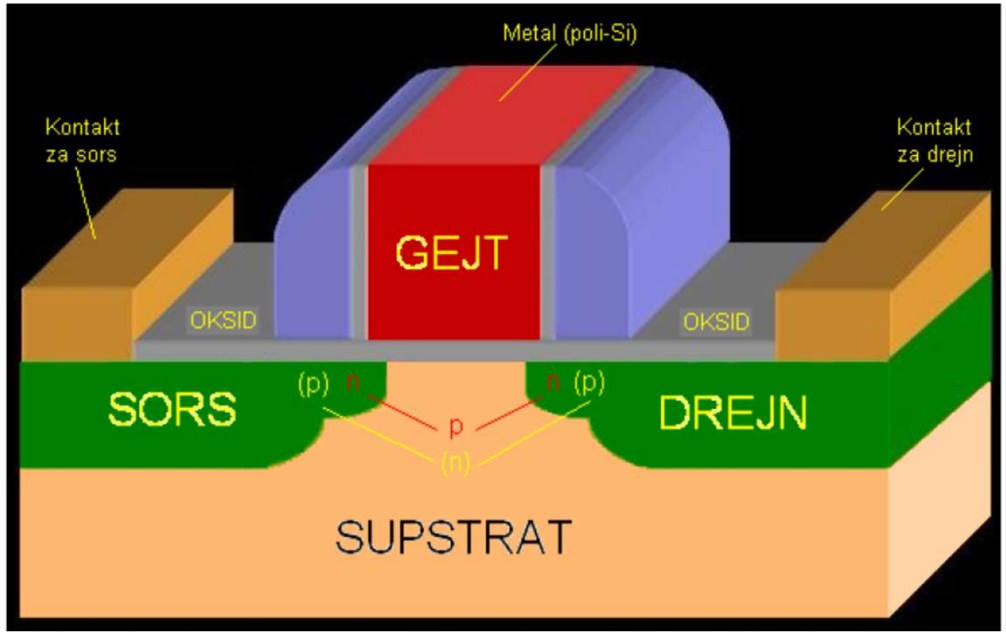
MOSFET tranzistori

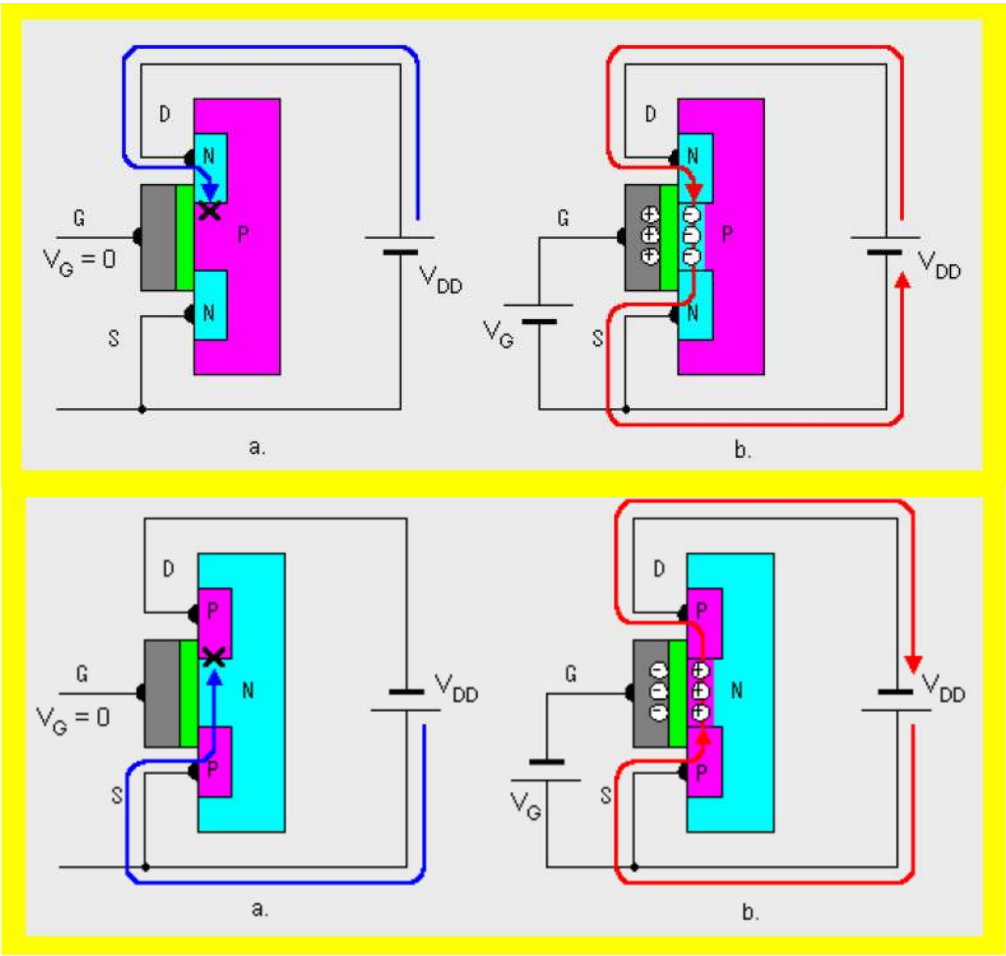
MOSFET tranzistor



FET (*Field effec transistor*) je skraćenica koja označava tranzistor sa efektom polja, odnosno transistor čiji se princip rada zasniva na dejstvu električnog polja. Ovaj tip tranzistora je unipolaran jer postoji samo jedna vrsta nosilaca naelektrisanja (šupljine ili elektroni).
MOSFET je najčešći tip FET-a čiji naziv upućuje na unutrašnju strukturu.
MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) je skraćenica koja znači metal, oksid (izolator), silicijum(poluprovodnik).

Model MOS tranzistora

Da se podsetimo



nMOS
Vodi za
$V_G > V_{tn}$

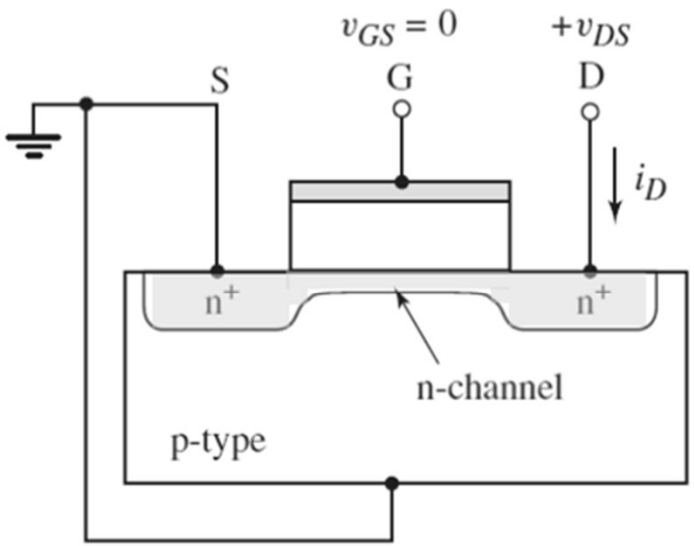
pMOS
vodi za
$V_G < V_{tp}$

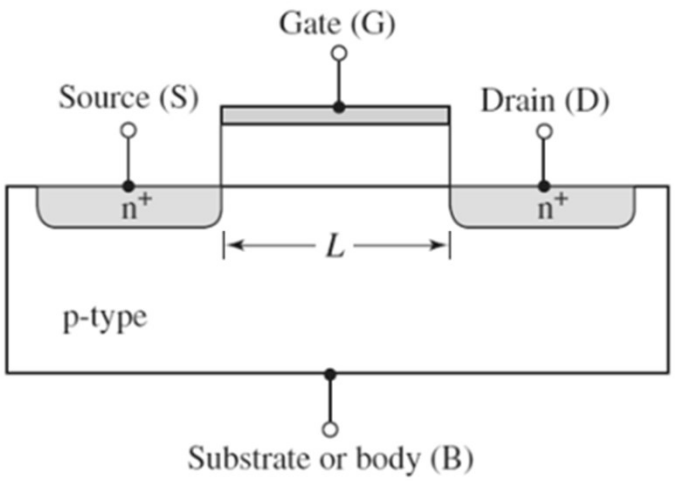
Kod n-kanalnog FET-a osnova je poluprovodnik p tipa, dok je kod p-kanalnog FET-a osnova poluprovodnik n tipa.

Sors (izvor) i **drejn** (odvod) su visoko dopirane oblasti u supstratu (bulk) MOSFET tranzistora koje služe kao terminali za ulazak i izlazak nosilaca naelektrisanja.

Pod dejstvom električnog polja izmedju gejta i osnove dolazi do **inverzije nosilaca nalektrisanja** (šupljina u elektrone kod n-kanalnog FETa; elektrona u šupljine kod p-kanalnog FETa) u oblasti koja povezuje sors i drejn. Najmanja vrednost napona između gejta i sorsa koja dovodi do inverzije nosilaca naelektrisanja naziva se napon praga provođenja V_t.

Model MOS tranzistora



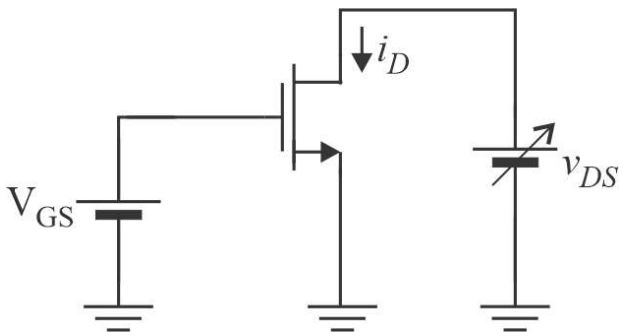


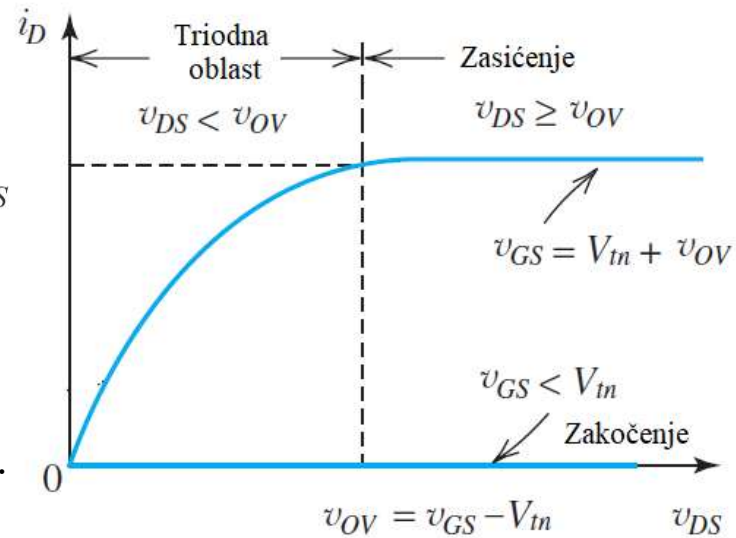
MOSFET sa ugrađenim kanalom

MOSFET sa indukovanim kanalom

Kod MOSFET-a sa ugrađenim kanalom izmedju sorsa i gejta postoji kanal (deo osnove sa istim tipom provodnosti kao gejt i sors) i kada nema električnog polja izmedju gejta i osnove.

Režimi rada n-kanalong MOSFET-a





V_{tn} je napon praga provođenja.

Kada je $v_{GS} < V_{tn}$ nije uspostavljen kanal izmedju gejta i sorsa i FET je **u režimu zakočenja**.

Ukoliko je $v_{GS} > V_{tn}$, protiče struja drejna i_D od drejna ka sorsu. Vrednost ove struje zavisi od napona v_{GS} i v_{DS}. Izlazna karakteristika daje zavisnost i_D od v_{DS} kada je v_{GS} konstantan.

Na izlaznoj karakteristici se mogu izdvojiti dve oblati:

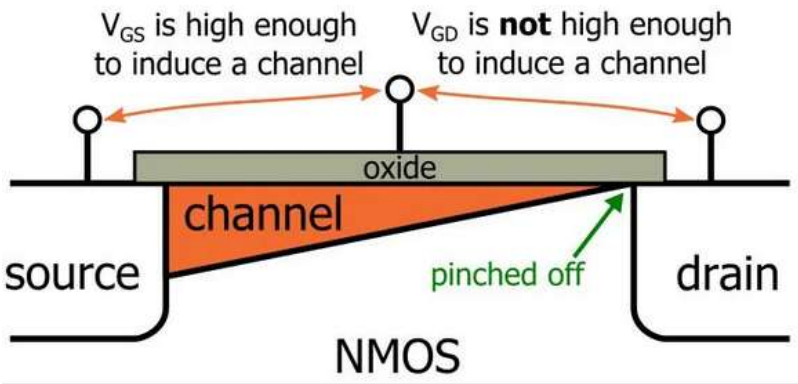
- **triodna oblast** za $v_{DS} < v_{OV}$,
- **oblast zasićenja** $v_{DS} > v_{OV}$

Gde je $v_{OV} = v_{GS} - V_{tn}$ napon uštinuća kanala

Napon uštinuća kanala (pinch-off voltage) je najmanji napon v_{DS} pri kome je kanal zatvoren kod drejna jer kada je: $v_{DS} \geq v_{OV} = v_{GS} - V_{tn}$ sledi da je $v_{GD} \leq V_{tn}$. Ova nejednačina nam govori da je napon izmedju gejta i drejna nedovoljan da izvrši inverziju nosilaca, odnosno da je kod drejna zatvoren kanal.

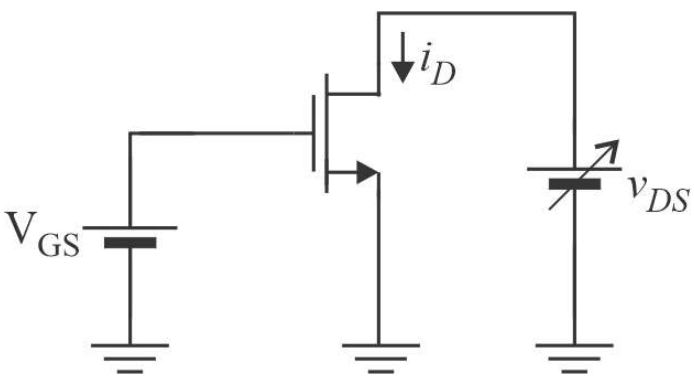
Ukoliko je $v_{DS} > v_{GS} - V_{tn}$ kanal ostaje zatvoren, pri čemu struja ne zavisi od napona v_{DS} već samo od napona v_{GS}.

Model MOS tranzistora



Kada je napon između gejta i drejna manji ili jednak naponu praga prvodjenja, $v_{GD} \leq V_{tn}$, električno polje u neposrednoj okolini drejna nije dovoljno jako da formira inverziju nosilaca naelektrisanja. Tada u ovoj oblasti nema slobodnih elektrona. Bez obzira na činjenicu da je kanala prekinut kod drejna, elektroni će nastaviti da se kreću duž kanala od sorsa ka drejnu pod dejstvom horizontalnog električnog polja (koje nastaje pod dejstvom v_{DS}). Nakon što elektroni prodju kroz kanal i dodju do drejna oni usled dejstva električnog polja preleću preko oblasti gde nema slobodnih nosilaca naelektrisanja.

