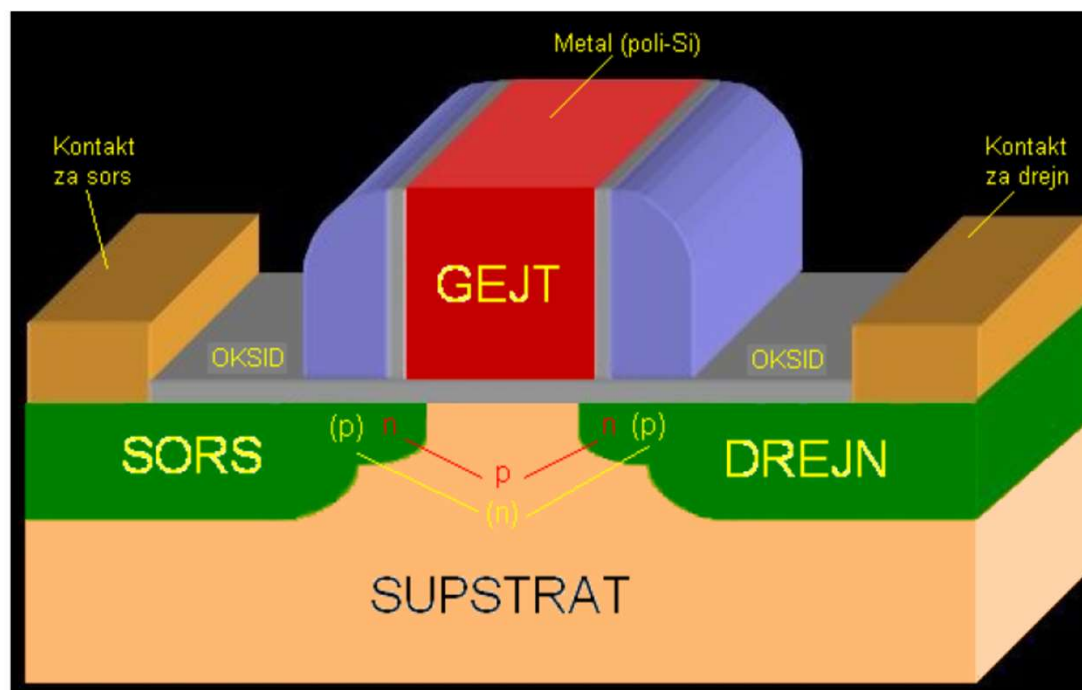


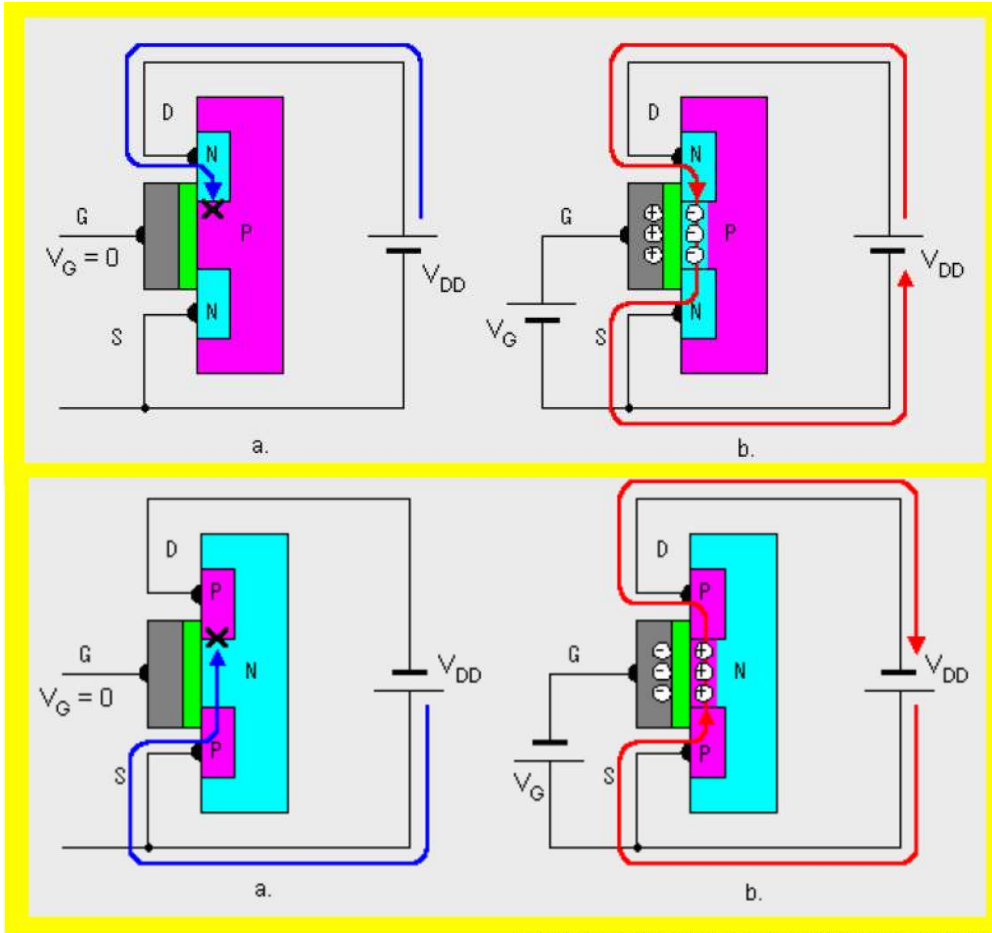
MOSFET tranzistori

MOS tranzistor



Model MOS tranzistora

Da se podsetimo



MOS tranzistor

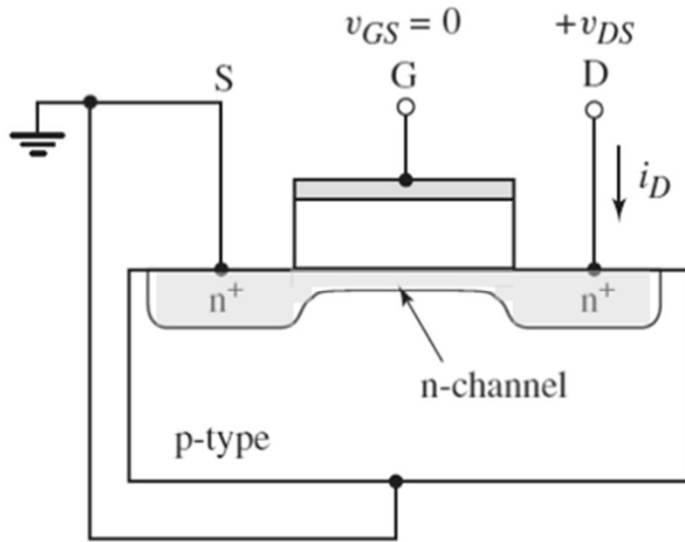
nMOS

Vodi za $V_G > 0$

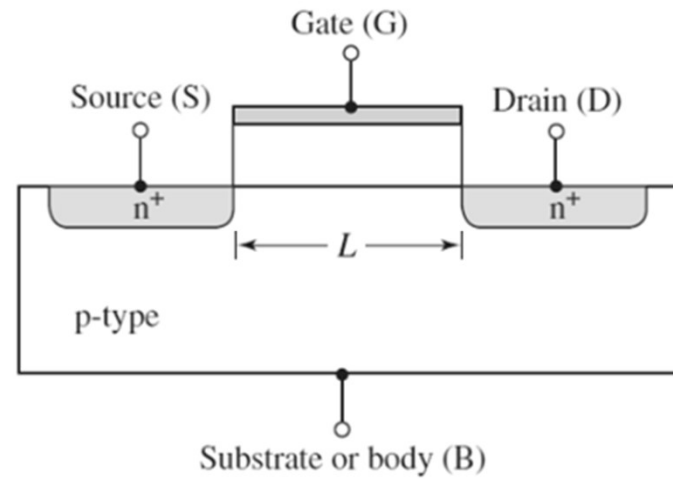
pMOS

Vodi za $V_G < 0$

Model MOS tranzistora



