne zavisi od napona v_{DS} . Ovo je, naravno, pretpostavka idealnog modela, koji je razmatran u prethodnom tekstu.



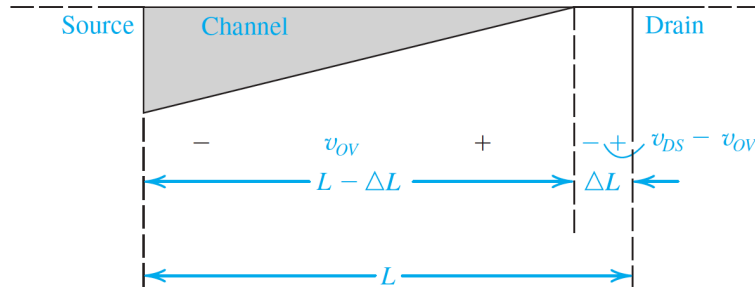
slika 1.4 Model za „velike“ signale n-kanalnog MOSFET-a u zasićenju

1.3 Konačna vrijednost izlazne otpornosti MOSFET-a u zasićenju

Relacija (1.2) i model prikazan na slici 1.4 ukazuju da je struja i_D nezavisna od napona v_{DS} , odnosno da je izlazna otpornost MOSFET-a beskonačna. U pitanju je idealizovan slučaj koji je baziran na pretpostavci da jednom kada je kanal prekinut na strani drena, dalje povećanje napona v_{DS} ne utiče na oblik kanala. Međutim, povećanje napona v_{DS} iznad v_{OV} utiče na kanal u određenoj mjeri. Preciznije, kako se v_{DS} povećava, tačka prekida kanala se pomjera postepeno od drena prema sorsu, što je ilustrovano na slici 1.5. Može se uočiti da je napon duž kanala konstantan i iznosi v_{OV} dok je napon ($v_{DS} - v_{OV}$) između kraja kanala i drena, duž uske osiromašene oblasti. Upravo ovaj napon ubrzava elektrone preko osiromašene oblasti prema drenu. Treba obratiti pažnju da se širenjem osiromašene oblasti na strani drena skraćuje kanal sa L na $(L - \Delta L)$ (poznatije kao modulacija dužine kanala). Kako je struja i_D inverzno proporcionalna dužini kanala, struja i_D se povećava sa povećanjem napona v_{DS} . Ovaj uticaj se može uvrstiti u izraz za struju drena i_D na sljedeći način:

$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{tn})^2 (1 + \lambda v_{DS}) \quad (1.4)$$

gdje je λ koeficijent modulacije dužine kanala specifičan za uređaj i jedinica mu je [V^{-1}]. Parametar λ zavisi od tehnologije procesa fabrikacije, ali i od dužine kanala MOSFET-a. Preciznije, koeficijent modulacije dužine kanala ima značajno veću vrijednost za savremenije submikronske tehnologije, nego za starije tehnologije. Za datu tehnologiju, λ je inverzno proporcionalno dužini kanala L .



slika 1.5 Dalje povećanje napona v_{DS} preko napona v_{DSsat} će dovesti do pomjeranja tačke prekida kanala prema sorsu, redukujući, na taj način, efektivnu dužinu kanala.

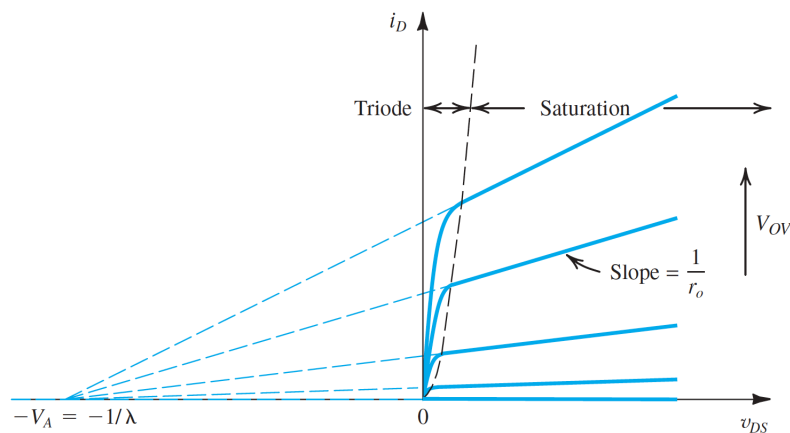
Tipičan set $i_D - v_{DS}$ karakteristika, koje prikazuju uticaj modulacije dužine kanala, je prikazan na slici 1.6. Linearna zavisnost struje drejna od napona v_{DS} u zasićenju je predstavljena faktorom $(1 + \lambda v_{DS})$, relacija (1.4). Sa slike 1.6 se može uočiti da produžavanjem lineranog dijela karakteristike u oblasti zasićenja dolazi do presijecanja ove karakteristike i v_{DS} ose u tački $v_{DS} = -V_A$, pri čemu je V_A pozitivna vrijednost. Na osnovu relacije (1.4) struja i_D ima vrijednost nula za $v_{DS} = -(1 / \lambda)$, što znači da je:

$$V_A = \frac{1}{\lambda} \quad (1.5)$$

Za dati proces, V_A je proporcionalno izabranjoj dužini kanala MOSFET-a. Kako bi se „izolovao“ uticaj dužine kanala, može se zapisati:

$$V_A = V_A' L \quad (1.6)$$

gdje je V_A' u potpunosti tehnološki parametar. Tipične vrijednosti ovog parametra su od 5 V/ μm do 50 V/ μm . Ovaj napon se obično označava kao *Early*-jev napon, prema analogiji sa bipolarnim tranzistorima.



slika 1.6 Uticaj napona v_{DS} na struju i_D u oblasti zasićenja. Parametar MOSFET-a V_A zavisi od tehnologije, i za dati proces je proporcionalan dužini kanala L .