Režimi rada n-kanalong MOSFET-a



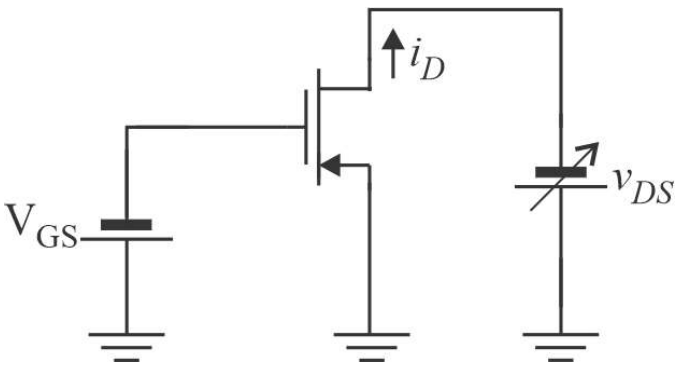
Kod FET-a postoje tri režima rada zavisno od vrednosti napona na ulazu v_{GS}i napona na izlazu v_{DS}:

- Zakočenje (ne teče struja drejna, i_D)
- Triodna oblast (struja drejna zavisi od v_{GS} i v_{DS})
- Zasićenje (struja drejna zavisi samo od v_{GS})

V_{tn} je napon praga provođenja.

Režimi rada MOSFET		V_{GS}	V_{DS}
Zakočenje		$v_{GS} < V_{tn}$	
Vodi	Zasićenje	$v_{GS} > V_{tn}$	$v_{DS} > v_{GS} - V_{tn} = V_{OV}$
	Omska oblast (triodna oblast)	$v_{GS} > V_{tn}$	$v_{DS} < v_{GS} - V_{tn} = V_{OV}$

Režimi rada p-kanalong MOSFET-a

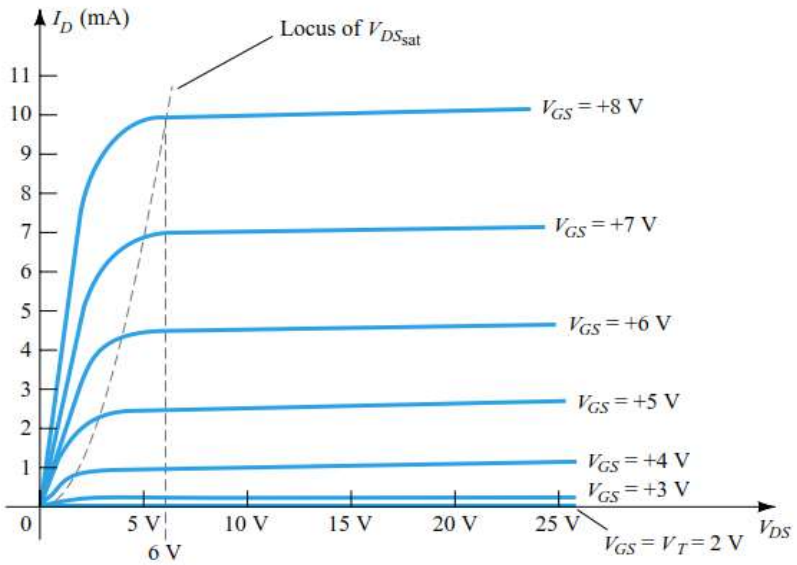


Jednosmerna struja drejna p-kanalnog MOSFETA teče od sorsa ka drejnu jer su nosioci nalektrisanja šupljine. Polariteti napona na pristupima tranzistora su suprotni u odnosu na one koji se koriste kod n-kanalnog FET-a.

V_{tp} je napon praga provođenja p-kanalnog MOSFET-a.

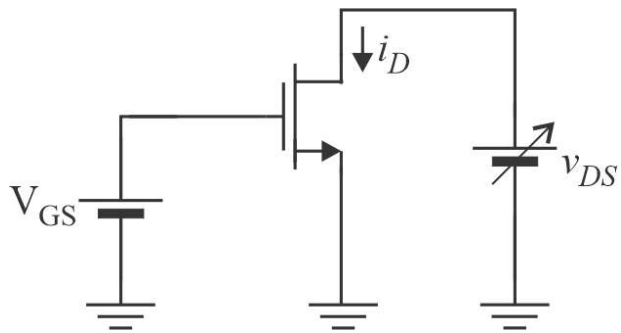
Režimi rada MOSFET		V_{GS}	V_{DS}
	Zakočenje	$v_{GS} > V_{tp}$	
Vodi	Zasićenje	$v_{GS} < V_{tp}$	$v_{DS} < v_{GS} - V_{tp} = V_{OV}$
	Omska oblast (triodna oblast)	$v_{GS} < V_{tp}$	$v_{DS} > v_{GS} - V_{tp} = V_{OV}$

Izlazna karakteristika MOSFET-a



Izlazna karakteristika je zavisnost struje drejna od napona između drejna i sorsa pri konstantnom naponu između gejta i sorsa.

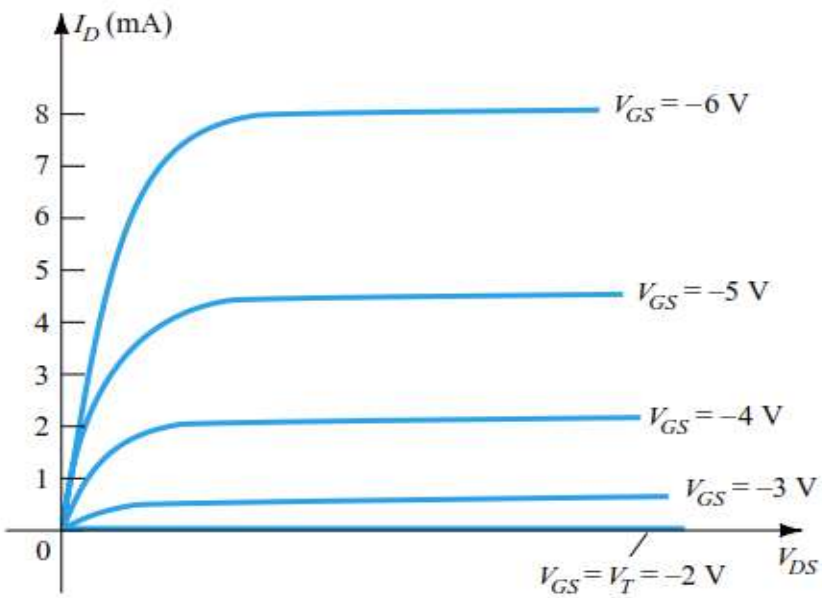
$$i_D = f(v_{DS})|_{v_{GS} = const}$$



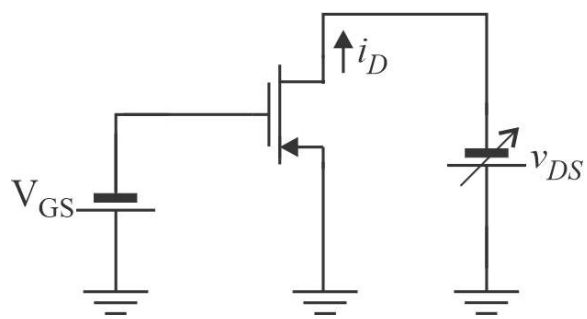
Kod n-kanalnog MOSFET-a struja drejna raste sa porastom ulaznog napona v_{GS}.
Iz familije karakteristika se može videti da ne postoji linearna zavisnost struje drejna od napona v_{GS}.

Izlazna karakteristika MOSFET-a

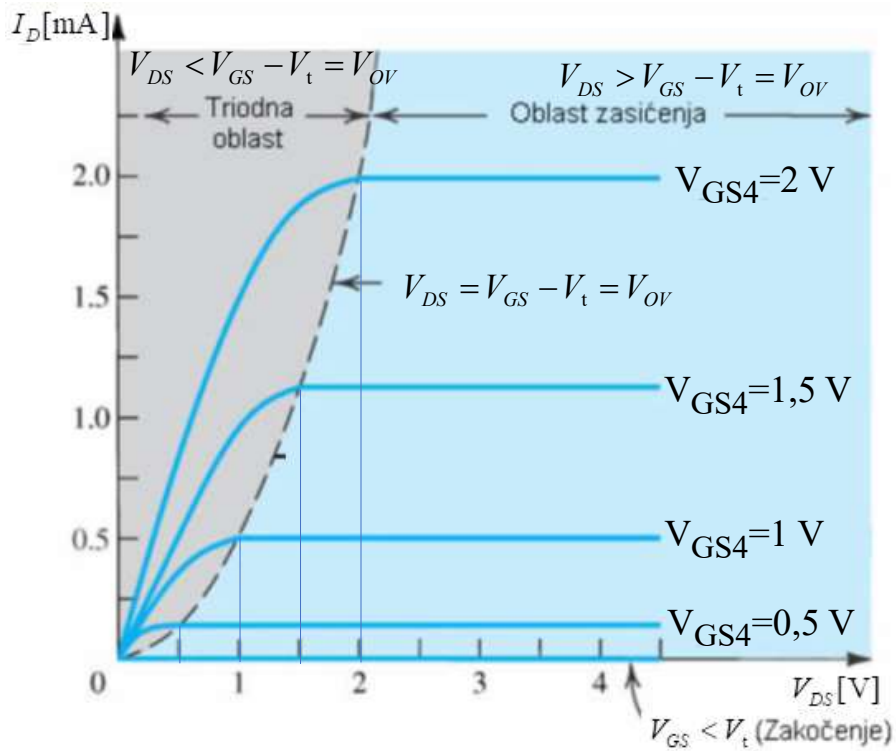
Kod p-kanalnog MOSFET-a polaritet napona je suprotna u odnosu na n-kanalni FET $v_{GS} < 0$, $v_{DS} < 0$. Struja drejna se povećava sa smanjenjem napona v_{GS} (povećanjem negativne vrednosti napona). Napon između drejna i sorsa je negativan.



$$i_D = f(v_{DS})|_{v_{GS} = const}$$

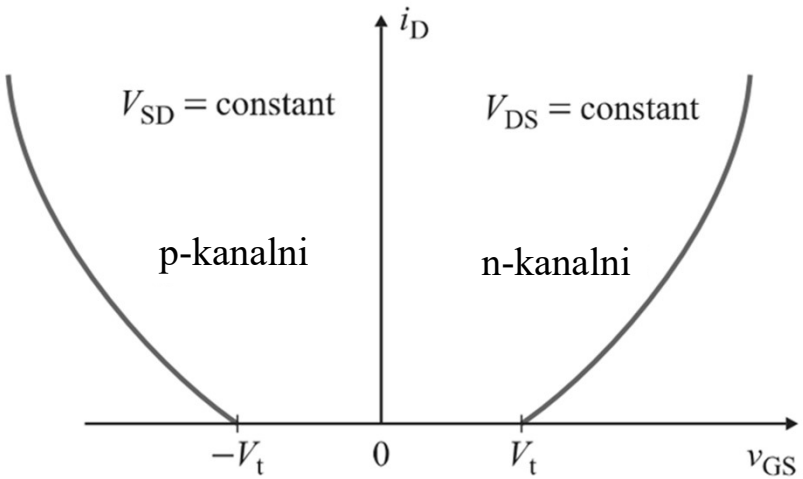


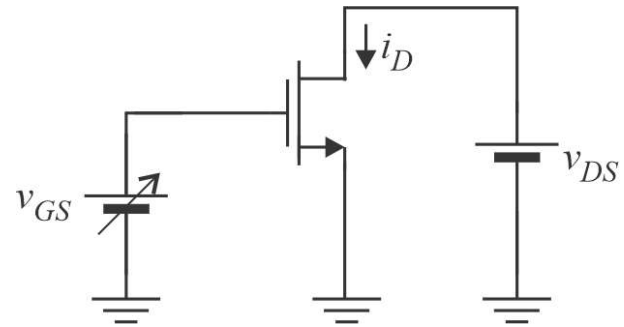
Izlazne karakteristike MOSFET-a



U polju izlaznih karakteristika MOSFET-a mogu se prikazati oblasti koje odgovaraju pojedinim režimima rada.

Prenosna karakteristika MOSFET-a





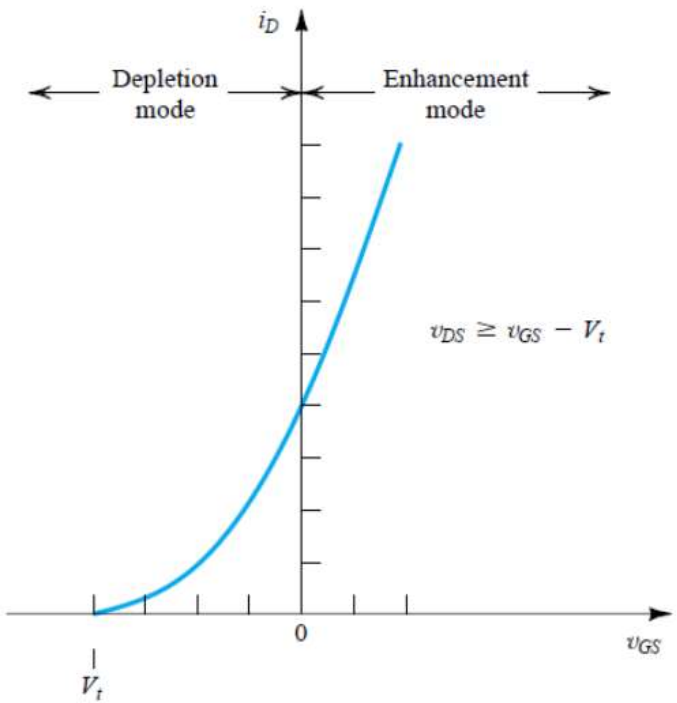
Prenosna karakteristika je zavisnost struje drejna od napona između gejta i sorsa pri konstantnom naponu između drejna i sorsa.

$$i_D = f(v_{GS})|_{v_{DS} = const}$$

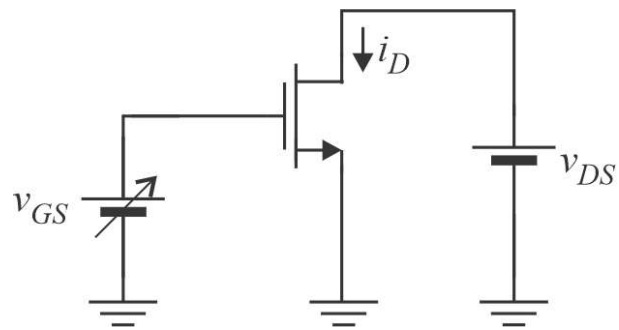
Kod n-kanalnog MOSFET-a struja drejna raste sa porastom ulaznog napona v_{GS} (desna karakteristika).
Kod p-kanalnog MOSFET-a je obrnuto, struja drejna raste što je negativniji napon v_{GS} (leva karakteristika).
Na slici su prikazane prenosne karakteristike **MOSFET tranzistora sa indukovanim kanalima**. To je tranzistor za koji važi $V_{tn} > 0$.

Prenosna karakteristika MOSFET-a

Prenosna karakteristika n-kanalnog **MOSFET-a sa ugrađenim kanalom**. Kod ove komponente napon praga provođenja, V_{tn}, je negativan $V_{tn} < 0$.



$$i_D = f(v_{GS})|_{v_{DS} = const}$$



Kada je napon v_{GS} negativan kaže se da je tranzistor u osiromašenom modu, a kada je pozitivan da je u obogaćenom modu rada.

Činjenica da je napon praga n-kanalnog tranzistora negativan znači da tranzistor ima ugrađen kanala, odnosno da između drejna i sorsa postoji oblast n-tipa.