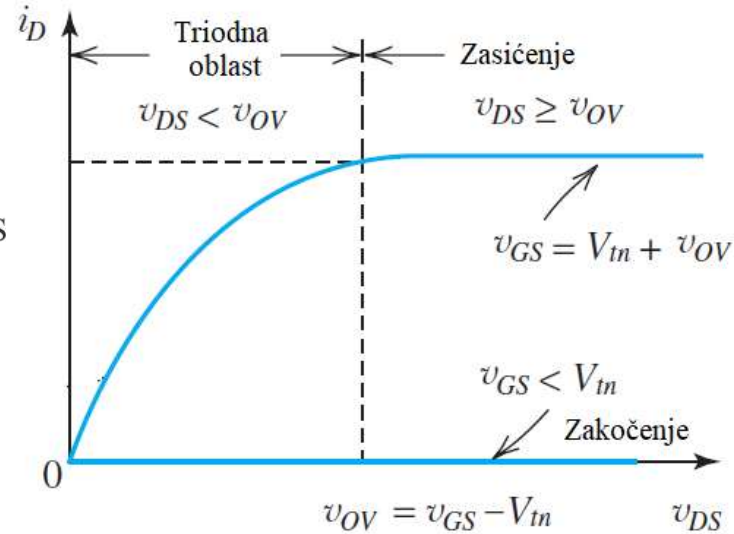
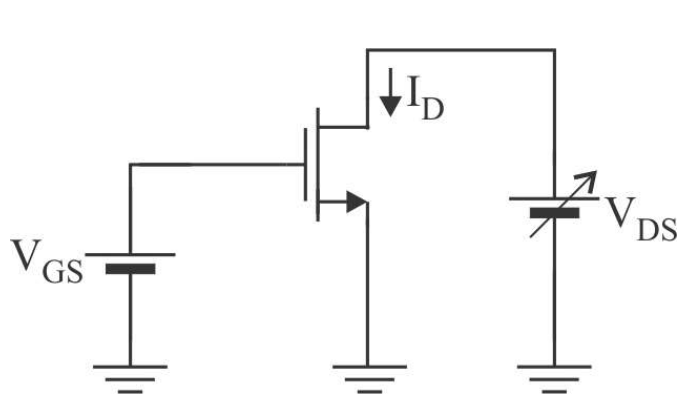
MOSFET sa ugrađenim kanalom



MOSFET sa indukovanim kanalom

Model MOS tranzistora

Režimi rada n-kanalong MOSFET-a



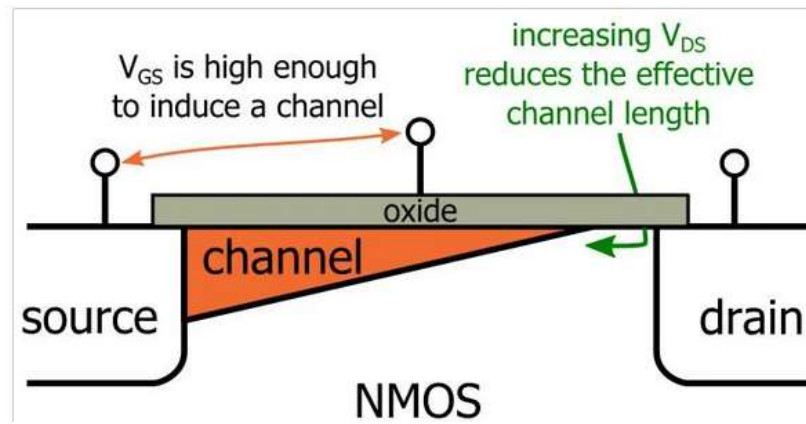
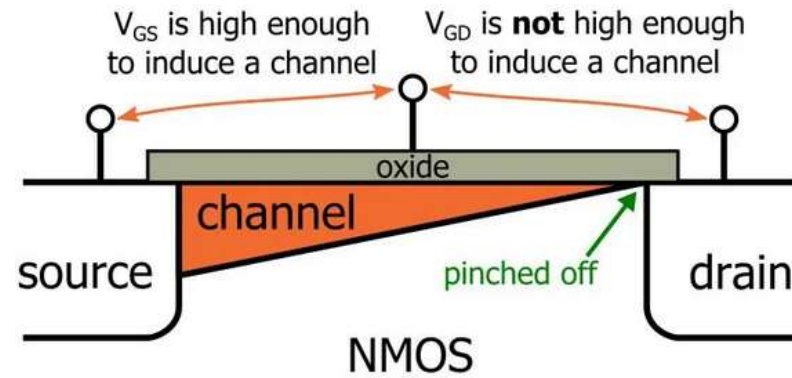
V_{tn} je napon praga provođenja.