Relacija (1.4) ukazuje da, kada se uzme u obzir modulacija dužine kanala, struja u zasićenju zavisi od napona v_{DS} . Dakle, za dati napon v_{GS} , promjena napona v_{DS} za Δv_{DS} dovodi do promjene struje drejna za

Δi_D . Slijedi da izlazna otpornost MOSFET-a (strujnog izvora, koji daje struju i_D) više nije konstantna. Definišući ovu otpornost r_o kao:

$$r_o = \left[\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right]_{v_{GS} \text{ constant}}^{-1} \quad (1.7)$$

i koristeći relaciju (1.4) dobija se:

$$r_o = \left[\lambda \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tn})^2 \right]^{-1} \quad (1.8)$$

što se može zapisati na sljedeći način:

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D'} \quad (1.9)$$

ili kao:

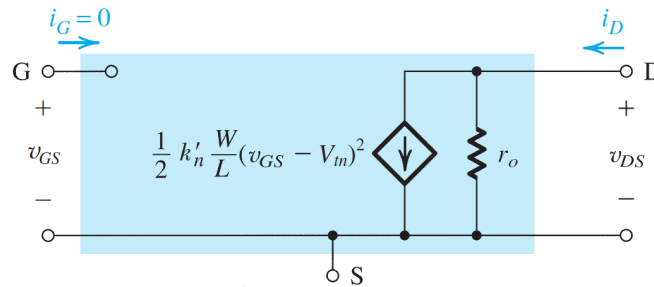
$$r_o = \frac{V_A}{I_D'} \quad (1.10)$$

gdje je I_D' struja drejna ukoliko se ne uzme u obzir modulacija dužine kanala:

$$I_D' = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tn})^2 \quad (1.11)$$

Znači da je izlazna otpornost inverzno proporcionalna struji drejna MOSFET-a.

Na slici 1.7 je prikazan model MOSFET-a koji uključuje izlaznu otpornost r_o .



slika 1.7 Model za „velike“ signale n-kanalnog MOSFET-a u zasićenju koji sadrži izlaznu otpornost r_o .

1.4 Body efekat

U mnogim primjenama priključak za sors se vezuje za podlogu (*body*), što rezultira nultom polarizacijom pn spoja između podloge i indukovano kanala. U ovoj situaciji ne postoji nikakav uticaj podloge na rad kola.

Međutim, podloga je veoma često zajednička za veliki broj MOSFET-ova na istom čipu i obično je povezana na najniži potencijal u kolu za n-kanalne MOSFET-ove, odnosno za najviši potencijal u kolu za p-kanalne MOSFET-ove. Rezultujući napon inverzne polarizacije između sorsa i podloge (V_{SB} za n-kanalne MOSFET-ove) će uticati na rad uređaja. Posmatrajmo n-kanalni MOSFET kod koga je podloga na nižem potencijalu od sorsa. Napon inverzne polarizacije će dovesti do širenja oblasti prostornog tovara, što redukuje dimenzije kanala. Kako bi se kanal „vratio“ u svoje početno stanje, potrebno je povećati napon v_{GS} . Uticaj napona V_{SB} na kanal MOSFET-a se najbolje može predstaviti preko napona praga V_t . Pokazuje se da se povećanjem napona V_{SB} povećava napon praga V_t prema sljedećoj relaciji:

$$V_t = V_{t0} + \gamma \left[\sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f} \right] \quad (1.12)$$

pri čemu je V_{t0} napon praga za $V_{SB} = 0$, dok je ϕ_f fizički parametar, pri čemu $2\phi_f$ iznosi obično oko 0.6 V, dok je γ parametar proizvodnog procesa dat relacijom:

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_S}}{C_{ox}} \quad (1.13)$$

gdje je q elementarno naelektrisanje, N_A je *doping* koncentracija podloge p-tipa, dok je $\epsilon_S = 11.7\epsilon_0$ dielektrična konstanta silicijuma. Parametar γ ima dimenziju $\sqrt{V}$ i obično iznosi oko $0.4 \sqrt{V}$ za n-kanalni MOSFET.

Relacija (1.12) ukazuje da inkrementalna promjena napona V_{SB} dovodi do inkrementalne promjene napona praga V_t , što rezultira inkrementalnom promjenom struje i_D i kad je napon v_{GS} konstantan. Slijedi da napon podloge kontroliše struju i_D . Podloga se ponaša kao „drugi gejt“ MOSFET-a, a fenomen se označava kao *body* efekat. Parametar γ je poznat kao *body-effect* parametar.

1.5 Uticaj temperature

I napon praga V_t i parametar k' su temperaturno zavisni. Apsolutna vrijednost napona praga opada oko 2 mV pri povećanju temperature za 1°. Opadanjem napona praga dolazi do povećanja struje drejna. Međutim, kako k' opada sa temperaturom, i taj uticaj dominira, struja drejna opada sa povećanjem temperature.

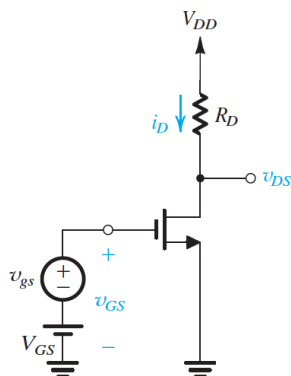
1.6 Zasićenje brzine (*velocity saturation*)

Pri jakim električnim poljima, *drift* brzina nosilaca naelektrisanja u kanalu dostiže svoj maksimum. Ovaj efekat, koji se kod modernih uređaja sa veoma kratkim kanalom dešava pri naponu v_{DS} manjem od 1 V, se označava kao zasićenje brzine. Pokazuje se da, kada dođe do zasićenja brzine, struja drejna više ne zavisi od napona v_{GS} prema kvadratnom modelu. Naime, struja i_D postaje linearno zavisna od napona v_{GS} , dok transkonduktansa g_m postaje konstantna i nezavisna od napona v_{GS} .

2 MOSFET KAO POJAČAVAČ

2.1 Small-signal rad i modeli MOSFET-a

Posmatra se konceptualno pojačavačko kolo prikazano na slici 2.1. MOSFET je polarisan jednosmjernim naponom V_{GS} , dok je signal koji se pojačava v_{gs} superponiran polarizacionom naponu V_{GS} . Izlazni napon je napon na drejnu.



slika 2.1 Konceptualno kolo za analizu MOSFET-a kao *small-signal* pojačavača.

DC polarizacija

Polarizaciona struja I_D se može naći izjednačavanjem napona v_{gs} sa nulom:

$$I_D = \frac{1}{2} k_n (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k_n V_{OV}^2 \quad (2.1)$$

pri čemu je zanemarena modulacija dužine kanala MOSFET-a. Napon na drejnu MOSFET-a će biti:

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D \quad (2.2)$$

Kako bi se obezbijedilo zasićenje, potrebno je da napon V_{DS} bude veći od napona V_{OV} .