Strujno naponske zavisnosti za MOSFET

Strujno naponska karateristika u triodnoj oblasti:

$$i_D = k_n{}' \frac{W}{L}\left[(v_{GS} - V_t)\cdot v_{DS} - \frac{1}{2}\, v_{DS}{}^2\right]$$

Strujno naponska karateristika u oblasti zasićenja:

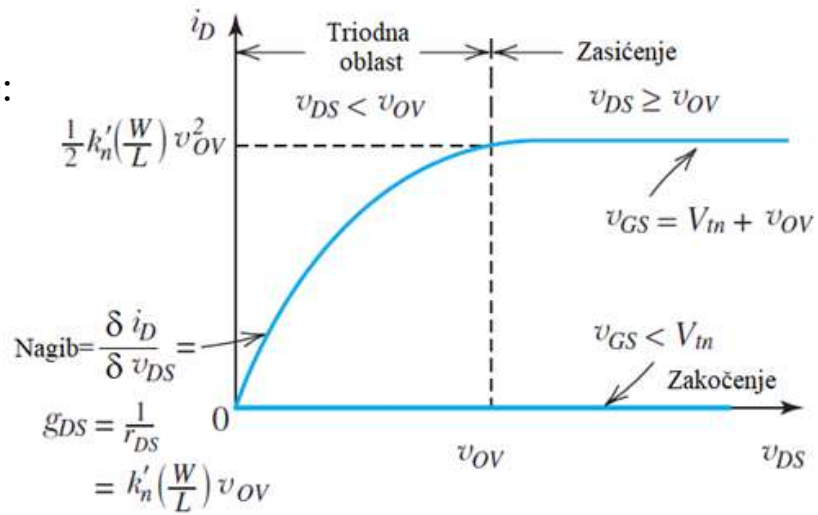
$$i_D = \frac{1}{2}\, k_n{}' \frac{W}{L}(v_{GS} - V_t)^2$$

Zavisnost i_D od v_{DS} nije linearna ali se za male vrednosti napona drejn sors može aproksimirati linearnom zavisnošću. Kada je:

$$v_{DS} \ll v_{GS} - V_t$$

$$i_D \approx k_n' \frac{W}{L}(v_{GS} - V_t)\cdot v_{DS}$$

U ovoj oblasti tranzistor se ponaša kao otpornik kontrolisan naponom.



$$k_n' = \mu_n \cdot C_{ox}$$

k_n' je tehnološki parametar

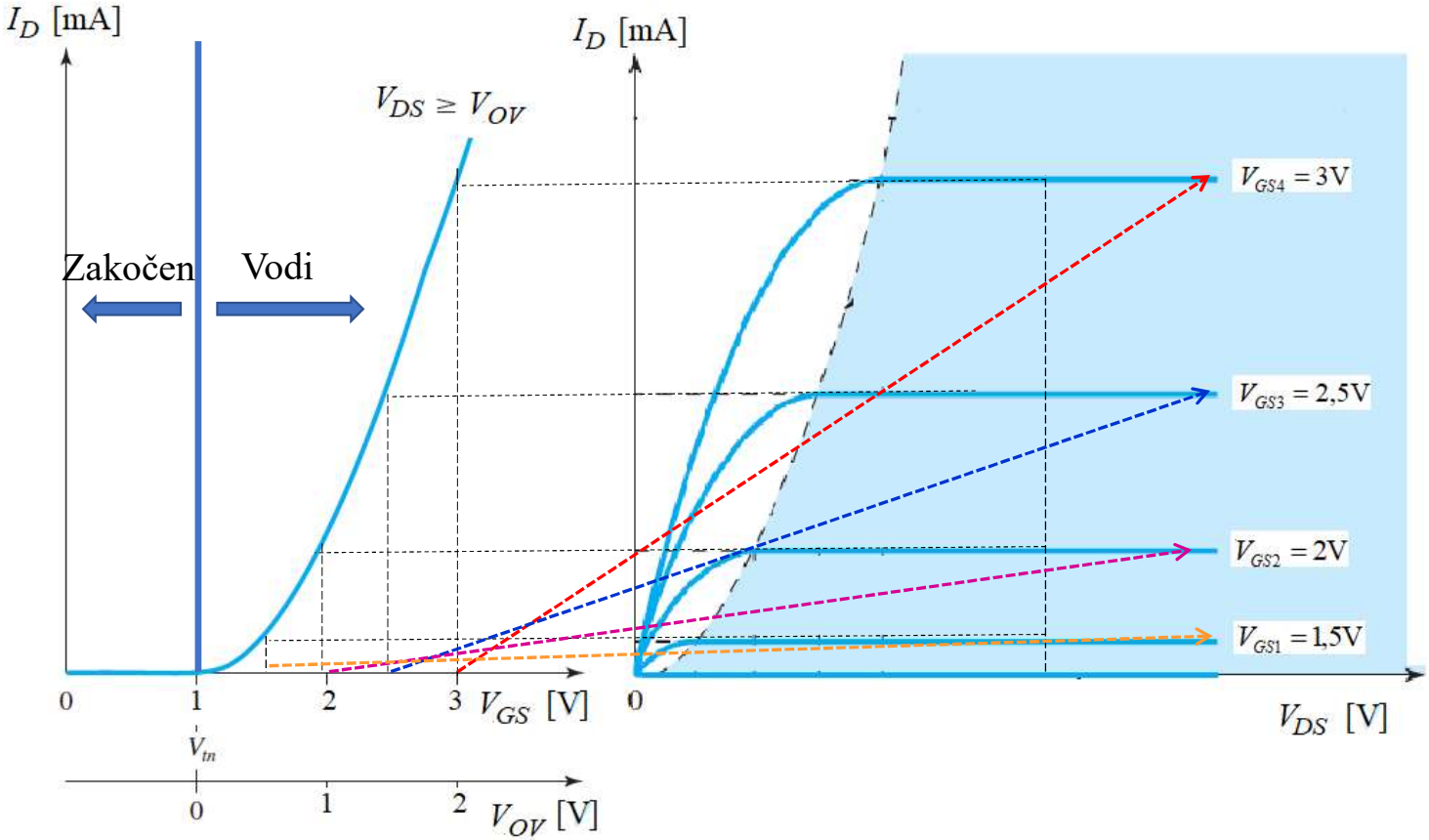
C_{ox} je kapacitivnost gejta po jedinici površine

μ_n je pokretljivost nosilaca naelektrisanja (kod n-kanalnih tranzistora pokretljivost elektrona, kod p-kanalnih šupljina)

W je širina kanala

L je dužina kanala

Da se podsetimo: Prenosna karakteristika MOSFET-a

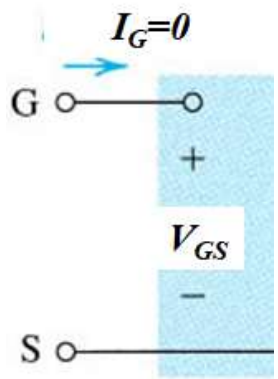


Model za velike signale - DC model u oblasti zasićenja

S obzirom da je gejt odvojen oksidom (izolatorom) od kanala između drejna i sorsa struja gejta je jednaka nuli.

$$I_G = 0$$

U modelu se gejt prikazuje kao priključak na kome nema struje.



Model za velike signale - DC model u oblasti zasićenja

U režimu zasićenja struja drejna zavisi od V_{GS} i zanemarljivo zavisi od V_{DS}.

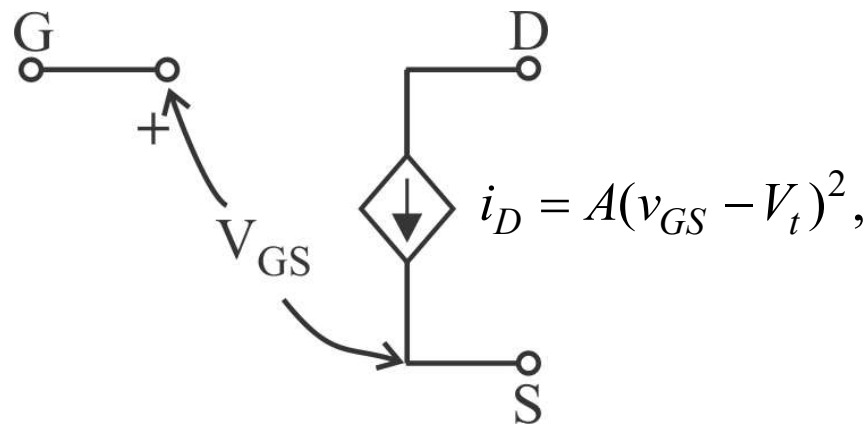
Važi za: $v_{GS} > V_t$
$v_{DS} > v_{GS} - V_t$

$$i_D = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}(v_{GS} - V_t)^2,$$

$$i_D = \frac{1}{2}k_n{}'\frac{W}{L}(v_{GS} - V_t)^2,$$

$$i_D = A(v_{GS} - V_t)^2,$$

Model:
NELINEARNI Strujni generator
I_D kontrolisan naponom V_{GS}



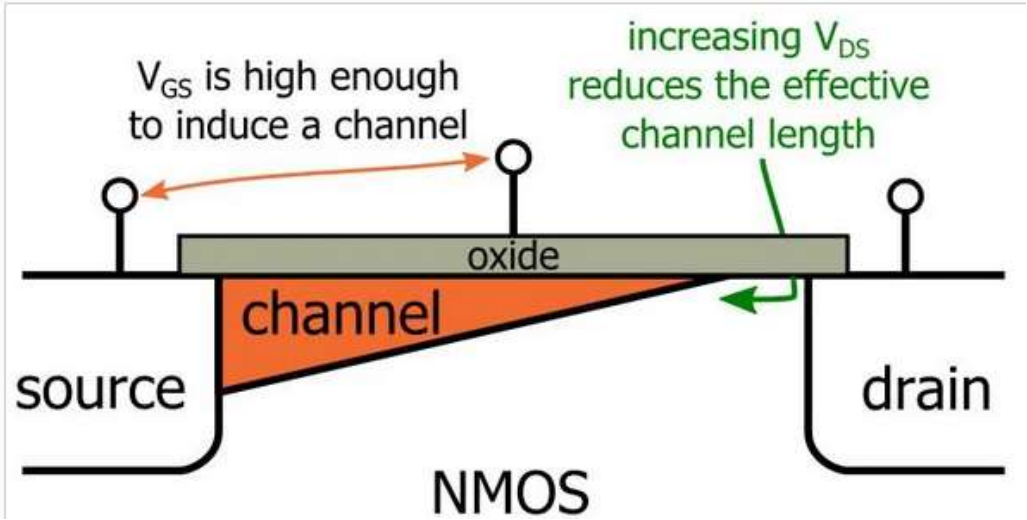
C_{ox} je kapacitivnost gejta po jedinici površine
μ_n je pokretljivost nosilaca naelektrisanja
W je širina kanala
L je dužina kanala
k_n' je tehnološki parametar koji zavisi od materijala (dimenzije A/V^2)

I_D ne zavisi od V_{DS}
I_D zavisi od V_{GS}

Modulacija dužine kanala

Prilikom povećanja napona v_{DS} dolazi do umanjenja efektivne dužine kanala, što prouzrokuje uvećanje struje drejna. Ova pojava zove se **modulacija dužine kanala**.

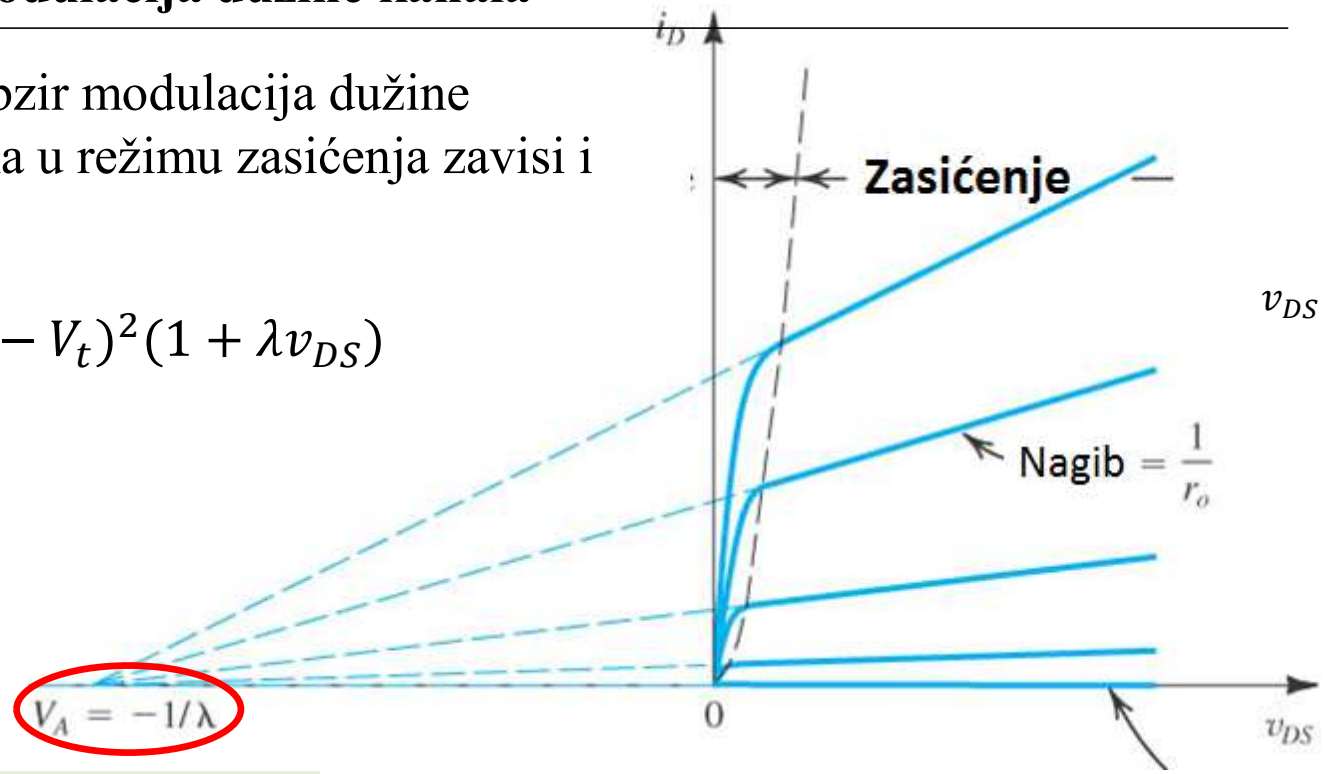
Kada je MOSFET u režimu zasićenja uticaj napona v_{DS} na struju drejna se najčešće može zanemariti. Ukoliko je signal takav da se napona v_{DS} menja u širokom opsegu onda se mora uzeti u obzir i uticaj ovog napona na struju drejna.



Modulacija dužine kanala

Kada se uzme u obzir modulacija dužine kanala struja drejna u režimu zasićenja zavisi i od v_{GS} i od v_{DS}.

$$i_D = A(v_{GS} - V_t)^2(1 + \lambda v_{DS})$$



$v_{DS} > v_{GS} - V_t$

$$i_D = A(v_{GS} - V_t)^2(1 + \frac{v_{DS}}{V_A})$$

$$V_A = \frac{1}{\lambda}$$

Efektivna dužine kanala zavisi od izlaznog napona v_{DS}. Kao posledica ove činjenice i struja drejna zavisi od napona v_{DS}.