Ukoliko se povećava napon između drejna i sorsa V_{DS} dolazi do smanjivanja napona V_{GD} i kada je ispunjen uslov $V_{GD} = V_{tn}$ ($V_{DS} = V_{GS} - V_{tn}$) zatvara se kanal kod drejna. Ova pojava se zove i uštinuće kanala. Iako je kanal zatvoren struja i dalje teče.

Kada se dalje povećava napon V_{DS} (dalje smanjuje V_{GD}) $V_{DS} > V_{GS} - V_{tn}$ kanal ostaje zatvoren, pri čemu struja više ne zavisi od napona V_{DS} već samo od napona V_{GS} . Tada je tranzistor u režimu zasićenja.

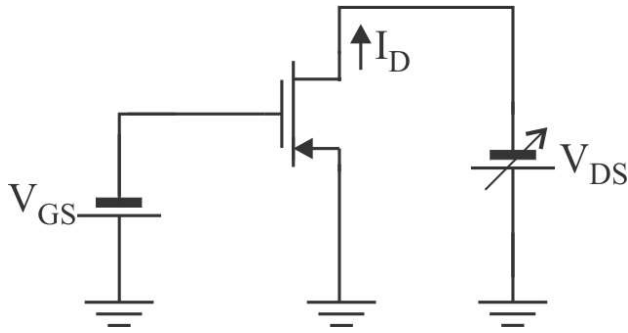
Režimi rada MOSFET		V_{GS}	V_{DS}
	Zakočenje	$V_{GS} < V_{tn}$	
Vodi	Zasićenje	$V_{GS} > V_{tn}$	$V_{DS} > V_{GS} - V_{tn} = V_{ov}$
	Omska oblast (triodna oblast)	$V_{GS} > V_{tn}$	$V_{DS} < V_{GS} - V_{tn} = V_{ov}$

Model MOS tranzistora



Model MOS tranzistora

Režimi rada p-kanalnog MOSFET-a



Jednosmerna struja drejna 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.

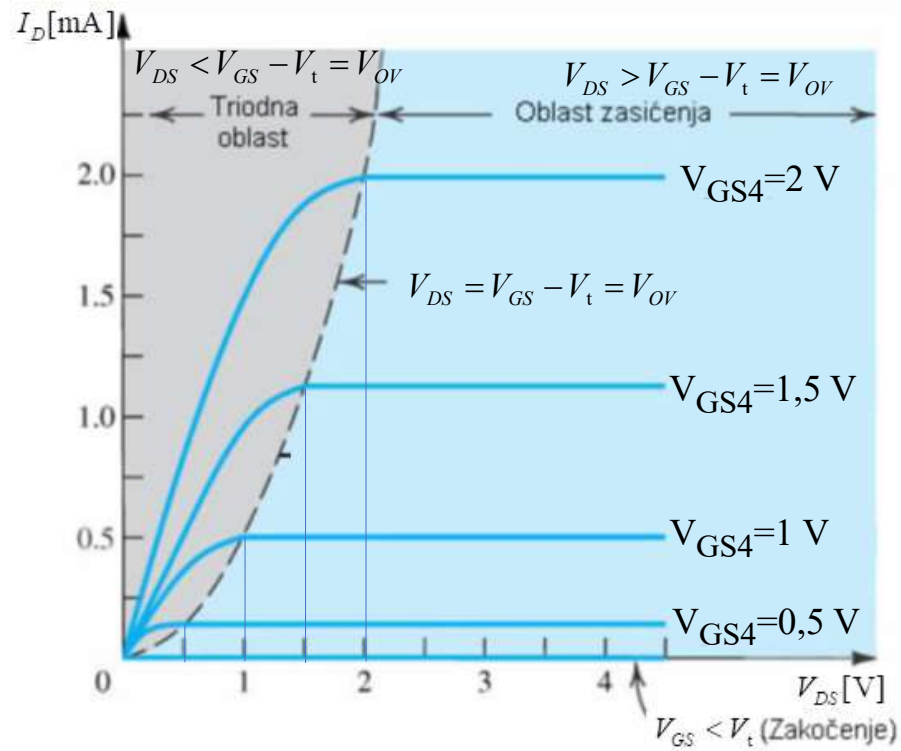
V_{tp} je napon praga provođenja.