Dalje, kako ukupan napon na drejnu, osim jednosmjerne V_{DS} komponente, sadrži i naizmjeničnu komponentu v_{ds} , potrebno je da napon V_{DS} bude dovoljno veći od napona V_{OV} , najmanje onoliko, koliko iznosi amplituda izlaznog napona.

Izlazna struja

Razmatra se situacija kada se primijeni napon v_{gs} na ulaz kola. Ukupan napon na ulazu kola će biti:

$$v_{GS} = V_{GS} + v_{gs} \quad (2.3)$$

što rezultira ukupnom strujom drejna:

$$i_D = \frac{1}{2} k_n (V_{GS} + v_{gs} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k_n (V_{GS} - V_t)^2 + k_n (V_{GS} - V_t) v_{gs} + \frac{1}{2} k_n v_{gs}^2 \quad (2.4)$$

Prvi član na desnoj strani relacije (2.4) je DC polarizaciona struja. Drugi član predstavlja komponentu struje koja je direktno proporcionalna ulaznom signalu v_{gs} . Treći član je komponenta struje koja je proporcionalna kvadratu ulaznog signala v_{gs} . Posljednja komponenta nije poželjna, jer predstavlja nelinearnu distorziju. Kako bi se redukovalo izobličenje izlaznog signala, koje unosi MOSFET, ulazni signal je potrebno da bude dovoljno mali, tj. potrebno je da važi:

$$\frac{1}{2} k_n v_{gs}^2 \ll k_n (V_{GS} - V_t) v_{gs} \quad (2.5)$$

odnosno:

$$v_{gs} \ll 2(V_{GS} - V_t) = 2V_{OV} \quad (2.6)$$

Ukoliko je uslov za male signale ispunjen, relacija (2.6), izlazna struja se može zapisati kao:

$$i_D = I_D + i_d \quad (2.7)$$

gdje je

$$i_d = k_n(V_{GS} - V_t)v_{gs}$$

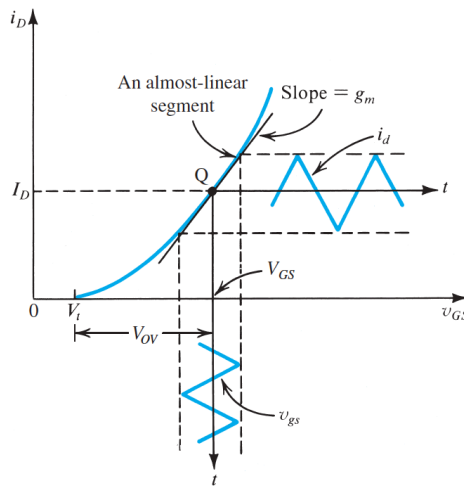
Parametar koji povezuje struju i_d i napon v_{gs} se označava kao transkonduktansa MOSFET-a g_m :

$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}} = k_n(V_{GS} - V_t) = k_n V_{OV} \quad (2.8)$$

Slika 2.2 predstavlja grafičku interpretaciju *small-signal* operacije MOSFET-a kao pojačavača. Treba uočiti da je transkonduktansa jednaka nagibu $i_D - v_{GS}$ karakteristike u tački polarizacije:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{GS}=V_{GS}} \quad (2.9)$$

Na osnovu relacije (2.9) može se doći do relacije (2.8).



slika 2.2 *Small-signal* operacija MOSFET pojačavača.

Naponsko pojačanje

Ukupan napon na izlazu kola, prikazanog na slici 2.1, dat je izrazom:

$$v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D = V_{DD} - R_D (I_D + i_d) = V_{DS} - R_D i_d \quad (2.10)$$

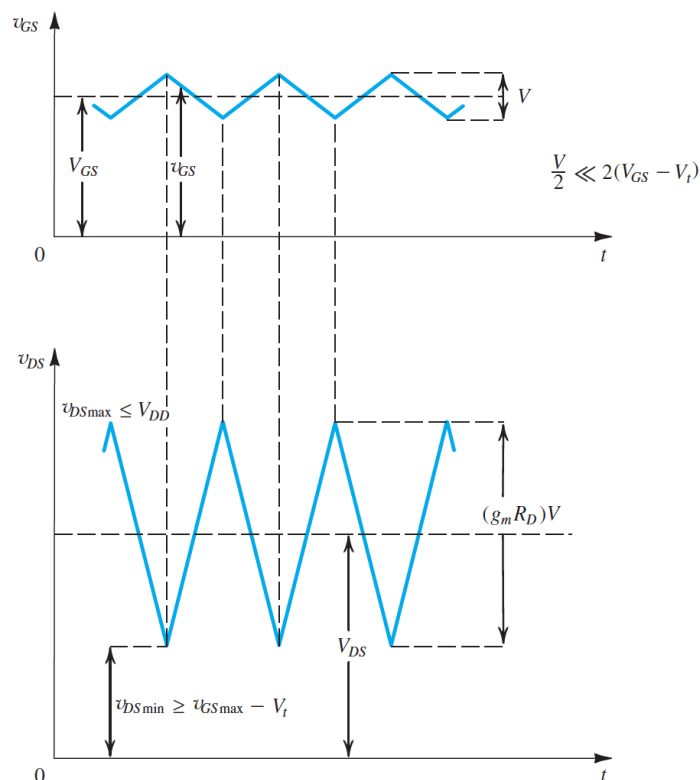
Slijedi da je *small-signal* izlazni napon:

$$v_{ds} = -R_D i_d = -g_m R_D v_{gs} \quad (2.11)$$

što znači da je naponsko pojačanje kola:

$$A_v = \frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m R_D \quad (2.12)$$

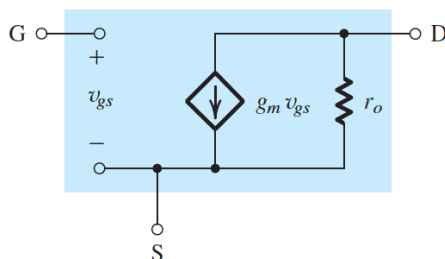
Znak minus označava da su ulazni i izlazni napon u protivfazi, što je između ostalog, ilustrovano slikom 2.3. Ulazni signal je trougaonog talasnog oblika i amplituda mu je mnogo manja od $2(V_{GS} - V_t)$, što osigurava linearan rad. Kako bi MOSFET bio u zasićenju, minimalna vrijednost napona v_{DS} ne smije biti manja od odgovarajućeg napona v_{GS} za više od V_t . Takođe, maksimalna vrijednost napona v_{DS} treba da bude manja od V_{DD} , kako MOSFET ne bi prestao da provodi.



slika 2.3 Naponi v_{GS} i v_{DS} za kolo prikazano na slici 2.1.