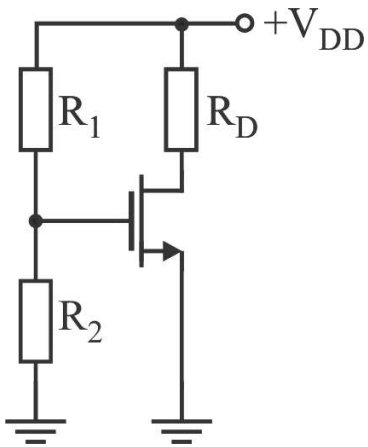
V_A je **Erlijev napon**

λ je **parameter modulacije dužine kanala**

Jednosmerni režim rada MOSFET-a

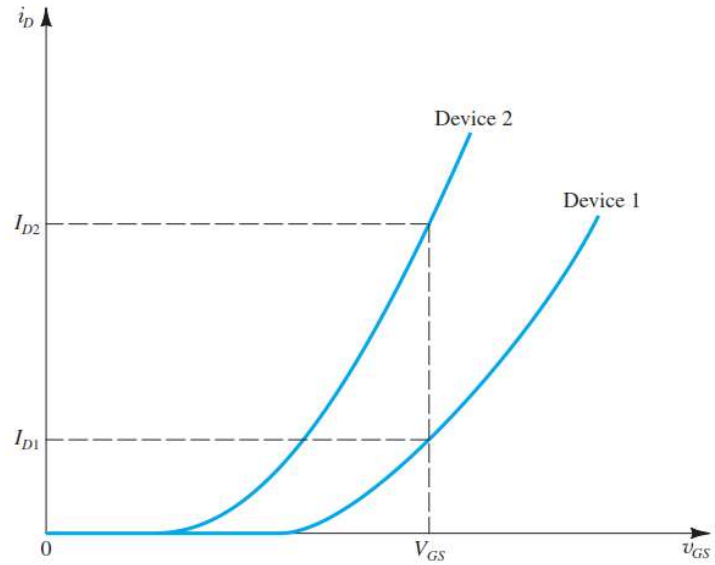
Polarizacija sa konstantnim naponom gejta

U ovom tipu polarizacije napon na gejtu, koji je jednak naponu V_{GS}, je odredjen razdelnikom napona (R_1 i R_2). Ovim tipom polarizacije nije obezbeđena stabilnost radne tačke. Struja drejna značajno će varirati ne samo zbog amibijentalnih uslova već i zbog tolerancije parametara. Vrednosti parametara tranzistora (A i V_t) sa istom fabričkom oznakom mogu značajno da variraju.



$$V_G = V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD}$$

$$I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 = A \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} - V_t \right)^2$$



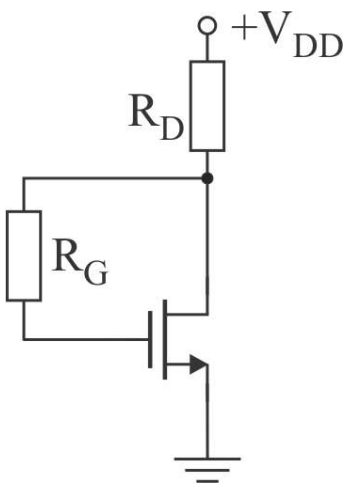
Jednosmerni režim rada MOSFET-a

Polarizacija tranzistora sa otpornikom između gejta i drejna

Ovaj tip polarizacije primenjiv je na MOSFET-ove sa indukovanim kanalom ($V_t > 0$). Kroz otpornik koji povezuje gejt i drejn ne teče struja tako da je potencijal gejta izjednačen sa potencijalom drejna, a samim tim je obezbeđeno da je tranzistor uvek u zasićenju ($V_{DS} > V_{GS} - V_t$). Preko otpornika R_G uspostavlja se povratna sprega koja stabilizuje radnu tačku tranzistora. Povratna sprega se može iskazati na sledeći način:

$$I_D \nearrow, V_D \searrow, V_G \searrow, V_{GS} \searrow, I_D \searrow$$

Povećanje struje drejna dovodi do većeg pada napona na otporniku R_D a samim tim i do smanjenja napona na gejtu. Usled smanjenja napona na gejtu smanjuje se i napon V_{GS} što ima za posledicu umanjenje struje drejna.



Jednosmerni režim za ovo kolo opisan je sledećim jednačinama

$$V_{GS} = V_D = V_{DD} - R_D I_D$$
$$I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

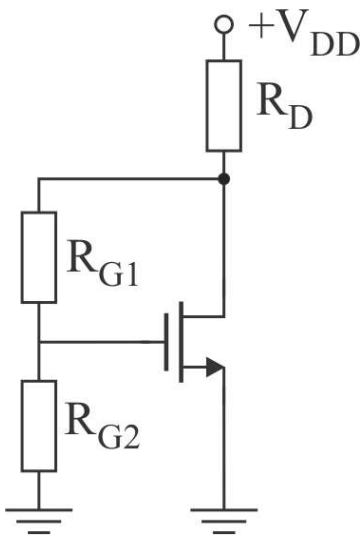
$$V_{GS} = V_{DD} - R_D \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

V_{GS} se određuje rešavanjem kvadratne jednačine pri čemu se uzima rešenje koje ima fizički smisao a to je $V_{GS} > V_t$

Jednosmerni režim rada MOSFET-a

Polarizacija tranzistora sa otpornikom između gejta i drejna

- Ukoliko je zbog linearnosti ili maksimalnog naizmeničnog napona na izlazu potrebno podesiti radnu tačku tako da $V_{DS} \neq V_{GS}$ uvodi se dodatni otpornik između gejta i mase R_{G2}. Na ovaj način V_{GS} će moći da se podešava nezavisno od napona V_{DS}.



$$V_{GS} = V_D \cdot \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$$
$$V_D = V_{DD} - R_D \cdot I_D$$
$$I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

$$R_D \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 + V_{GS}\left(\frac{R_{G1} + R_{G2}}{R_{G2}}\right) - V_{DD} = 0$$

V_{GS} se određuje rešavanjem kvadratne jednačine pri čemu se uzima rešenje koje ima fizički smisao a to je $V_{GS} > V_t$

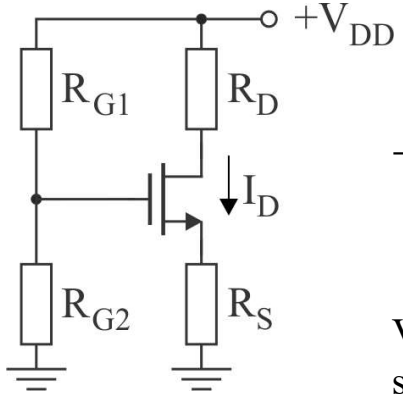
Jednosmerni režim rada MOSFET-a

Polarizacija sa četiri otpornika

Otpornikom R_S uspostavlja se povratna sprega koja stabiliše radnu tačku tranzistora. Ona deluje na takav način da umanjuje promene struje drejna usled spojnjih uticaja. Povećanje struje drejna dovodi do povećanja napona sorsa V_S, usled čega se smanjuje napon V_{GS} (jer je V_G konstantno) a samim tim i struja drejna.

$$I_D \nearrow, V_S \nearrow, V_{GS} \searrow, I_D \searrow$$

Razdelnikom napona R_{G1} i R_{G2} podešava se potencijal gejta nezavisno od struje drejna. Za ove otpornike se usvajaju vrlo velike vrednosti da nebi umanjili ukupno naponsko pojačanje i ulaznu otpornost.



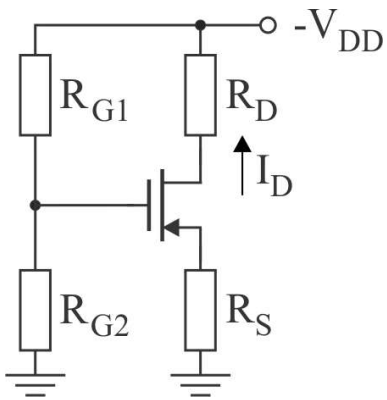
$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD}$$

$$V_S = R_S \cdot I_D$$

$$I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

$$R_S \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 + V_{GS} - \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} = 0$$

V_{GS} se određuje rešavanjem kvadratne jednačine pri čemu se uzima rešenje koje ima fizički smisao a to je $V_{GS} > V_t$



Jednosmerni režim rada MOSFET-a

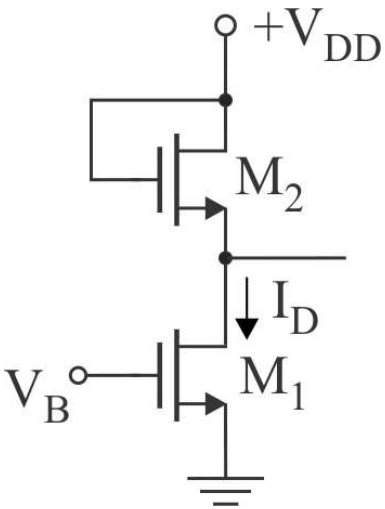
Polarizacija MOSFETA i integrisanim kolima

- Za polarizaciju FET-a u integrisanim kolima prihvatljivija je primena tranzistora umesto otpornika jer zauzimaju manju površinu čipa.
- Za pojačanje signala u integrisanim kolima se uglavnom koriste n-kanalni tranzistori jer daju veću struju pri istoj širini kanala zahvaljujući većoj pokretljivosti elektrona u odnosu na šupljine (μ_n=1350 cm^2/Vs, μ_p=480 cm^2/Vs).
- Smanjenje površine čipa ima poseban značaj za primene MOSFET-a kao prekidača. Manja površina znači manju vrednost parazitnih kapacitivnosti.
- U integrisanim kolima se uglavnom koriste MOSFET-ovi sa indukovanim kanalom ($V_t > 0$) jer je polarizacija ovih komponenata jednostavnija.

Jednosmerni režim rada MOSFET-a

Automatska polarizacija

- Ukoliko se kao dinamička otpornost koristi n-kanalni MOSFET **sa indukovanim kanalom** on se povezuje na taj način da su gejt i drejn međusobno povezani (M_2 na slici). S obzirom da za ovaj tranzistor važi $V_{DS} > V_{GS} - V_t$, on će uvek biti u režimu zasićenja.



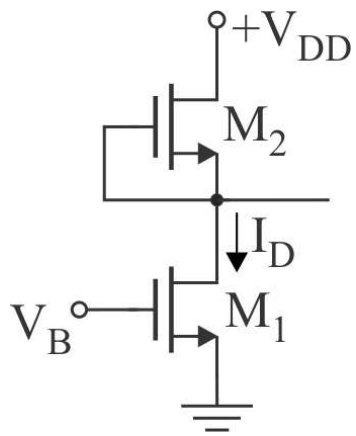
U naizmeničnom režimu transistor M_2 predstavlja dinamičku otpornost koja je približno jednaka recipročnoj vrednosti transkonduktanse $\frac{1}{g_{m2}}$.

Kada se tranzistor koristi kao **aktivno opterećenje** mora se voditi računa o opsegu ulaznog i izlaznog napona. Pri određenom izlaznom ili ulaznom naponu ovaj tranzistor može da izađe iz prvobitnog režima rada.

Jednosmerni režim rada MOSFET-a

Automatska polarizacija

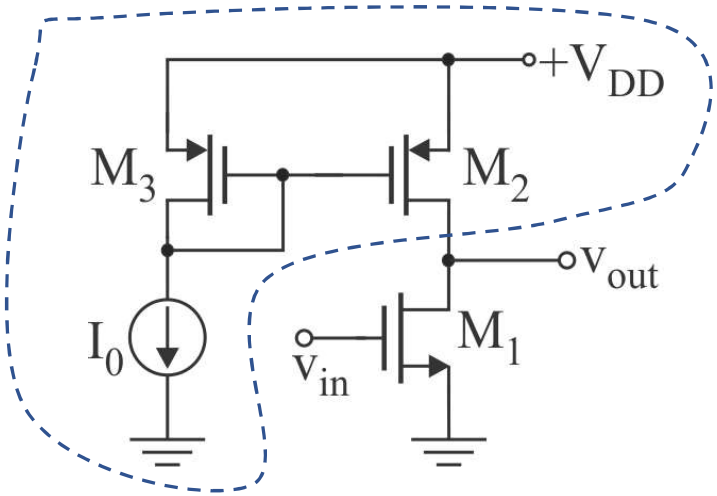
- Ukoliko se kao opterećenje koristi n-kanalni **mosfet sa ugrađenim kanalom,** M_2 on se povezuje u kolu na taj način što su gejt i sors međusobno povezani. U naizmeničnom režimu transistor M_2 predstavlja dinamičku otpornost koja je jednaka izlaznoj otpornosti tranzistora M_2, r_{o2}. Ovaj način polarizacije je bolji od prethodnog jer se sa njim dobija veća vrednost **dinamičke otpornosti** ($r_o \gg 1/g_m$). Pored toga u ovoj polarizacijii veći je opseg promene izlaznog napona za koji pojačavač radi u aktivnom režimu rada.

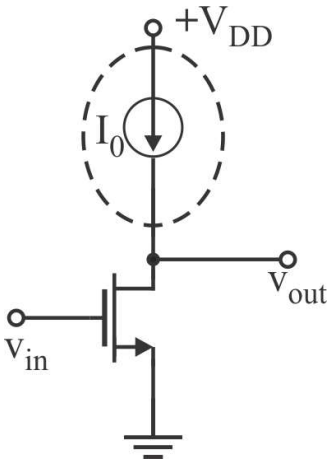


Jednosmerni režim rada MOSFET-a

Polarizacija izvorom konstantne struje

- Poboljšanje performansi pojačavača može se dobiti ukoliko se za pojačanje koristi n-kanalni tranzistor a kao opterećenje p-kanalni MOSFET. Kola u kojima se primenjuju oba tipa mosfeta nazivaju se CMOS kola (Complementary MOS).
- U komplementarnim mos pojačivačima kao pojačavač koristi se n-kanalni fet sa indukovanim kanalom (M1) a kao opterećenje strujno ogledalo sačinjeno od p-kanalnih FET-ova (M2, M3 i izvor konstantne struje I_0). Najjednostavnije rešenje je da se na mestu jednosmernog izvora struje I_0 koristi otpornik.





Uticaj temperature na rad MOSFET-a

I napon praga V_t i tehnološki parametar k' su temperaturno zavisni. Apsolutna vrednost napona praga opada oko 2 mV pri povećanju temperature za 1°. Opadanjem napona praga dolazi do povećanja struje drejna.

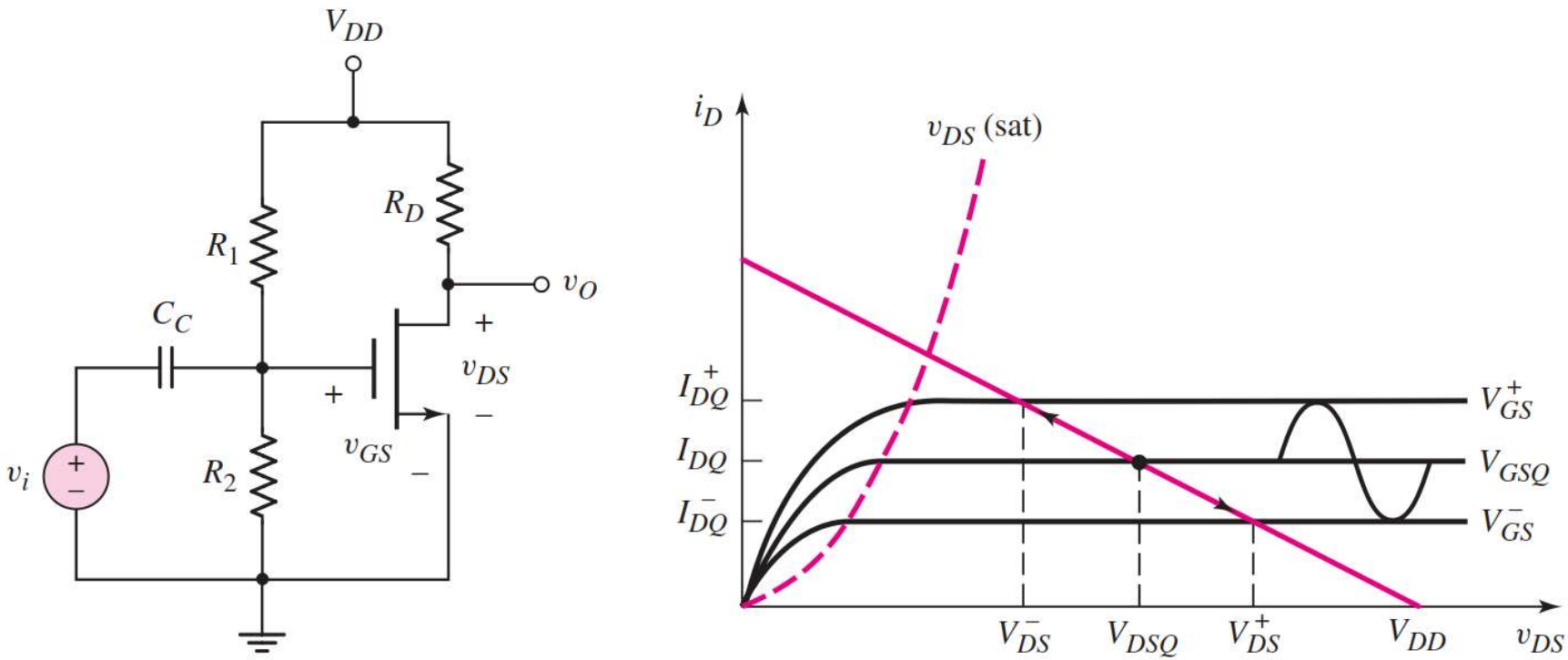
Transkonduktansni parametar k' opada sa temperaturom usled smanjenja pokretljivosti nosilaca naelektrisanja ($k'_n = \mu C_{ox}$). Smanjenje k' ima dominantan uticaj tako da struja drejna opada sa porastom temperature. Ovo umanjenje struje drejna doprinosi stabilnosti pojačavača.