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

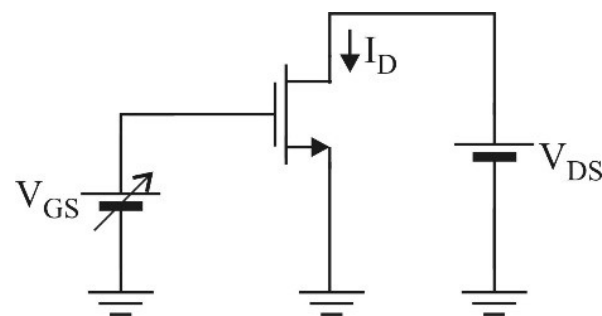
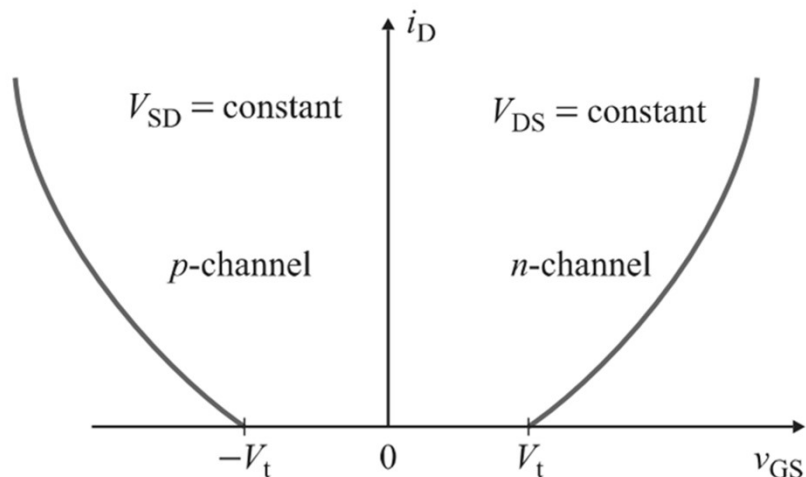
Model MOS tranzistora

Da se podsetimo

Izlazne karakteristike MOSFET-a



Prenosna karakteristika MOSFET-a



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

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

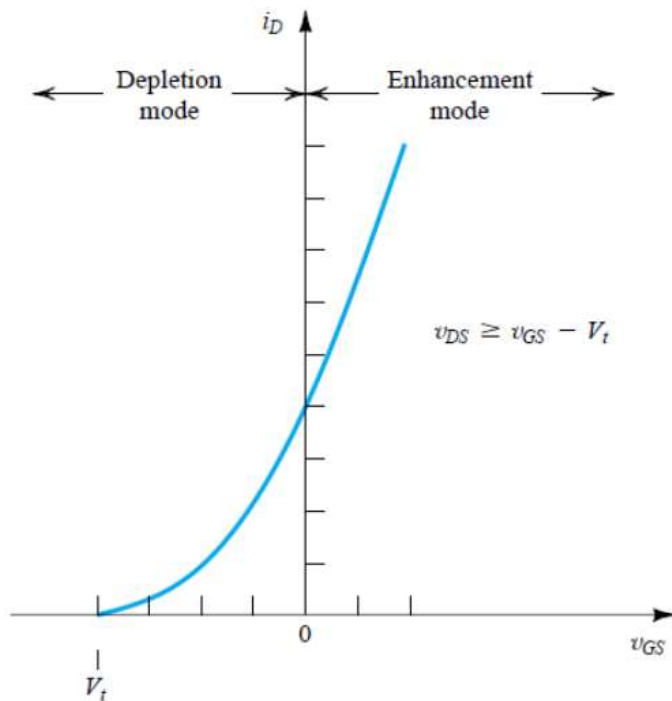
Kod n-kanalnog MOSFET-a struja drejna raste sa porastom ulaznog napona V_{GS} (desna karakteristika).

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 $V_{tn} > 0$.

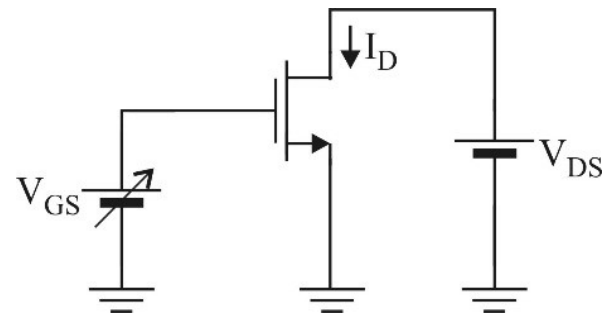
Prenosna karakteristika MOSFET-a

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



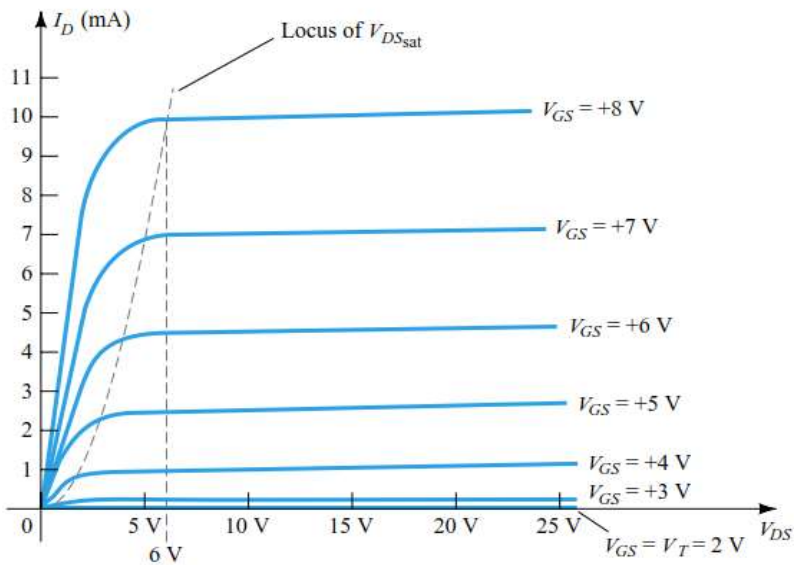
Kada je napon v_{GS} negativan kaže se da je tranzistor u osiromašenom modu, a kada je pozitivan da je u obogaćenom modu rada.

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



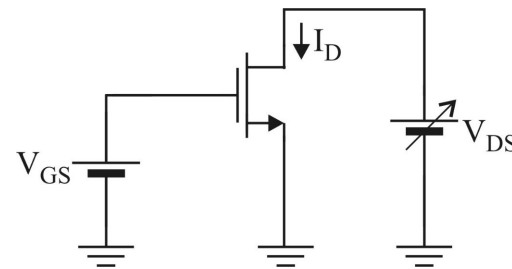
Činjenica da je napon praga negativan znači da tranzistor ima ugrađen kanala, odnosno da između drejna i sorsa postoji oblast n-tipa.