Model za male signale MOSFET-a

MOSFET se ponaša kao naponom kontrolisan strujni izvor. Ulazni napon između gejta i sorsa v_{gs} daje struju $g_m v_{gs}$ na drejnu. Ulazna otpornost ovog naponom kontrolisanog strujnog izvora je veoma velika - idealno beskonačna. Izlazna otpornost, odnosno, otpornost gledano sa strane drejna je, takođe, veoma velika. Na slici 2.4 je prikazan model za male signale MOSFET-a.



slika 2.4 Model za male signale MOSFET-a.

Važno je uočiti da parametri modela za male signale g_m i r_o zavise od DC polarizacije MOSFET-a. Na osnovu modela za male signale prikazanog na slici 2.4, za kolo prikazano na slici 2.1 dobija se da je naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m (R_D \parallel r_o) \quad (2.13)$$

što znači da konačna izlazna otpornost MOSFET-a redukuje pojačanje.

Transkonduktansa g_m

Na osnovu relacije (2.8), uzimajući u obzir da je $k_n = k'_n \frac{W}{L}$, dobija se da je transkonduktansa g_m :

$$g_m = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = k'_n \frac{W}{L} V_{OV} \quad (2.14)$$

Ova relacija ukazuje da je transkonduktansa proporcionalna procesnom transkonduktansnom parametru $k'_n = \mu_n C_{ox}$ i odnosu (W/L) MOSFET-a. Dakle, da bi se dobila veća vrijednost transkonduktanse, uređaj mora imati kraći i širi kanal. Takođe se može uočiti da je za dati uređaj transkonduktansa proporcionalna naponu $V_{OV} = V_{GS} - V_t$. Međutim, povećanjem napona V_{GS} u cilju povećavanja transkonduktanse, dolazi do redukovanja naponskog opsega na izlazu kola.

Transkonduktansa MOSFET-a se može zapisati i na sljedeći način:

$$g_m = \sqrt{2k'_n \frac{W}{L} I_D} \quad (2.15)$$

Na osnovu prethodne relacije može se zaključiti sljedeće:

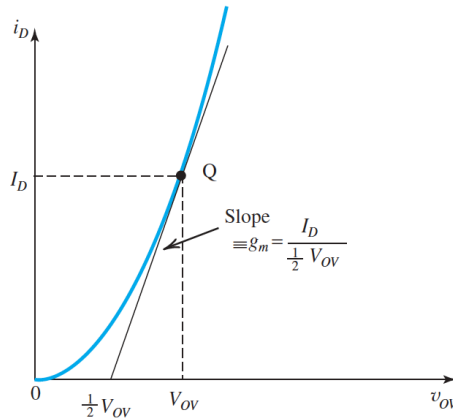
- Za dati MOSFET, transkonduktansa je proporcionalna kvadratnom korijenu polarizacione struje I_D .
- Za datu polarizacionu struju transkonduktansa je proporcionalna kvadratnom korijenu odnosa (W/L) .

Još jedan način izražavanja transkonduktanse MOSFET-a:

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t} = \frac{2I_D}{V_{OV}} \quad (2.16)$$

Na slici 2.5 je prikazana zavisnost struje i_D od napona v_{OV} , koja ilustruje prethodnu relaciju. Naime, tangenta krive u tački polarizacije siječe v_{OV} osu u tački $(V_{OV}/2)$, što znači da je nagib ove tangente jednak transkonduktansi MOSFET-a.

Dakle, postoje tri relacije na osnovu kojih se može odrediti transkonduktansa g_m MOSFET-a (2.14), (2.15) i (2.16), kao i tri parametra (W/L) , V_{OV} i I_D od kojih se po dva mogu izabrati nezavisno. Na primjer, može se izabrati napon V_{OV} i određena struja I_D , zatim je potrebno naći zahtijevani odnos (W/L) i odrediti transkonduktansu.

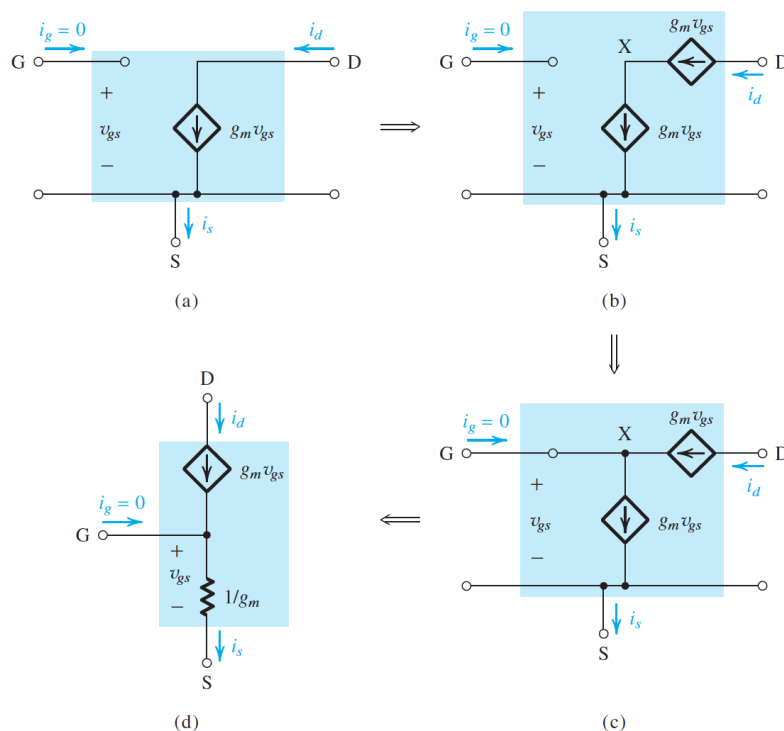


slika 2.5 $i_D - v_{OV}$ karakteristika i određivanje transkonduktanse MOSFET-a.