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

$$T \nearrow \quad V_t \searrow \quad I_D \nearrow$$

$$T \nearrow \quad k_n' \searrow \quad I_D \searrow$$

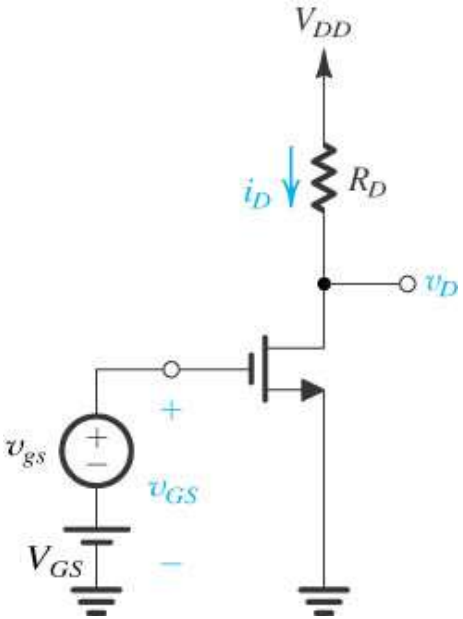
Modela za male signale u oblasti zasićenja

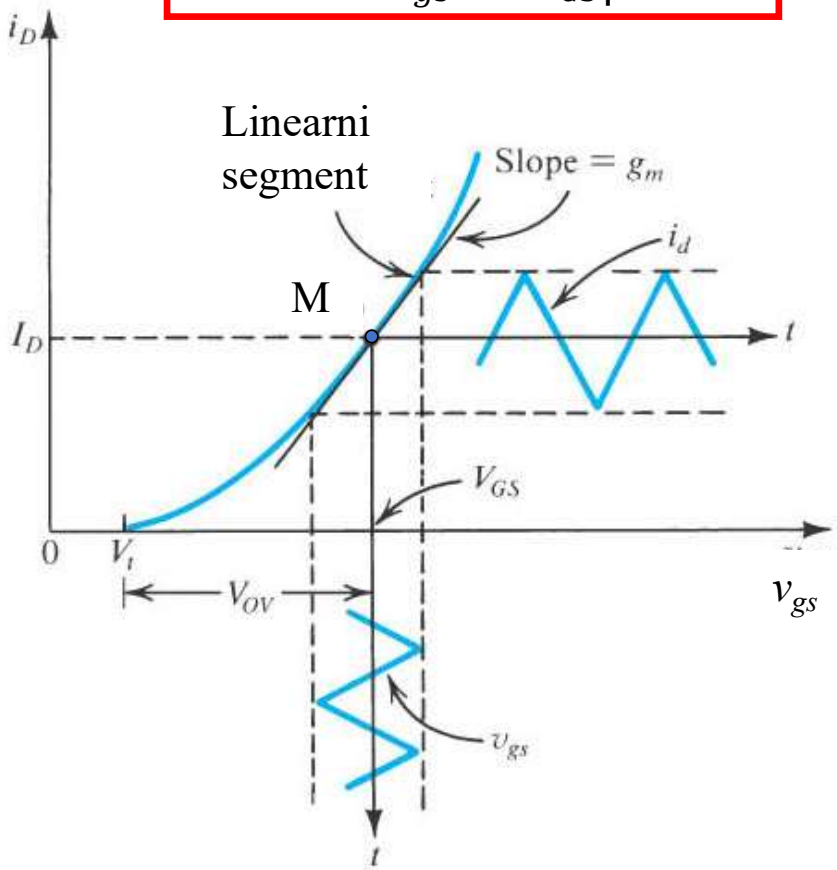


Pod dejstvom naizmeničnog napona dolazi do pomeranja radne tačke tranzistora duž radne prave čija je jednačina $v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$.

Modela za male signale u oblasti zasićenja

$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}} = \left.\frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}\right|_M$$





$$v_{GS} = V_{GS} + v_{gs}$$

$$i_D = I_D + i_d$$

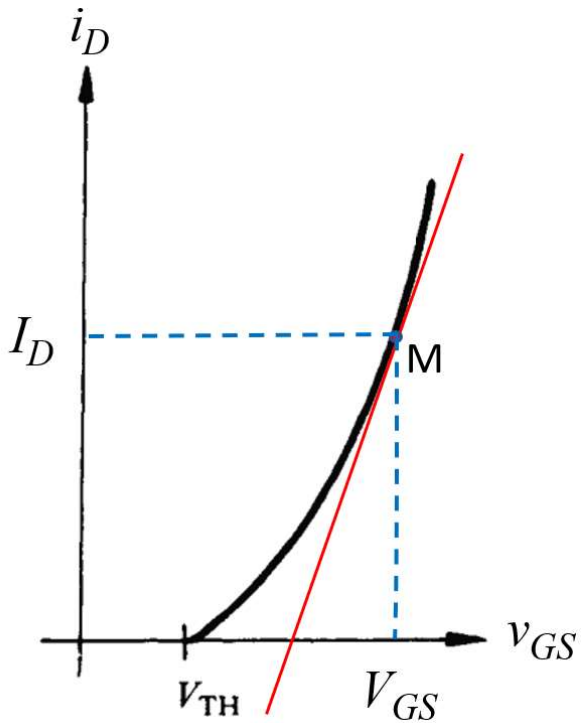
Transkonduktanasa g_m, je odnos naizmenične struje drejna i naizmeničnog napona gejt-sors. Računa se kao nagib prenosne karakteristike u mirnoj radnoj tački, koja je ovde označena sa M.

Mirna radna tačka, M, određena je jednosmernim naponom V_{GS} i jednosmernoj strujom I_D.

Ukoliko je promenjiva komponenta napona v_{gs} mala, možemo da aproksimiramo prenosnu karakteristiku pravom linijom koja predstavlja tangentu u radnoj tački. U tom slučaju talasni oblik struje drejna približno je jednak talasnom obliku ulaznog napona v_{gs} i možemo da smatramo da je pojačavač linearan.

Modela za male signale u oblasti zasićenja

Transkonduktansa



$$g_m = \left.\frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}\right|_M$$

$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}}$$

Parcijalni izvod se određuje u okolini radne tačke M. Radna Tačka je određena jednosmernim naponima i strujama.

$$i_D = A \cdot (v_{GS} - V_t)^2 \cdot \left(1 + \frac{v_{DS}}{V_A}\right)$$

$$g_m = 2 \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t) \cdot \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_A}\right)$$

$$g_m \approx 2 \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t)$$

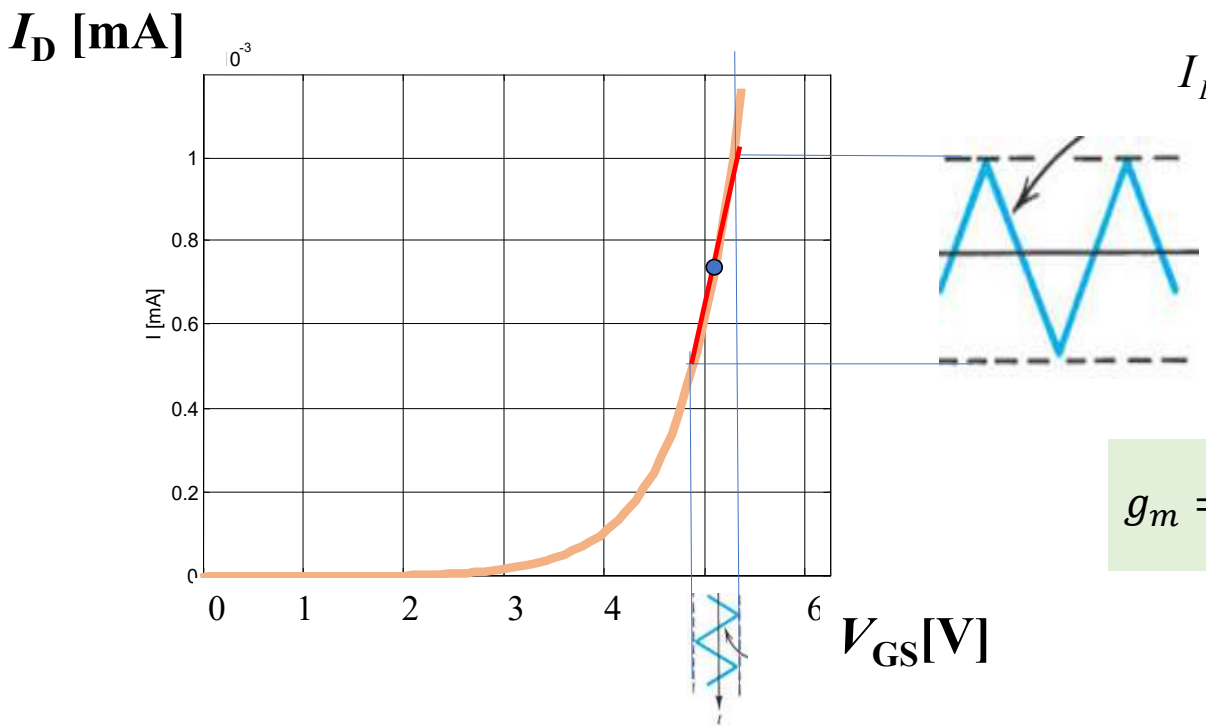
$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \approx 2 \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t) = 2 \cdot \sqrt{A \cdot I_D}$$

I_D , V_{GS} su jednosmerni napon i jednosmerna struja
i_d, v_{gs} su naizmenične komponente napona i struja
i_D , v_{GS} su ukupni napon i ukupna struja

Radna tačka – značenje modela za male signale u oblasti zasićenja

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

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$



$$i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

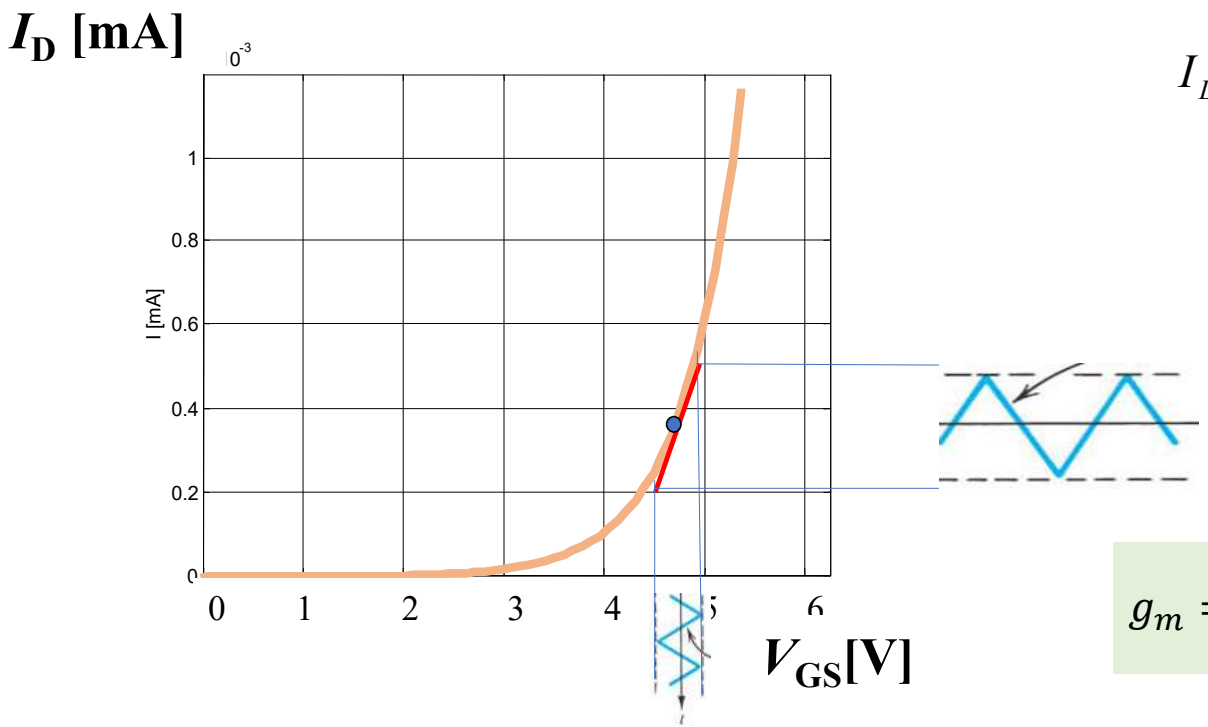
$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \approx 2 \cdot \sqrt{A \cdot I_D}$$

g_m ZAVISI od položaja mirne (DC) radne tačke.
Ista promena v_{gs} izazvaće različitu promenu struje i_d

Radna tačka – značenje modela za male signale u oblasti zasićenja

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

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$



$$i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

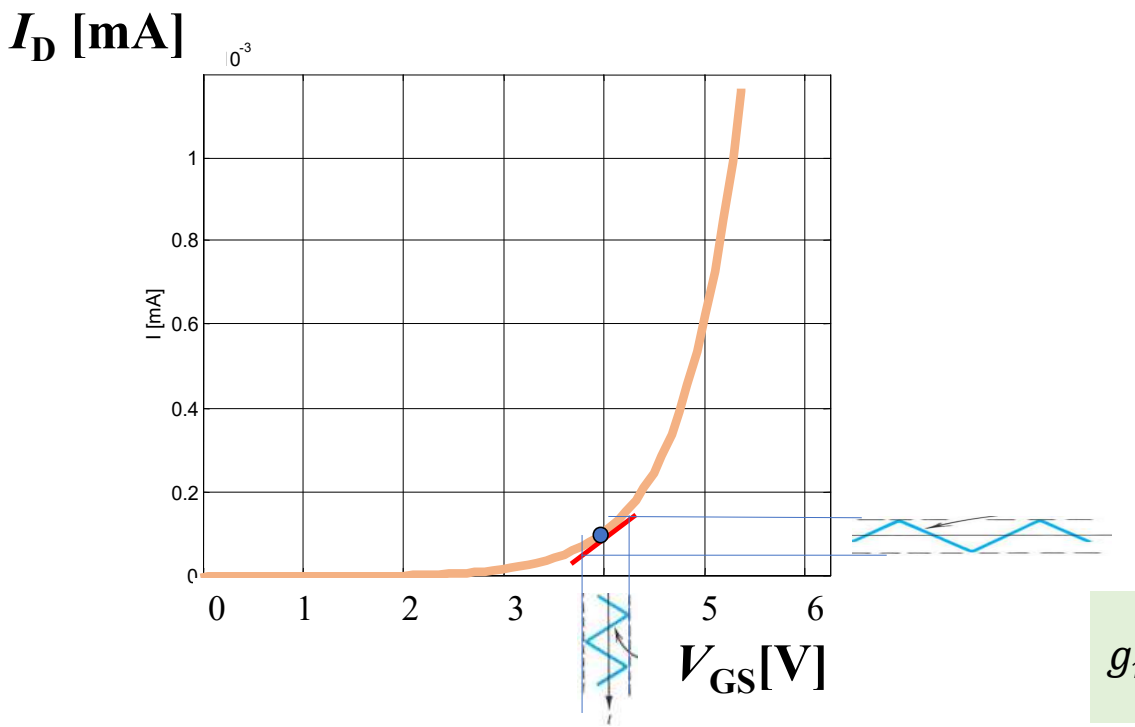
$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \approx 2 \cdot \sqrt{A \cdot I_D}$$

g_m ZAVISI od položaja mirne (DC) radne tačke.
Ista promena v_{gs} izazvaće različitu promenu struje i_d

Radna tačka – značenje modela za male signale u oblasti zasićenja

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

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$



$$i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \approx 2 \cdot \sqrt{A \cdot I_D}$$

g_m zavisi od položaja mirne (DC) radne tačke. Ista promena v_{gs} izazvaće različitu promenu struje i_d. Transkonduktansa kao i pojačanje kola, srazmerni su kvadratnom korenu jednosmerne struje drejna.