Izlazna karakteristika MOSFET-a



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

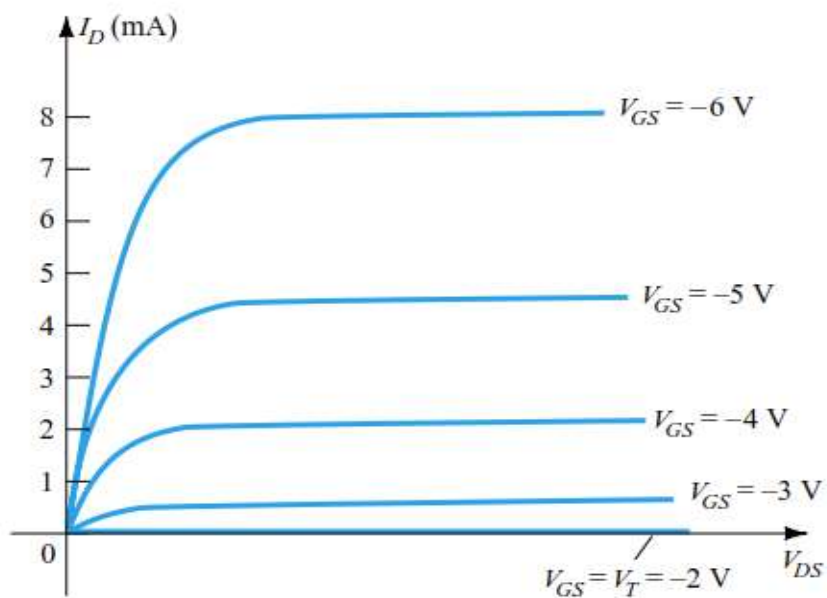
$$i_D = f(v_{DS})|_{v_{GS} = const}$$



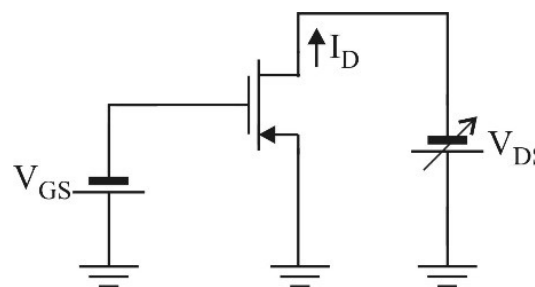
Kod n-kanalnog MOSFET-a struja drejna raste sa porastom ulaznog napona V_{GS} .

Izlazna karakteristika MOSFET-a

Kod p-kanalnog MOSFET-a je struja drejna raste što je negativniji napon V_{GS} . Napon između drejna i sorsa je negativan.



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



Strujno naponske zavisnosti za MOSFET

Strujno naponska karakteristika u triodnoj oblasti:

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

Linearna oblast za:

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

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

U ovoj oblasti tranzistor se ponaša kao otpornik kontrolisan naponom.

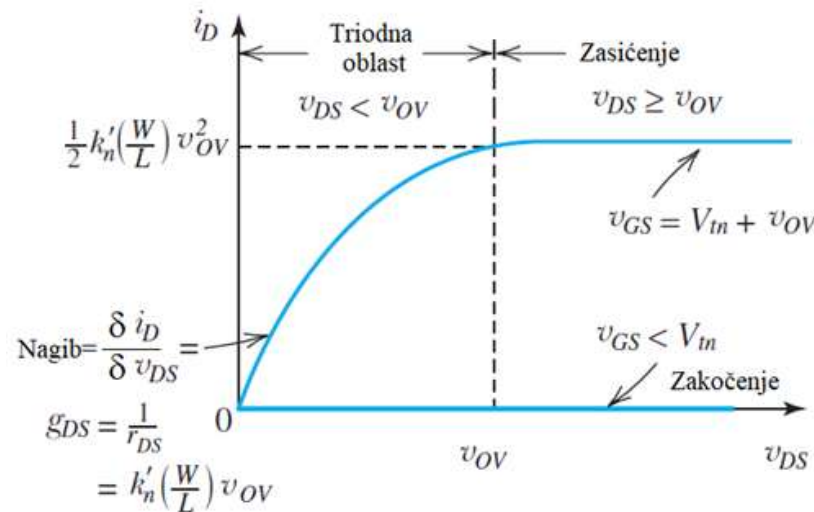
Strujno naponska karakteristika u oblasti zasićenja:

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

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

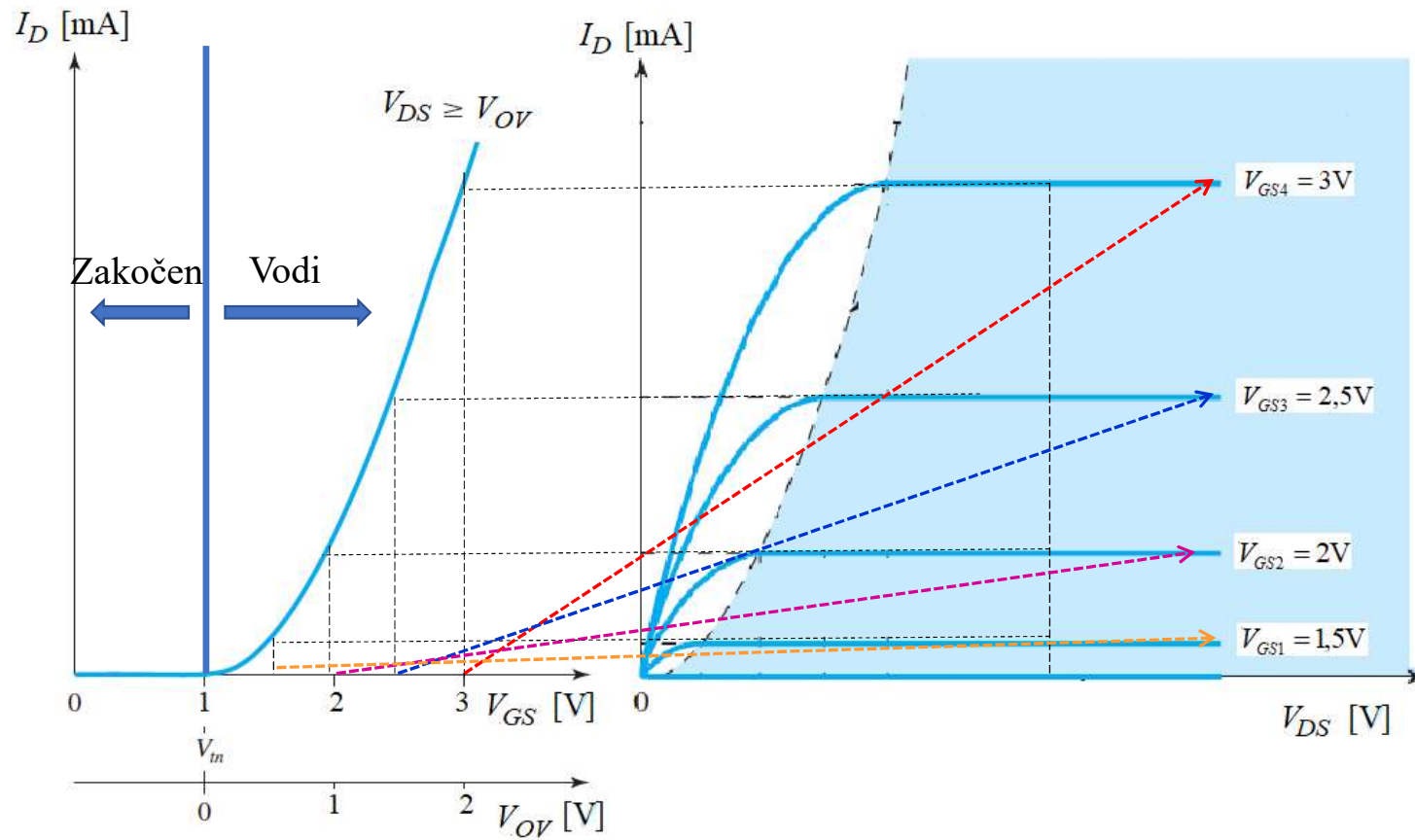
k_n' je transkonduktanski parameter
 C_{ox} je kapacitivnost gejta po jedinici površine
 μ_n je pokretljivost nosilaca naelektrisanja
 (kod n-kanalnih tranzistora pokretljivost elektrona, kod p-kanalnih šupljina)

W je širina kanala
 L je dužina kanala



Model MOS tranzistora

Da se podsetimo: Prenosna karakteristika MOSFET-a

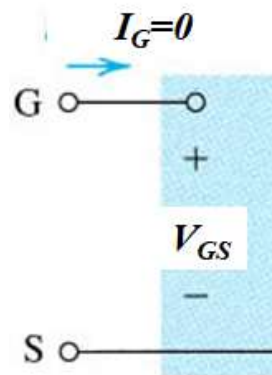


Model za velike signale - DC model u oblasti zasićenja

Na ulazu za sve oblasti važi:

$$I_G = 0$$

Model: Strujni generator $I_G = 0$; prekid u kolu



Model za velike signale - DC model u oblasti zasićenja

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

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

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

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

C_{ox} je kapacitivnost gejta po jedinici površine

μ_n je pokretljivost nosilaca naelektrisanja

W je širina kanala

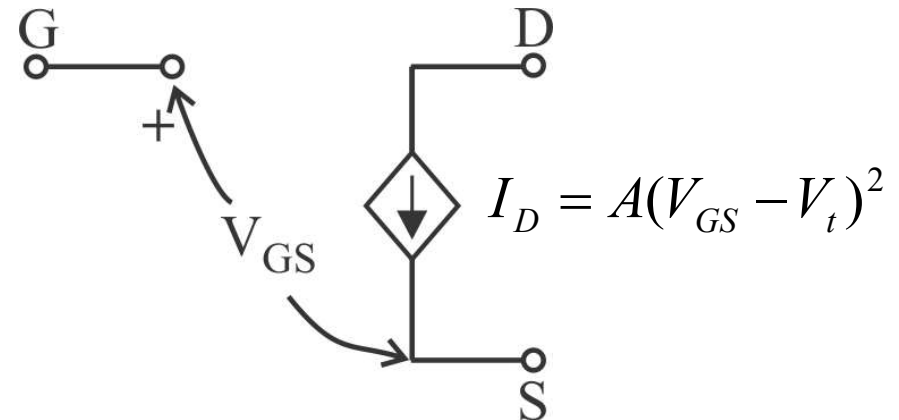
L je dužina kanala

K_n je transkonduktanski parametar koji je funkcija tehnološkog postupka (1 mA/V^2)

Model:

NELINEARNI Strujni generator

I_D kontrolisan naponom V_{GS}



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

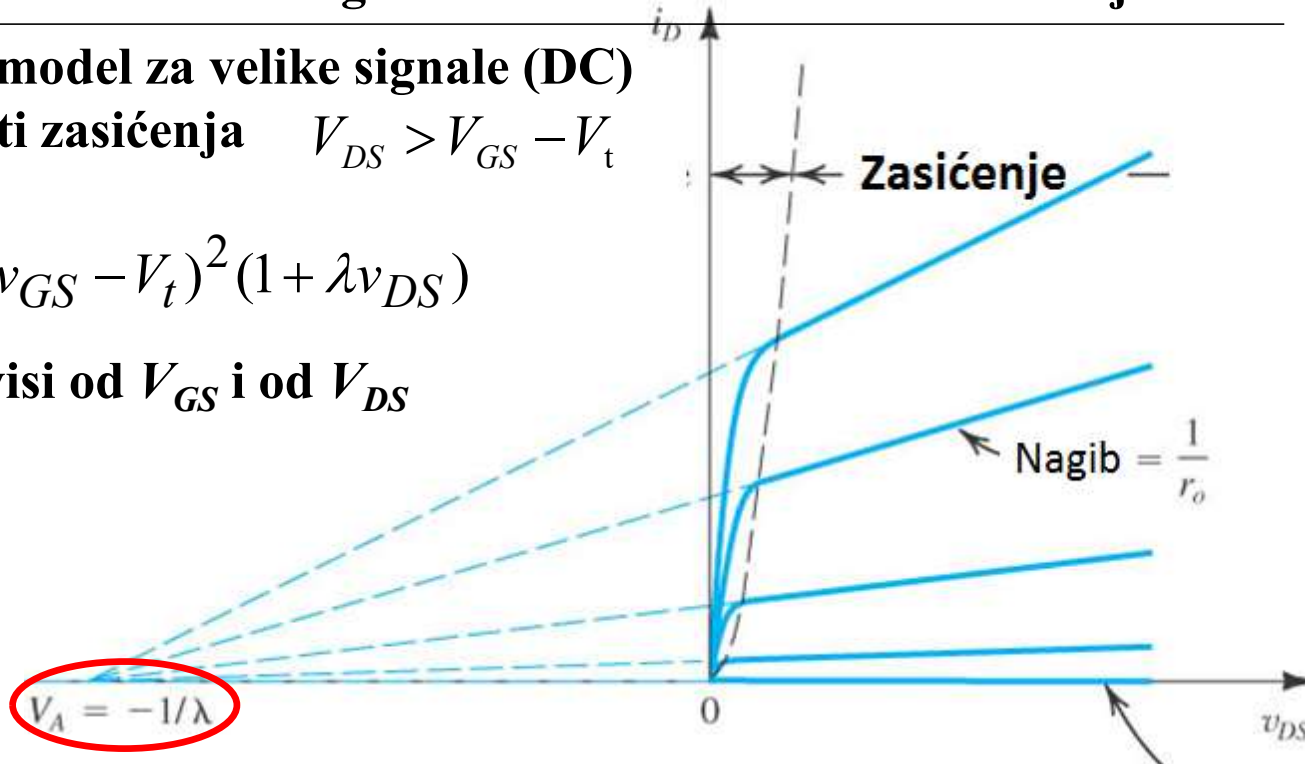
I_D **zavisi** od V_{GS}

Model za velike signale - DC model u oblasti zasićenja

Realni model za velike signale (DC)
u oblasti zasićenja $V_{DS} > V_{GS} - V_t$

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

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



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

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

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

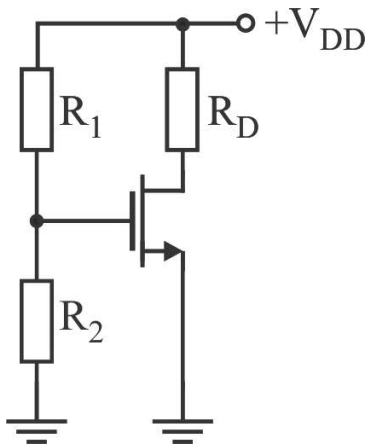
V_A je Erljev napon

λ je faktor proporcionalnosti

Jednosmerni režim rada MOSFET-a

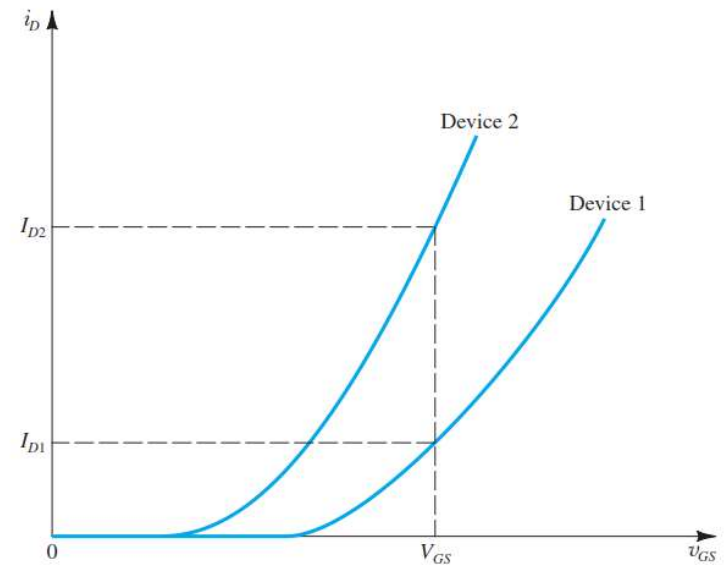
Polarizacija sa konstantnim naponom gejta

U ovom tipu polarizacije napon na gejtu, koji je jednak naponu VGS, je određen razdelnikom napona (R1 i R2). Ovim tipom polarizacije nije obezbeđena stabilnost radne tačke. Struja drejna značajno će varirati u zavisnosti od upotrebljenog tranzistora. Vrednosti parametara tranzistora sa istom fabirčkom oznakom mogu značajno da variraju.



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

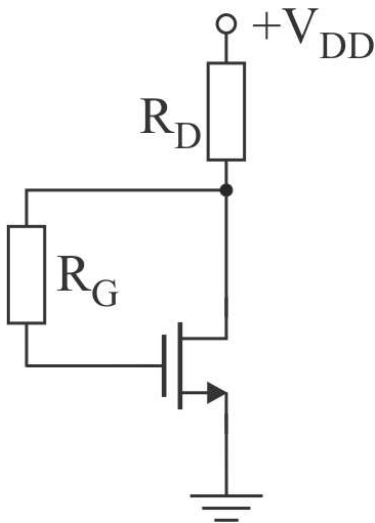
$$I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 = A \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} - V_t \right)^2$$



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 gejta i drejn ne teče jednosmerna struja tako da je praktično 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.