T model za male signale MOSFET-a

Uz pomoć jednostavnih transformacija kola moguće je razviti alternativni model za male signale MOSFET-a. Razvoj takvog modela, poznatog kao T model je ilustrovan slikom 2.6. Na slici 2.6(a) prikazan je osnovni model. Na slici 2.6(b) je dodat drugi $g_m v_{gs}$ strujni izvor na red sa originalnim kontrolisanim strujnim izvorom. Ovaj dodatni izvor očigledno nema nikakvog uticaja na kolo. Uvedeni čvor X je povezan za gejtu, slika 2.6(c). Struja gejta se na ovaj način ne mijenja, ostaje jednaka nuli pa ova veza ne utiče na kolo. Sada se može uočiti da je naponom kontrolisan strujni izvor vezan paralelno sa kontrolnim naponom v_{gs} . Ovaj izvor se može zamijeniti otpornikom koji daje istu struju kao i strujni

izvor. Dakle, potrebno je da otpornost uvedenog otpornika u modelu bude $(1 / g_m)$. Na slici 2.6(d) je prikazan konačan T model za male signale MOSFET-a. Zbog jednostavnosti, izlazna otpornost r_o MOSFET-a je izostavljena.

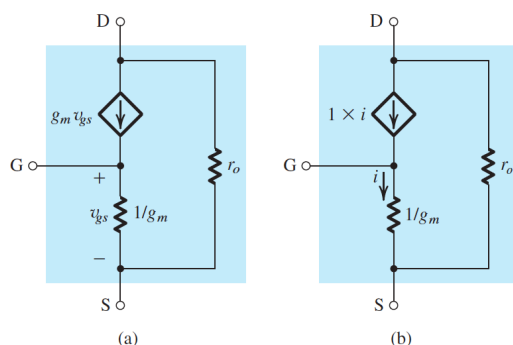


slika 2.6 Razvoj T modela za male signale MOSFET-a. Zbog jednostavnosti, otpornost r_o je izostavljena i može se dodati između drejna i sorsa ekvivalentnog T modela.

Model prikazan na slici 2.6(d) pokazuje da je otpornost između gejta i sorsa, gledano od strane sorsa, jednaka $(1 / g_m)$. U mnogim primjenama je ovo veoma korisno zapažanje. Otpornost između gejta i sorsa, gledano od strane gejta, je beskonačna.

Na slici 2.7(a) je prikazan T model koji sadrži i otpornost r_o . Alternativna reprezentacija T modela kod koga je strujni izvor zamijenjen strujom kontrolisanim strujnim izvorom, prikazan je na slici 2.7(b).

Konačno, treba napomenuti da se model prikazan na slici 2.4 označava kao hibridni π model.



slika 2.7 (a) T model MOSFET-a koji sadrži i otpornost r_o . (b) Alternativna reprezentacija T modela.

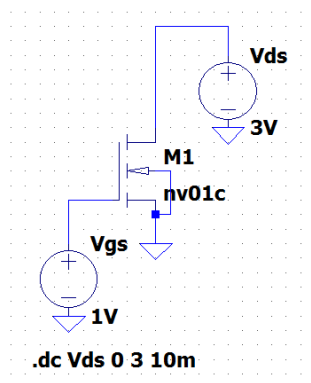
Literatura

- A. S. Sedra, K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th edition, Oxford University Press, 2015.
B. Razavi, *Fundamentals of Microelectronics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2014

VJEŽBA

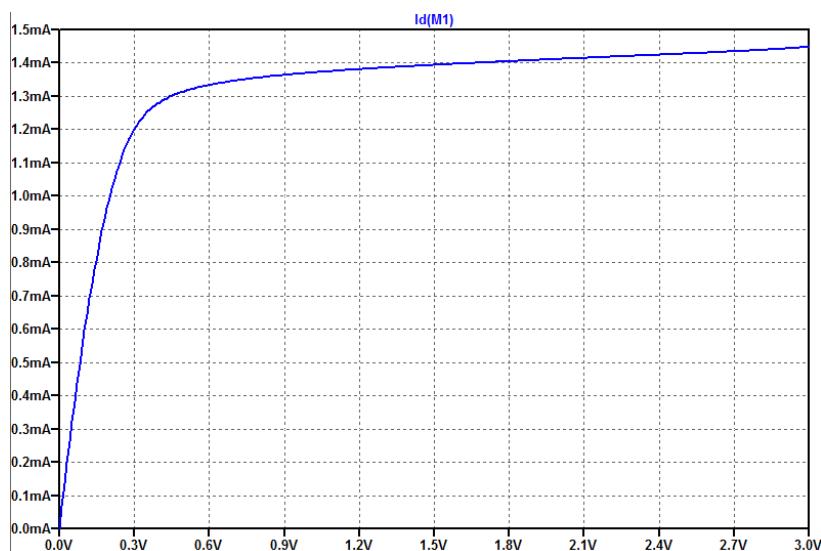
1 Strujno-naponske karakteristike MOSFET-a

- Izvršiti simulaciju strujno naponske karakteristike MOSFET-a $i_D - v_{DS}$, za napon $v_{GS} = 1$ V i opseg napona drejn-sors $0 < v_{DS} < 3$ V, sa korakom 1 mV, slika 1.1. Dimenzije MOSFET-a su $(W/L) = (100 \mu\text{m} / 1 \mu\text{m})$.



slika 1.1

Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.2.



slika 1.2

- Odrediti izlaznu otpornost r_o MOSFET-a za napon $v_{DS} = 1.5$ V kao i parametar V_A' .

Nagib strujno – naponske karakteristike $i_D - v_{DS}$ u tački polarizacije je mjera izlazne otpornosti MOSFET-a. Ukoliko se izabere uzak region oko $v_{DS} = 1.5$ V (1.495 V do 1.505 V), izlazna otpornost bi bila:

$$r_o = 0.01 \text{ V} / [i_D(v_{DS} = 1.505 \text{ V}) - i_D(v_{DS} = 1.495 \text{ V})],$$

što iznosi približno 25.64 k Ω .