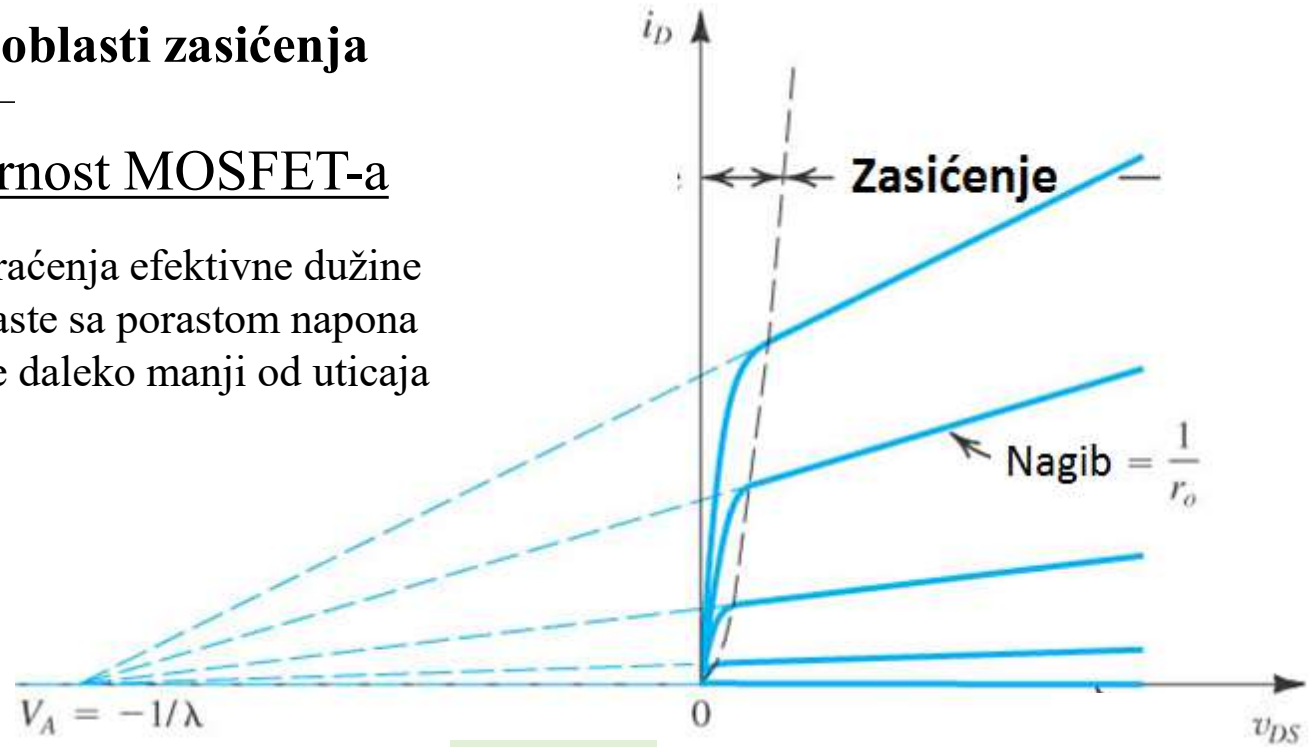
Modela za male signale u oblasti zasićenja

Izlazna otpornost MOSFET-a

Prilikom porasta napona v_{DS} dolazi do skraćenja efektivne dužine kanala. Kao posledica toga struja drejna raste sa porastom napona v_{DS}. Uticaj napona v_{DS} na struju drejna je daleko manji od uticaja napona v_{GS}.

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2(1 + \frac{V_{DS}}{V_A})$$

$$V_A = \frac{1}{\lambda}$$



V_A je **Erlijev napon**
λ je je parameter modulacije dužine kanala

Izlazna otpornost r_o, je odnos naizmenične komponenete napona drejn-sors i naizmenične struje drejna. Računa se kao recipročna vrednost nagiba izlazne karakteristike u radnoj tački, M.

$$r_o = \frac{v_{ds}}{i_d}$$

$$r_o = \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D} = \frac{1}{\left(\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{V_A}A(V_{GS} - V_t)^2} = \frac{V_A}{I_D}$$

$$r_o = \left.\frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D}\right|_{v_{GS} = V_{GS}} = \frac{V_A}{I_D}$$

Model za male signale (dinamički model) u oblasti zasićenja

Struja drejna je funkcija dva napona, ulaznog i izlaznog: $i_D = \mathrm{f}(v_{GS}, v_{DS})$

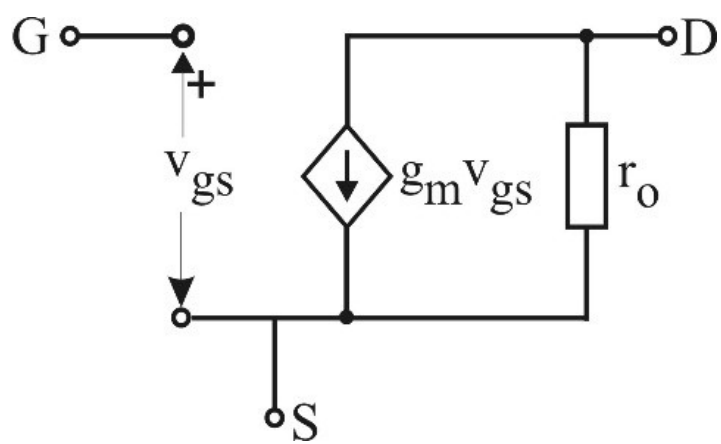
$$\Delta i_D = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \cdot \Delta v_{GS} + \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \cdot \Delta v_{DS}$$

Parcijalni izvodi su dinamički parametri tranzistora: $g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}$ $\quad r_o = \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D}$

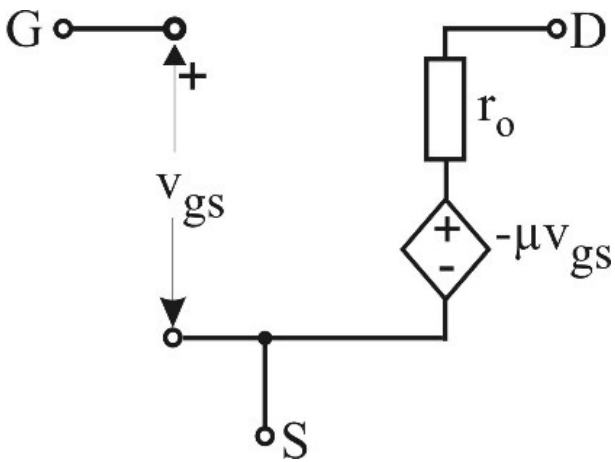
Priraštaji napona i struje predstavljaju naizmenične komponente: $v_{gs} = \Delta v_{GS}$ $\quad v_{ds} = \Delta v_{DS}$ $\quad i_d = \Delta i_D$

$$i_d = g_m \cdot v_{gs} + \frac{1}{r_o} \cdot v_{ds}$$

r_o izlazna otpornost
g_m transkonduktansa



Model za male signale (dinamički model) u oblasti zasićenja



U naponskom modelu se umesto strujnog generatora kontrolisanog naponom koristi naponski generator kontrolisan naponom. Ovaj model je pogodan kada postoji mogućnost da se struja drejna odredi iz naponske jednačine.

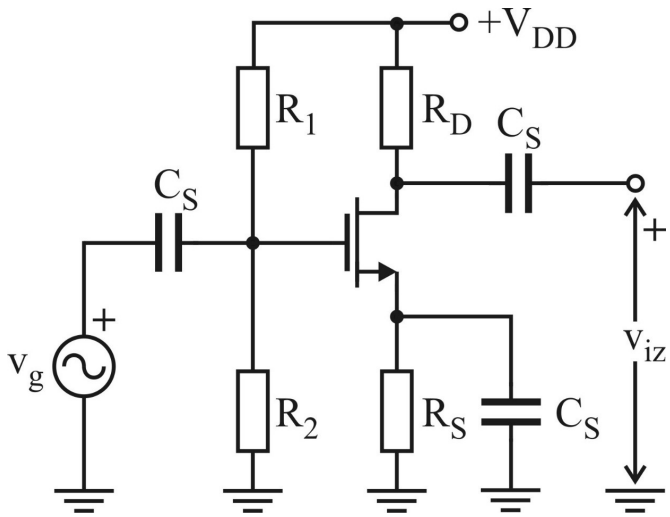
μ je **koeficijent naponskog pojačanja**

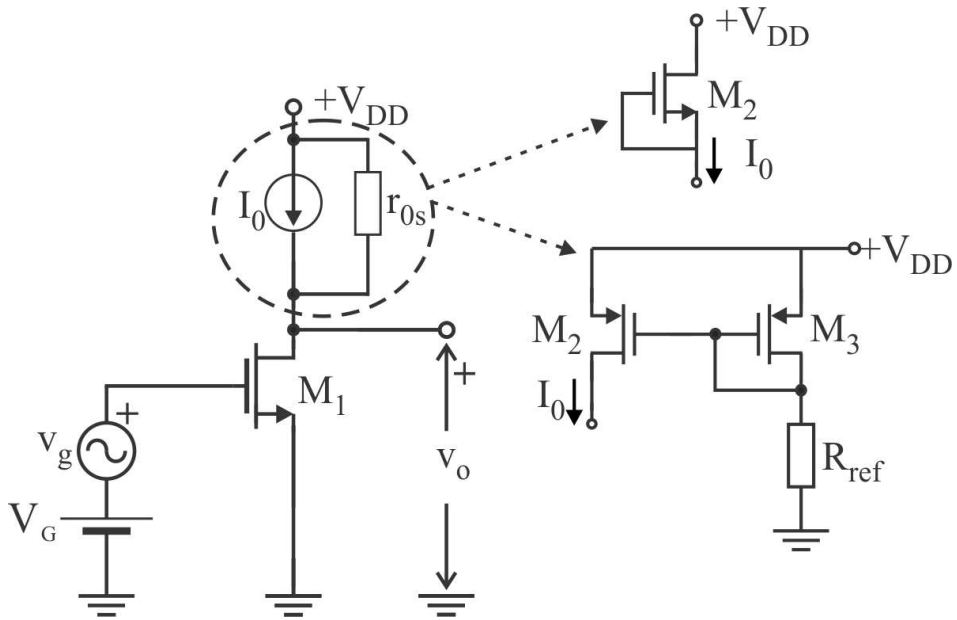
μ je jednak proizvodu strmine i izlazne otpornisti.

$$\mu = \frac{\partial v_{DS}}{\partial v_{GS}}$$

$$\mu = g_m \cdot r_o$$

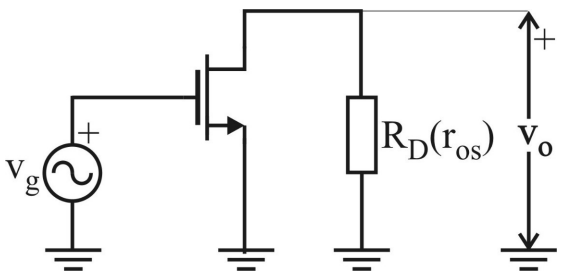
Pojačavač sa zajedničkim sorsom





Ovo je najčešći način povezivanja MOSFET-a kao pojačavača. Ulazna elektroda je gejt, izlazna drejn a zajednička elektroda je sors. Kada se koristi kapacitivna sprega tranzistor se polariše otpornicima (levo). U integrisanim kolima koristi se direktno spregnuti pojačavači kod kojih se za polarizaciju koriste aktivne komponente, odnosno drugi tranzistori (desno). Izvor konstantne struje je potkolo koje ima funkciju da polariše tranzistor. U naizmeničnom režimu rada ovo potkolo se svodi na jednu dinaimičku otpornost r_{os}. Prednost primene izvora konstantne struje u odnosu na otpornik je znatno veća vrednost otpornosti $r_{os} \gg R_D$.

Pojačavač sa zajedničkim sorsom



$$R_D \ll r_o$$

$$v_{gs} = v_g$$

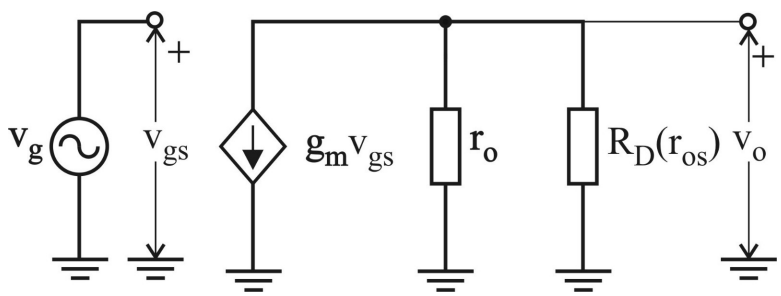
$$v_o = -g_m \cdot v_{gs} \cdot (r_o || R_D)$$

Naponsko pojačanje pojačavača, A_o:

$$A_o = \frac{v_o}{v_g}$$

Naponsko pojačanje pojačavača sa kapacitivnom spregom (gde se koristi otpornik R_D):

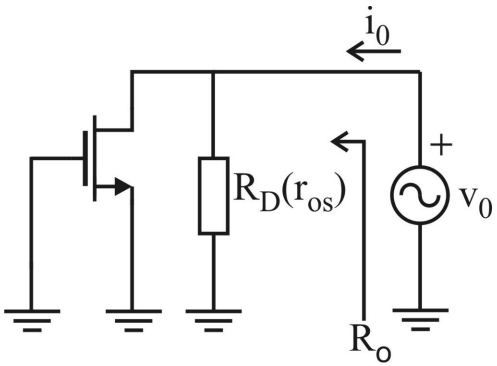
$$\boxed{A_o \approx -g_m \cdot R_D}$$



Naponsko pojačanje direktno spregnutog pojačavača (sa dinamičkom otpornošću r_o umesto otpornika):

$$\boxed{A_o = -g_m \cdot (r_o || r_{os})}$$

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

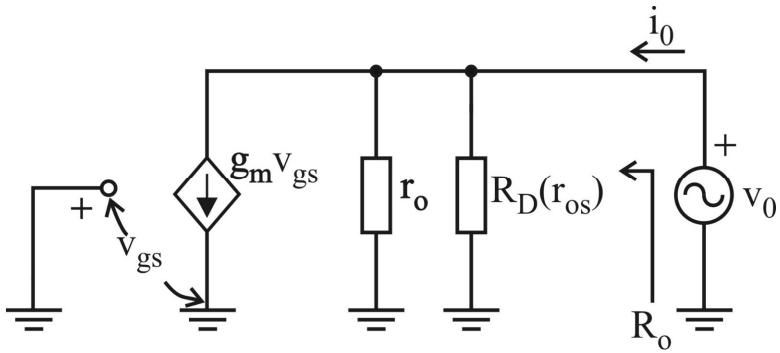


$$v_{gs} = 0$$

$$i_0 = \frac{v_0}{r_0 \parallel r_{os}}$$

Izlazna otpornost za pojačavač sa kapacitivnom spregom:

$$R_D \ll r_o \qquad \boxed{R_o = r_o || R_D \approx R_D}$$

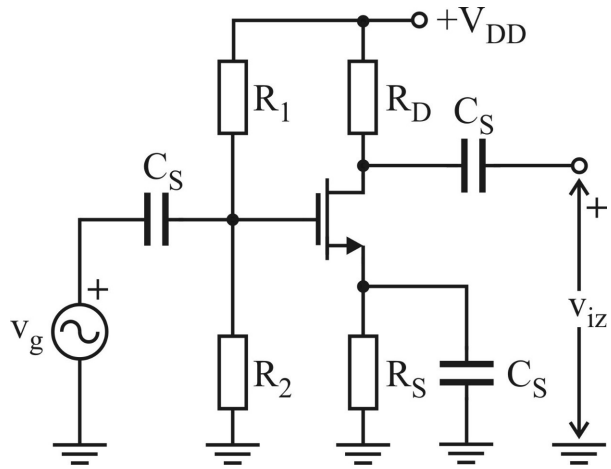


Izlazna otpornost za direktno spregnuti pojačavač, odnosno pojačavača koji koristi aktivno opterećenje:

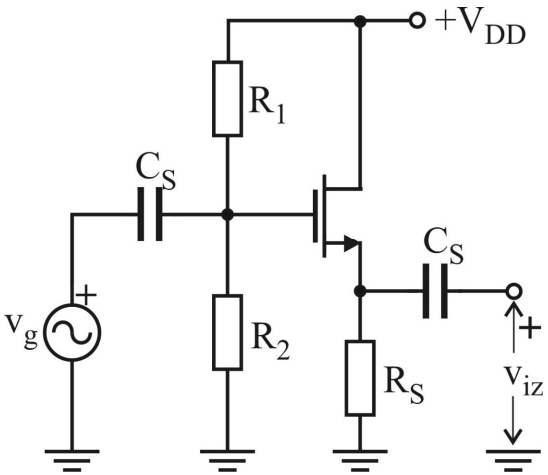
$$\boxed{R_o = r_o || r_{os}}$$

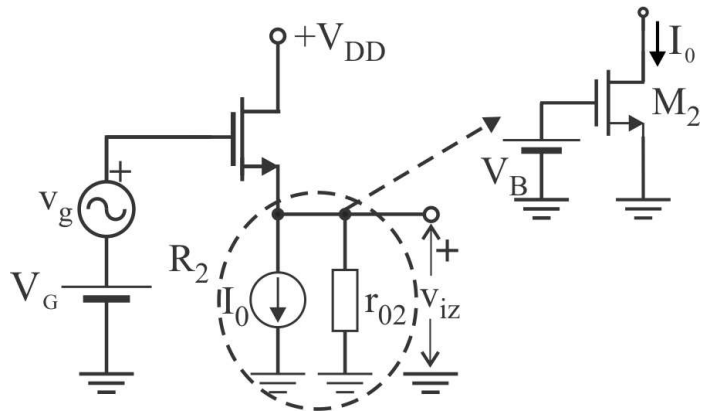
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

- Ova sprega daje negativno pojačanje (obrće fazu).
- Naponsko pojačanje je srazmerno otpornosti potrošača. Da bi se realizovala velika otpornost potrošača neophodno je koristiti izvor konstatne struje umesto otpornika.
- U pojačavaču sa kapacitvnom spregom ulazna otpornost zavisi od otpornika za polarizaciju koji su povezani sa gejtom, $R_{in} = R_1 \parallel R_2$. Za ove otpornike usvajaju se velike vrednosti da bi se dobila što veća vrednost ulazne otpornost.
- U pojačavaču sa kapacitvnom spregom izlazna otpornost je približno jednaka otporniku za polarizaciju u kolu drejna R_D. Ukoliko se kolo ne polariše izvorom konstantne struje izlaza otpornost je mnogo veća.



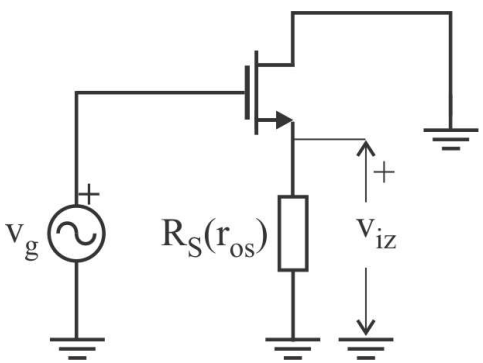
Pojačavač sa zajedničkim drejnom

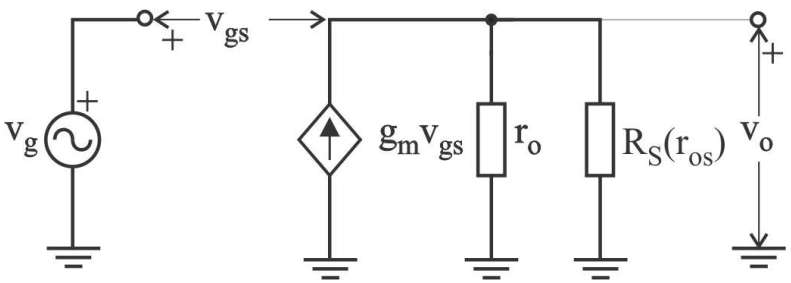




Ulazna elektroda je gejt, izlazna sors a zajednička elektroda je drejn. Kada se koristi kapacitivna sprega tranzistor se polariše otpornicima (levo). U integrisanim kolima koristi se direktno spregnuti pojačavači kod kojih se za polarizaciju koriste aktivne komponente, odnosno drugi tranzistori (desno).

Pojačavač sa zajedničkim drejnom





$$v_{gs} = v_g - v_o$$
$$v_o = g_m \cdot v_{gs} \cdot r_o || R_s$$

$$A_o = \frac{v_o}{v_g} = \frac{g_m \cdot r_o || R_s}{1 + g_m \cdot r_o || R_s}$$

Naponsko pojačanje pojačavača sa kapacitivnom spregom:

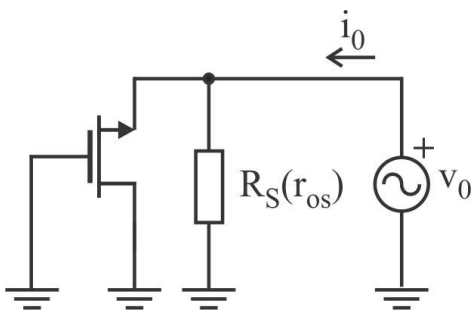
$$R_S \ll r_o \qquad A_o \approx \frac{g_m \cdot R_S}{1 + g_m \cdot R_s}$$

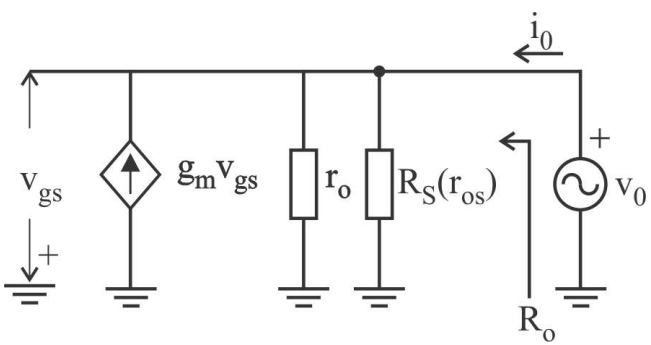
Naponsko pojačanje direktno spregnutog pojačavača:

$$A_o \approx \frac{g_m \cdot r_o || r_{os}}{1 + g_m \cdot r_o || r_{os}}$$

Naponsko pojačanje je uvek manje od 1.

Pojačavač sa zajedničkim drejnom





$$v_{gs} = -v_0$$

$$i_o = -g_m \cdot v_{gs} + \frac{v_o}{r_o} + \frac{v_o}{R_s}$$

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{1}{\frac{1}{g_m} + \frac{1}{r_o} + \frac{1}{R_s}}$$

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{1}{g_m} || r_o || R_S$$

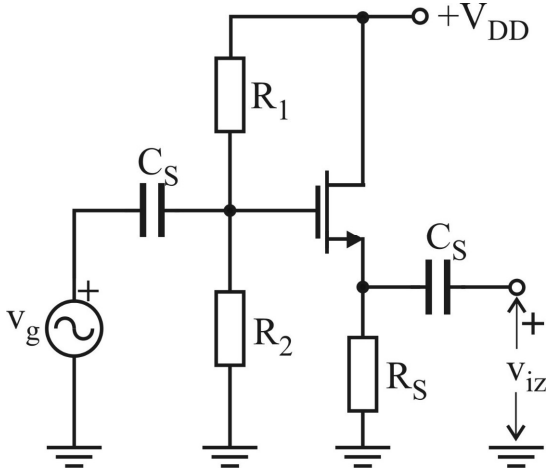
$$\frac{1}{g_m} \ll r_o, R_S$$

$$\boxed{R_o \approx \frac{1}{g_m}}$$

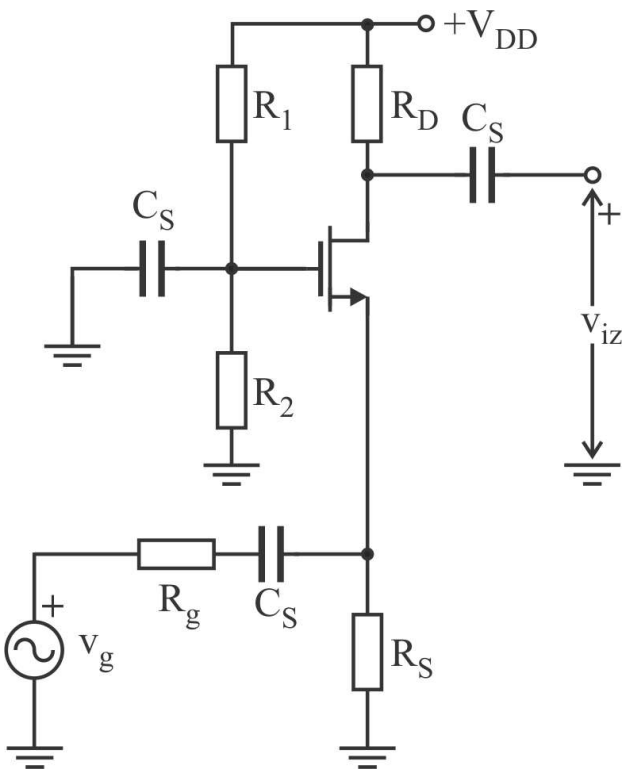
Izlazna otpornost ima malu vrednost. Red veličine recipročne transkondutkanse je nekoliko stotina oma.

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

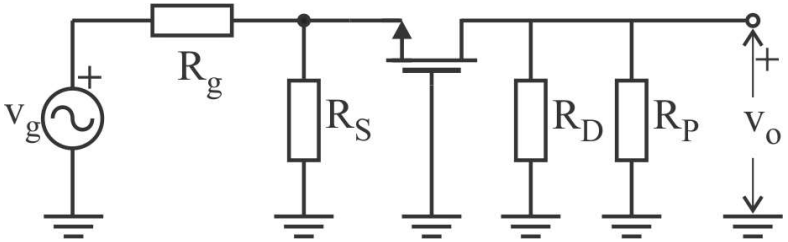
- Pojačavač sa zajedničkim drejnom ne pojačava napon. Naponsko pojačanje je manje od 1 i veoma blizu jediničnog.
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).
- Izlazna otpornost je vrlo mala i približno jednaka recipročnoj vrednosti strmine.
- Kao i kod pojačavača sa zajedničkim sorsom ulazna otpornost je određena otpornicima za polarizaciju u kolu gejta $R_{in} = R_1 \parallel R_2$.
- Najčešće se primenjuje kao poslednji pojačavački stepene za prilagođenje po impedansi i to u slučaju kada je otpornost potrošača veoma mala. Može se koristiti za razdvajanje dva susedna pojačavačka stepena kao naponski bafer. Naponski bafer je pojačavač na čijem izlazu se dobija napon jednak ulaznom naponu nezavisno od vrednosti struje koje protiče kroz potrošač.



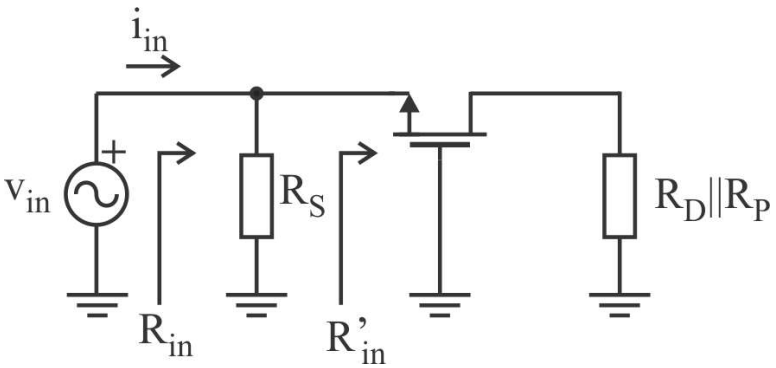
Pojačavač sa zajedničkim gejtom

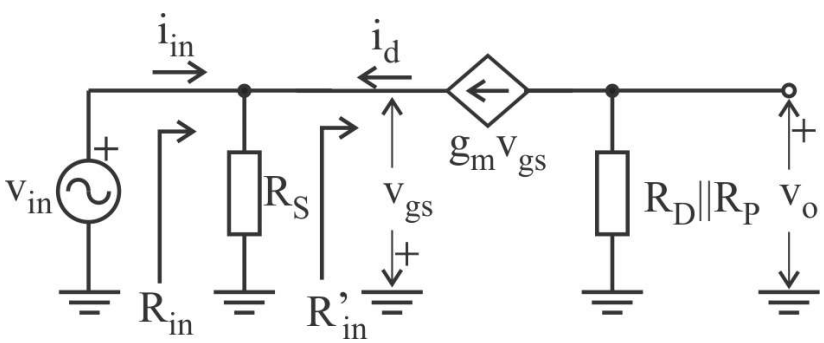


Ulazna elektroda je sors, izlazna drejn a zajednička elektroda je gejt. Dole je prikazana šema za naizmeničnu struju.