Na slici 1.3 je prikazana tangenta t_I u tački (1.5 V, $i_D(v_{DS} = 1.5 \text{ V})$), kao i postupak određivanja izlazne otpornosti. Tangenta t_I se može zapisati kao:

$$t_I(v_{DS}) = (v_{DS} - 1.5 \text{ V})/r_o + i_D(v_{DS} = 1.5 \text{ V})$$

Iz presjeka tangente t_I i v_{DS} ose može se odrediti *Early*-jev napon:

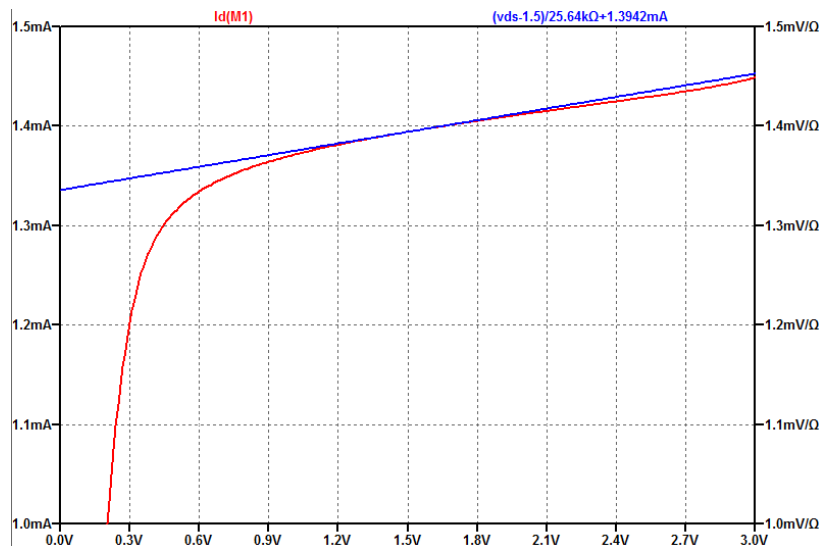
$$V_A = -(1.5 \text{ V} - r_{oD}(v_{DS} = 1.5 \text{ V})) = 34.25 \text{ V}$$

Kako je dužina kanala $L = 1 \text{ } \mu\text{m}$, parametar V_A' iznosi $34.25 \text{ V} / \mu\text{m}$.

```
.meas DC Id1 FIND Id(M1) WHEN Vds=1.495
.meas DC Id2 FIND Id(M1) WHEN Vds=1.5
.meas DC Id3 FIND Id(M1) WHEN Vds=1.505
```

SPICE error log

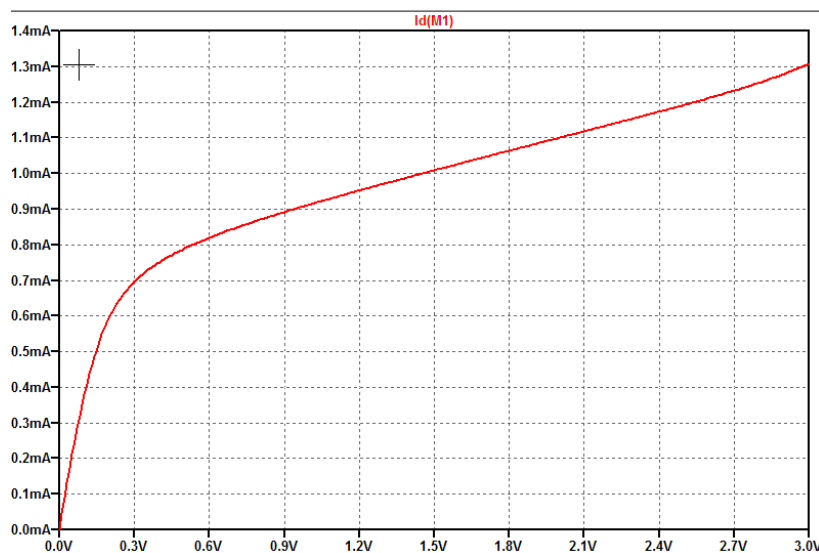
```
id1: id(m1)=0.001394 at 1.495
id2: id(m1)=0.0013942 at 1.5
id3: id(m1)=0.00139439 at 1.505
```



slika 1.3

- Promijeniti dimenzije MOSFET-a ($W/L = (35 \text{ } \mu\text{m} / 0.35 \text{ } \mu\text{m})$).

Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.4.

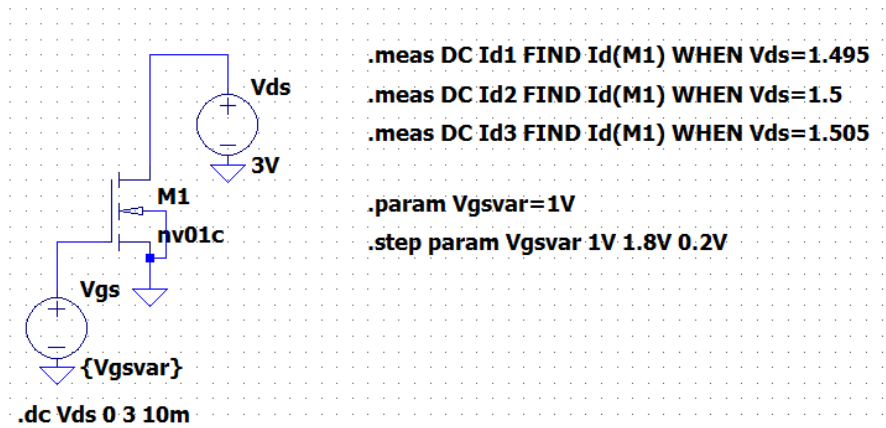


slika 1.4

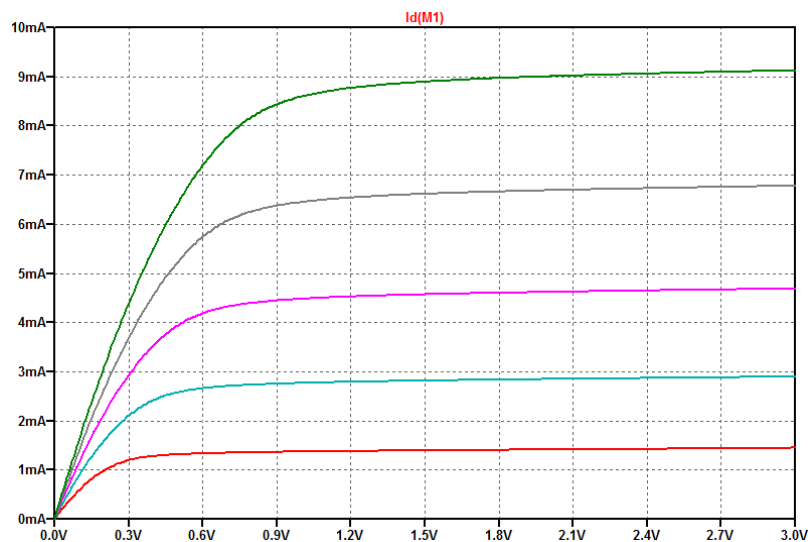
Iako je odnos širina / dužina kanala ostao nepromijenjen, strujno – naponska karakteristika se razlikuje iz razloga što uticaj modulacije dužine kanala postaje značajnije izražen za manje dužine kanala MOSFET-a. **Kako se promijenila izlazna otpornost MOSFET-a?**

- Izvršiti parametarsku analizu kola prikazanog na slici 1.1, pri čemu je parametar napon gejt-sors koji ima vrijednosti: 1 V, 1.2 V, 1.4 V, 1.6 V i 1.8 V, za opseg napona drejn-sors $0 < v_{DS} < 3$ V, sa korakom 1 mV. Dimenzije MOSFET-a su $(W/L) = (100 \mu\text{m} / 1 \mu\text{m})$. **Kako se mijenja izlazna otpornost sa povećanjem struje MOSFET-a? Izračunati izlaznu otpornost MOSFET-a za svaku od vrijednosti napona gejt-sors.**

Odgovarajuća podešavanja za parametarsku analizu i rezultati simulacije prikazani su na slici 1.5.



(a)

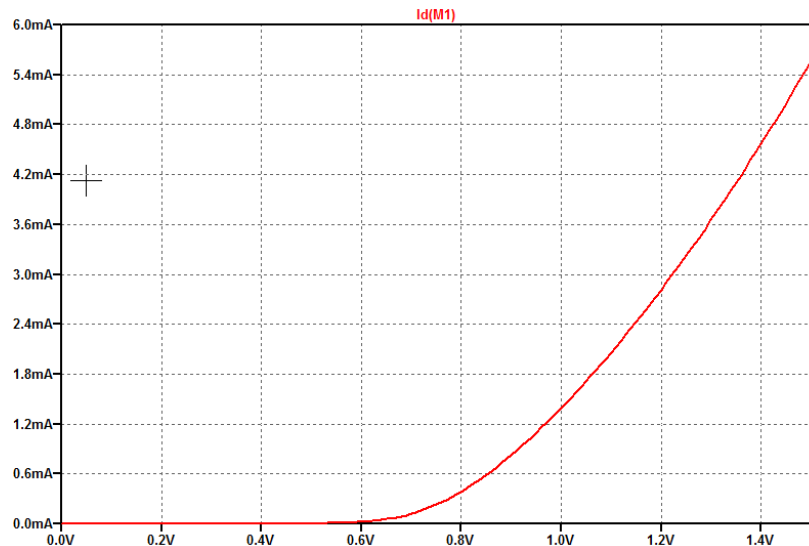


(b)

slika 1.5

- Izvršiti simulaciju strujno naponske karakteristike MOSFET-a $i_D - v_{GS}$, za napon $v_{DS} = 1.5$ V i opseg napona gejt-sors $0 < v_{GS} < 1.5$ V, sa korakom 1 mV, slika 1.1. Dimenzije MOSFET-a su $(W/L) = (100 \mu\text{m} / 1 \mu\text{m})$.

Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.6.



slika 1.6

- Odrediti transkonduktansu g_m MOSFET-a za napon $v_{GS} = 1$ V.

Nagib strujno – naponske karakteristike $i_D - v_{GS}$ u tački polarizacije je mjera transkonduktanse MOSFET-a. Ukoliko se izabere uzak region oko $v_{GS} = 1$ V (od 0.995 V do 1.005 V), transkonduktansa bi bila:

$$g_m = (i_D(v_{GS} = 1.005 \text{ V}) - i_D(v_{GS} = 0.995 \text{ V})) / 0.01 \text{ V},$$

što iznosi približno 6.192 mS.

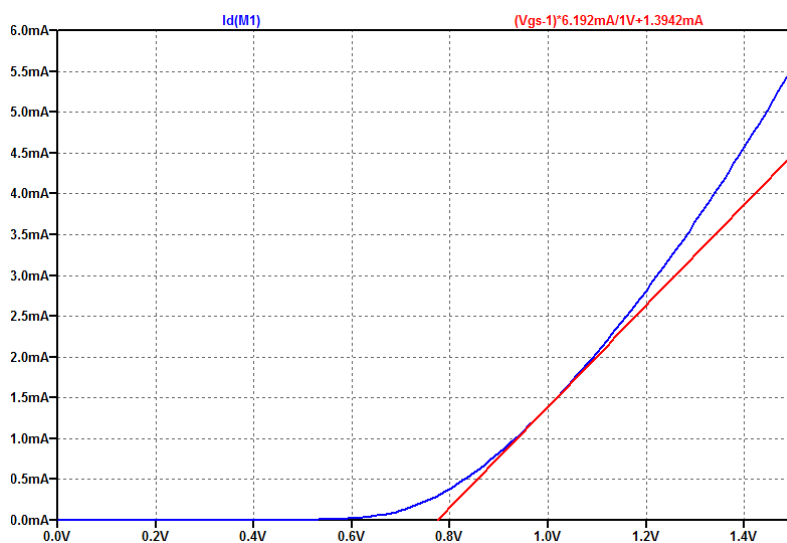
Na slici 1.7 je prikazana tangenta t_I u tački (1 V, $i_D(v_{GS} = 1 \text{ V})$), kao i postupak određivanja transkonduktanse. Tangenta t_I se može zapisati kao:

$$t_I(v_{GS}) = g_m \cdot (v_{GS} - 1 \text{ V}) + i_D(v_{GS} = 1 \text{ V})$$

```
.meas DC Id1 FIND Id(M1) WHEN Vgs=0.995
.meas DC Id2 FIND Id(M1) WHEN Vgs=1
.meas DC Id3 FIND Id(M1) WHEN Vgs=1.005
```

SPICE error log

```
id1: id(m1)=0.00136348 at 0.995
id2: id(m1)=0.0013942 at 1
id3: id(m1)=0.0014254 at 1.005
```



slika 1.7

- Odrediti transkonduktanski parametar k_n MOSFET-a za napon gejta sora 1 V.