Pojačavač sa zajedničkim gejtom





$$-i_{in} + \frac{v_{in}}{R_S} - g_m \cdot v_{gs} = 0$$

$$v_{gs} = -v_{in}$$

$$R'_{in} = -\frac{v_{in}}{i_d} = \frac{v_{gs}}{g_m \cdot v_{gs}} = \frac{1}{g_m}$$

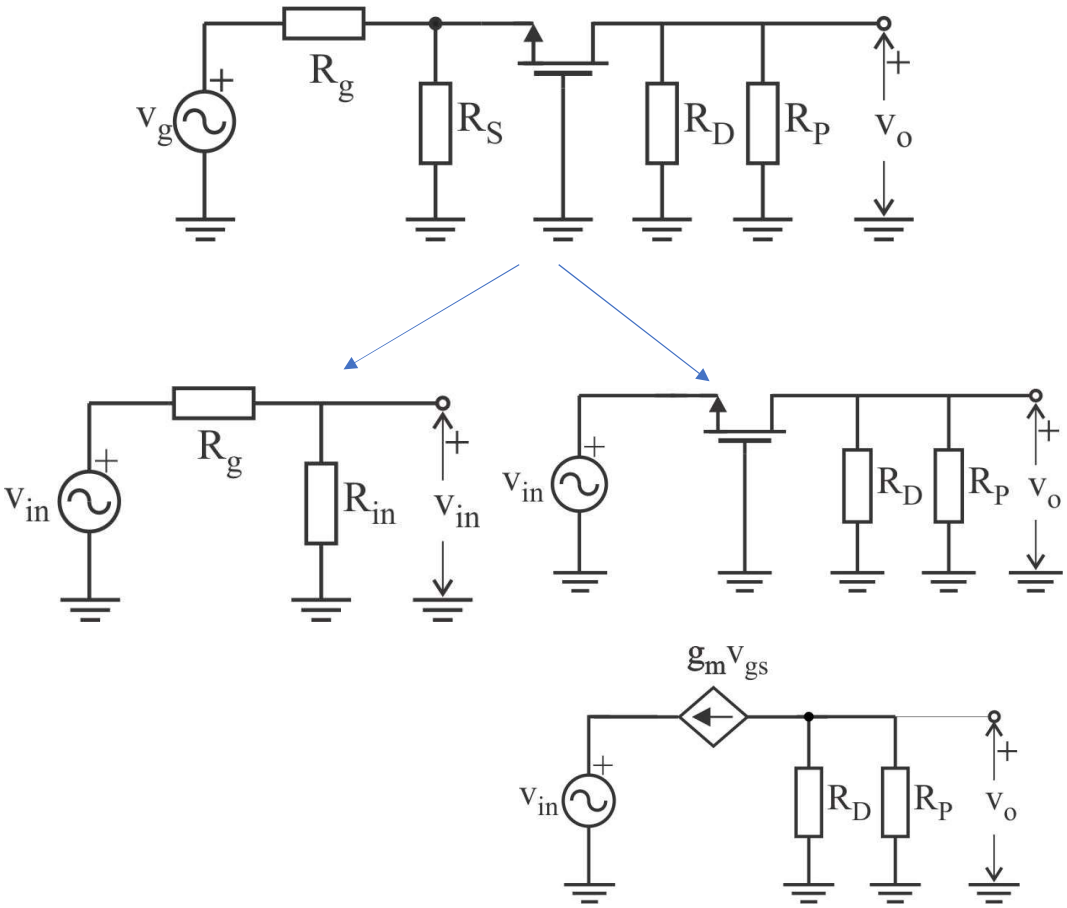
$$R_{in} = R'_{in} || R_S \approx R'_{in}$$

$$R_S \gg R'_{in} \quad \Rightarrow \quad R_{in} \approx R'_{in}$$

$$\boxed{R_{in} = \frac{1}{g_m}}$$

Ulazna otpornost je veoma mala, reda stotinak oma.

Pojačavač sa zajedničkim gejtom



Ekvivalentna otpornost između izlaznih priključaka tranzistora, drejna i gejta iznosi:

$$R_{DG} = R_D \parallel R_P$$

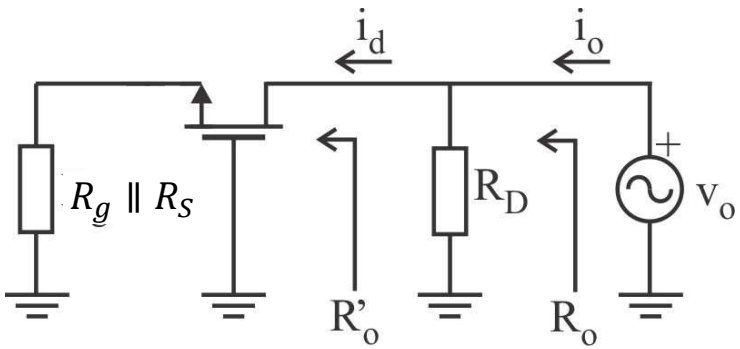
$$v_o = -R_{DG} \cdot i_d = -g_m \cdot v_{gs} \cdot R_{DG}$$

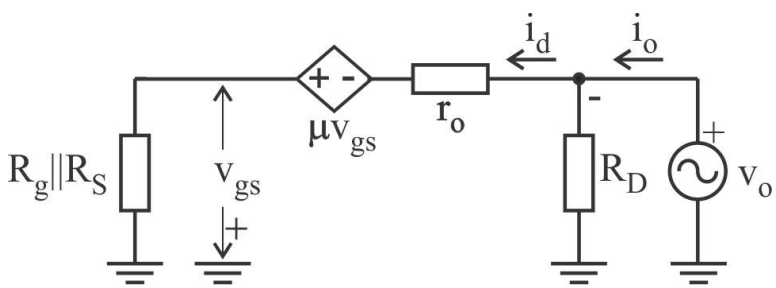
$$\boxed{A_o = \frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{v_o}{v_{gs}} = R_{DG} \cdot g_m}$$

Ukupno naponsko pojačanje A_n je pojačanje u odnosu na elektromotornu silu generatora v_g:

$$A_n = \frac{v_o}{v_g} = \frac{v_{in}}{v_g} \cdot \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} \cdot A_o$$

Pojačavač sa zajedničkim gejtom





$$-v_{gs} - \mu \cdot v_{gs} + r_o \cdot i_d = v_o$$

$$v_{gs} = -i_d \cdot R_g||R_S$$

$$i_d = \frac{v_o}{r_o + (1+\mu) \cdot R_g||R_S}$$

$$R'_o = \frac{v_o}{i_d} = r_o + (1+\mu) \cdot R_g||R_S$$

$$R_o = R'_o||R_D$$

$$R'_o \gg R_D$$

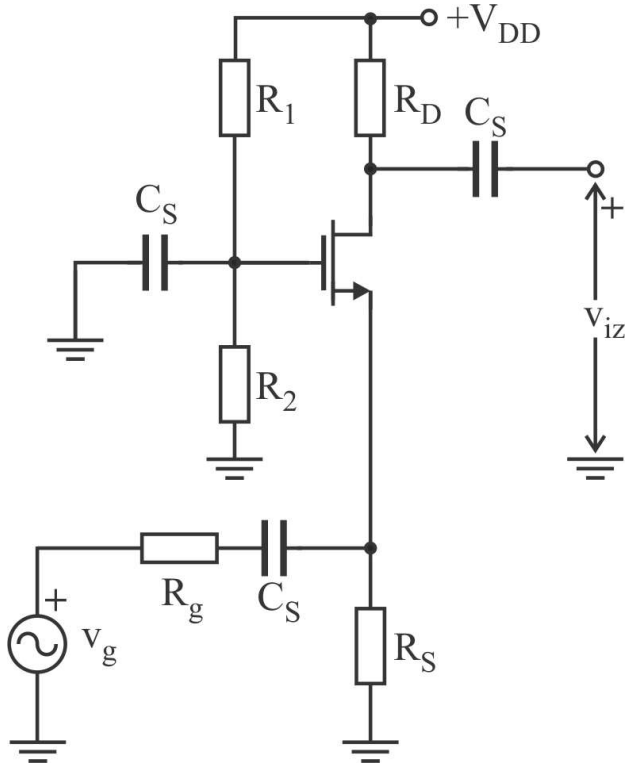
$$\boxed{R_o \approx R_D}$$

Izlazna otpornost na krajevima tranzistora R'_o je veoma velika, više stotina koliooma.

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

- Naponsko pojačanje zavisi od otpornosti potrošača. Što je otpornost potrošača veća i unutrašnja otpornost generatora manja pojačanje je veće. Mogu se dobiti velike vrednosti naponskog pojačanja.
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).

- Ulazna otpornost je mala, približno jednaka recipročnoj vredosti strmine. Izlazna otpornost vrlo velika i približno jednaka otpornosti za polarizaciju u kolu drejna.
- Ova sprega se koristi za prilagođenje po impedansi, ukoliko je otpornost potrošača veoma velika ili ukoliko je unutrašnja otpornost pobudnog generatora veoma mala. Može se koristiti i kao izvor konstantne struje zahvaljujući velikoj izlaznoj otpornosti.
- Ova sprega ima dobre karakteristike pri visokim frekvencijama, jer ima širok propusni opseg.



Poređenje jednostepenih MOSFET pojačavača

Vrsta pojačavača	Fazni pomeraj	Naponsko pojačanje	Ulazna otpornost	Izlazna otpornost
Zajednički sors	180^0	$-g_m \cdot R_{DS}$	$R_G = R_1 \parallel R_2$	R_D
Zajednički sors sa aktivnim opterćenjem	180^0	$-g_m \cdot (r_o \| \| r_{os})$	∞	$r_o \| \| r_{os}$
Zajednički drejn	0^0	≈ 1	$R_G = R_1 \parallel R_2$	$\frac{1}{g_m}$
Zajednički gejt	0^0	$g_m \cdot R_{DG}$	$\frac{1}{g_m}$	R_D

Poređenje MOSFET i bipolarnih pojačavača

Prednosti MOSFETA u odnosu na bipolarni transistor

- Ulazna otpornost MOSFET pojačavača je daleko veća od ulazne otpornosti bipolarnih tranzistora.
- MOSFET pojačavači pokazuju bolje karakteristike na visokim frekvencijama zbog manjih vrednosti parazitnih kapacitivnosti.

Prednosti bipolarnih tranzistora u odnosu na MOSFET

- Pojačavači sa bipolarnim tranzistorima imaju veću vrednost strimine u odnosu na MOSFET tranzistore. Shodno tome i naponsko pojačanje bipolarnih pojačavača je veće od naponskog pojačanja MOSFET tranzistora.
- MOSFET tranzistori se ređe koriste kao diskretne komponente jer su osetljivi na rukovanje. Veoma lako dolazi do proboja gejta usled elektrostatičkog pražnjenja.

Poređenje MOSFET i bipolarnih pojačavača

Bipolar: gm increases linear with current

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{Vt}}$$

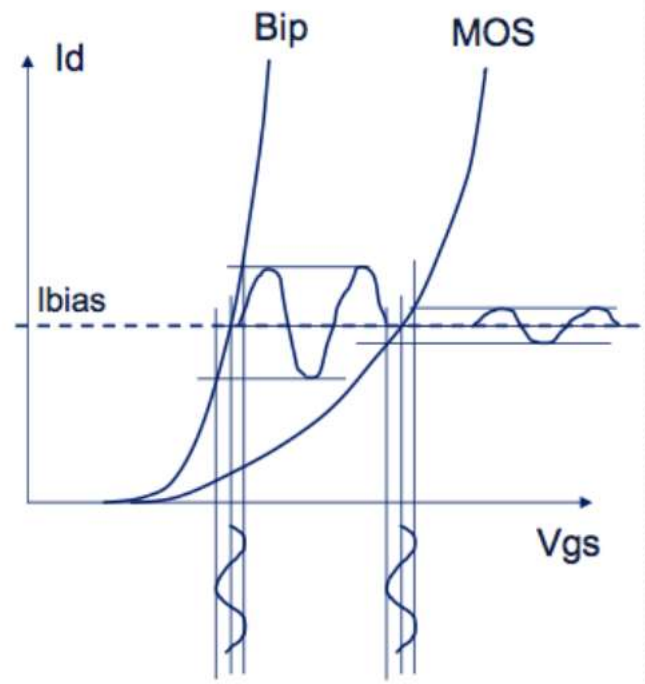
$$g_m = \frac{d\ Ic}{d\ Vbe} = \frac{I_C}{Vt}$$

MOS: gm increases with squareroot of current

$$Id = k \cdot \frac{w}{l} \cdot (Vgs - Vth)^2$$

$$g_m = \frac{d\ Id}{d\ Vbe} = k \cdot \frac{w}{l} \cdot 2 \cdot (Vgs - Vth)$$

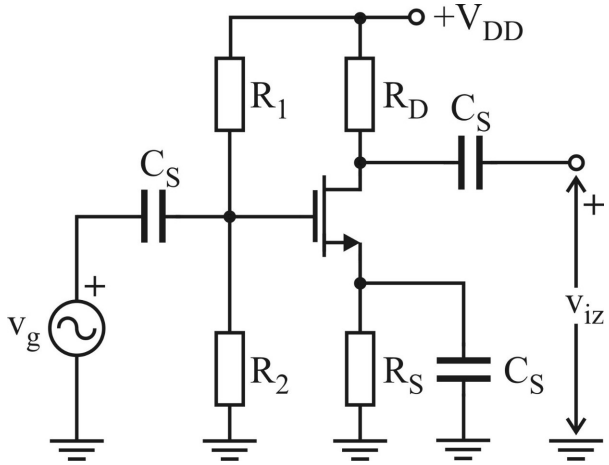
$$g_m = 2 \cdot \sqrt{k \cdot \frac{w}{l} \cdot Id}$$



bipolar transistor will achive more gm

Transkonduktansa bipolarnih tranzistora srazmenra je jednosmernoj struji, I_C, dok je transkonduktansa MOSFET tranzistora srazmerna kvadratnom korenu struje. Zaključujemo da je pri istoj vrednosti struje transkonduktansa MOSFET-a manja u odnosu na transkonduktansu bipolarnog tranzistora. Odavde prozilazi da se bipolarnim tranzistorom može realizovati pojačavač sa većim pojačanjem u odnosu na pojačavač sa MOSFET-om.

Poređenje MOSFET i bipolarnih pojačavača



$$A_o \approx -g_m \cdot R_D$$

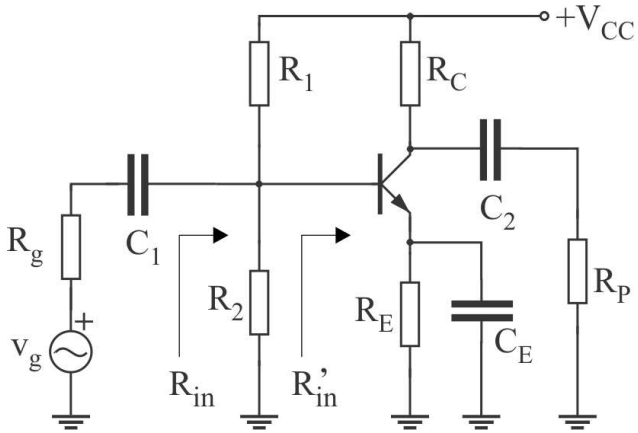
$$I_D \cdot R_D \approx \frac{V_{DD}}{2} \qquad g_m = \frac{2 \cdot I_D}{V_{GS} - V_{tn}}$$

$$A_o = \frac{V_{DD}}{V_{GS} - V_{tn}} \approx -V_{DD}$$

$$A_o \approx V_{DD}$$

Kada se uzmu u obzir standardne vrednosti napona za polarizaciju može se napraviti procena kolika vrednost naponskog pojačanja u odnosu na napajanje.

Pokazuje se da je pojačanje pojačavača sa bipolarnim tranzistora veće u odnosu na pojačanje pojačavača sa MOSFET tranzistorom za desetak puta.



$$A_o \approx -g_m \cdot R_C = -\frac{I_C \cdot R_C}{V_T}$$

$$I_C \cdot R_C \approx \frac{V_{CC}}{3} \qquad V_T = 26\,mV$$

$$A_o \approx 10 \cdot V_{CC}$$

Elementarna pitanja

1. Režimi rada MOSFET-a (7,8)
2. Model MOSFET-a za velike signale u režimu zasićenja (17)
3. Model MOSFET-a za male signale, naponski i strujni model (36,37)

Ostala ispitna pitanja

4. Definicija transkonduktanse i izvođenje izraza za transkonduktansu u funkciji struje drejna (30,31)
5. Definicija izlazne otpornosti i izvođenje izraza za izlaznu otpornost u funkciji struje drejna (35)
6. Polarizacija MOSFET-a otpornicima (polarizacija sa otpornikom izmedju gejta i drejna, poalrizaciju sa 4 otpornika) (21-23)
7. Polarizacija MOSFET-a aktivnim opterećenjima (električne šeme za: automatsku polarizaciju sa MOSFET tranzistorom, polarizaciju sa strujnim izvorom) (25-27)
8. Pojačavač sa zajedničkim sorsom (izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine) (38-41)
9. Pojačavač sa zajedničkim drejnom (izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine) (42-45)
10. Pojačavač sa zajedničkom gejtom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine) (46-50)