Kako je veza između transkonduktanse g_m i transkonduktanskog parametra k_n MOSFET-a data sljedećim izrazom:

$$g_m = \sqrt{2k_n I_D}$$

transkonduktanski parametar k_n iznosi 13.75 mA / V².

Sa druge strane, kako je:

$$\sqrt{i_D} = \sqrt{\frac{k_n}{2}}(v_{GS} - V_t)$$

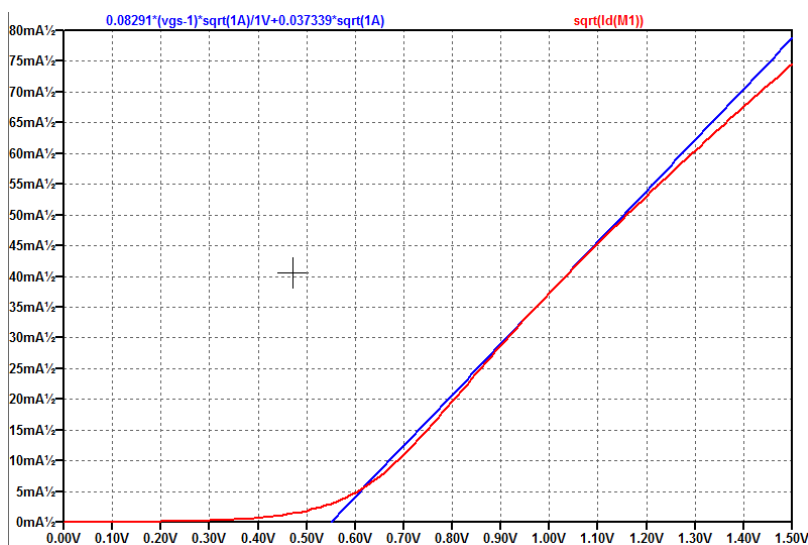
nagib karakteristike $\sqrt{i_D} - v_{GS}$ u tački polarizacije predstavlja faktor $\sqrt{k_n}/2$:

$$\sqrt{\frac{k_n}{2}} = \frac{\sqrt{i_D}(v_{GS}=1.005 \text{ V}) - \sqrt{i_D}(v_{GS}=0.995 \text{ V})}{0.01 \text{ V}} = 82.91 \text{ m}\sqrt{A}/V$$

Slijedi da transkonduktanski parametar k_n iznosi $2 \cdot (82.91 \text{ m}\sqrt{A}/V)^2 = 13.75 \text{ mA} / V^2$.

Na slici 1.8 prikazana je karakteristika $\sqrt{i_D} - v_{GS}$, tangenta u tački koja odgovara naponu $v_{GS} = 1 \text{ V}$, kao i postupak određivanja nagiba karakteristike za napon $v_{GS} = 1 \text{ V}$.

.meas DC Id1 FIND sqrt(Id(M1)) WHEN Vgs=0.995	SPICE error log
.meas DC Id2 FIND sqrt(Id(M1)) WHEN Vgs=1	id1: sqrt(id(m1))=0.0369254 at 0.995
.meas DC Id3 FIND sqrt(Id(M1)) WHEN Vgs=1.005	id2: sqrt(id(m1))=0.037339 at 1
	id3: sqrt(id(m1))=0.0377545 at 1.005



slika 1.8

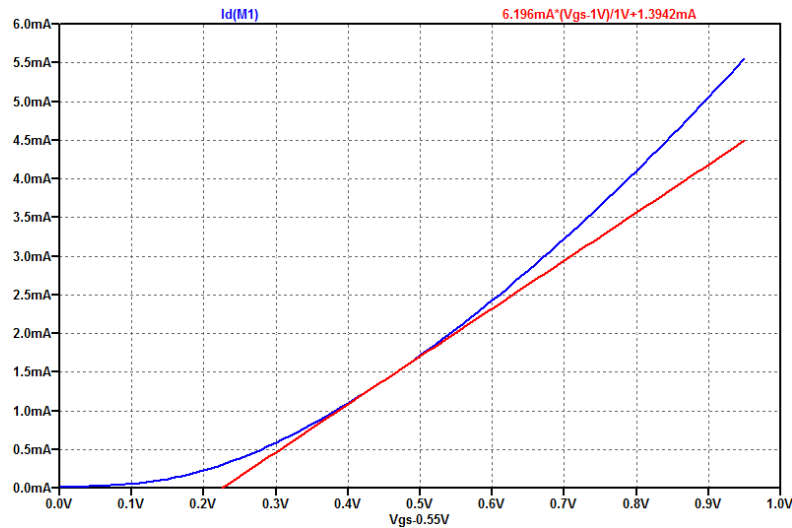
- Odrediti napon praga V_t MOSFET-a.

Napon praga V_t MOSFET-a se može odrediti kao presjek tangente u tački koja odgovara naponu $v_{GS} = 1 \text{ V}$ karakteristike $\sqrt{i_D} - v_{GS}$ i v_{GS} ose, slika 1.8. Vrijednost napona praga V_t MOSFET-a iznosi približno 0.55 V.

Na osnovu relacije (2.16) transkonduktansa MOSFET-a iznosi:

$$g_m = 2I_D / V_{OV} = 2 \cdot 1.3942 \text{ mA} / (1 \text{ V} - 0.55 \text{ V}) = 6.196 \text{ mS}$$

što se poklapa sa prethodno određenom vrijednošću. Na slici 1.9 prikazana je zavisnost struje drejna MOSFET-a od napona v_{OV} kao i tangenta u tački koja odgovara naponu $v_{GS} = 1\text{ V}$ ($V_{OV} = 0.45\text{ V}$). Može se uočiti da tangenta siječe v_{OV} osu u tački $v_{OV} = V_{OV}/2$.



slika 1.9

Ponoviti postupak određivanja transkonduktanse g_m , transkonduktanskog parametar k_n i napona praga V_t za dimenzije MOSFET-a ($70\mu\text{m}/0.7\mu\text{m}$), za istu vrijednost jednosmjerne struje.

Literatura

A. S. Sedra, K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th edition, Oxford University Press, 2015.
G. W. Roberts, A. S. Sedra, *Spice*, 2nd edition, Oxford University Press, 1997.