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

$$V_{GS} = V_D = V_{DD} - R_D I_D$$

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

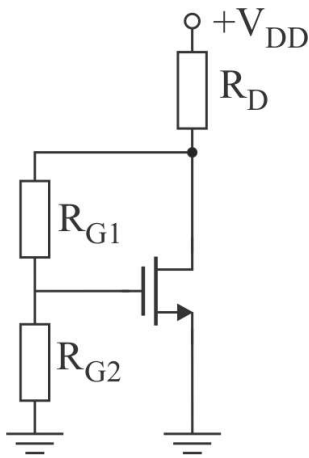
$$V_{GS} = V_{DD} - R_D \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

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 $V_{GS} > V_t$

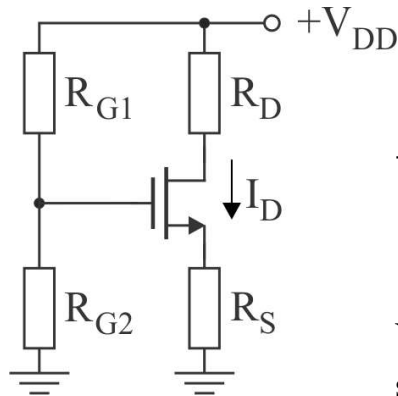
Jednosmerni režim rada MOSFET-a

Polarizacija sa četiri otpornika

Otpornikom R_S uspostavlja se povratna sprega koja stabilše radnu tačku tranzistora. Ona deluje na takav način da umanjuje promene struje drejna usled spojnjih uticaja.

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

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.



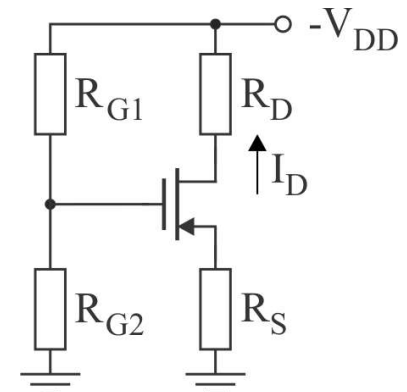
$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD}$$

$$V_S = R_S \cdot I_D$$

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

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

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

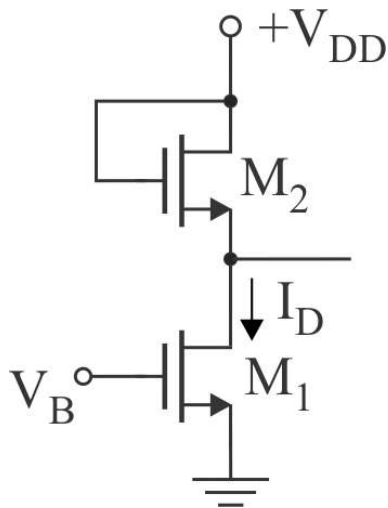
Polarizacija MOSFETA i integrisanim kolima

- 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 ($\mu_n=1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$).
- 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 opterećenje koristi n-kanalni MOSFET sa indukovanim kanalom on se povezuje na taj način da su gejt i drejn međusobno povezani. Tranzistor koji služi kao dinamičko opterećenje je uvek u režimu zasićenja (M_2 na slici).



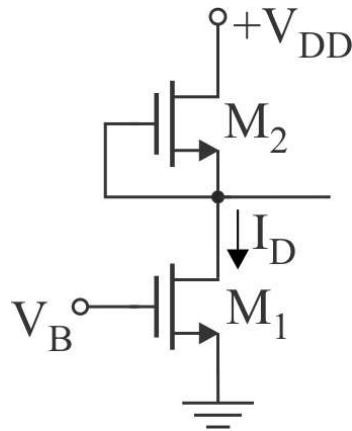
U naizmeničnom režimu transistor M_2 rpredstavlja dinamičku otpornost koja je približno jednaka recipročnoj vrednosti transkonduktanse $\frac{1}{g_{m2}}$.

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

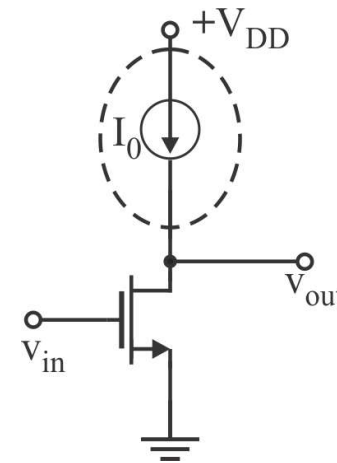
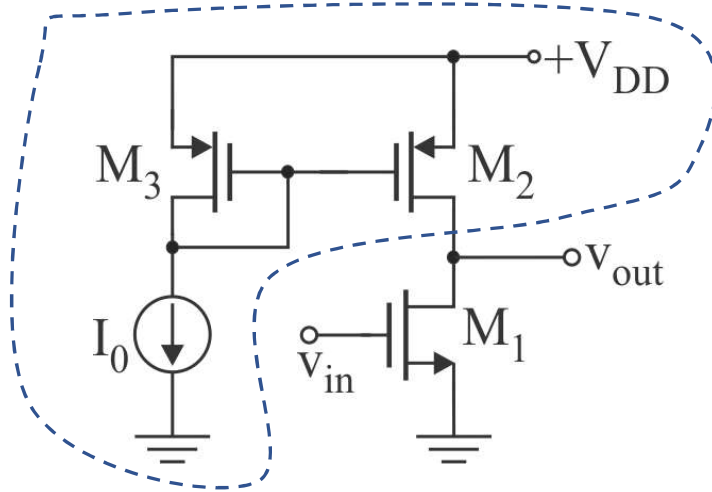
- Ukoliko se kao opterećenje koristi n-kanalni mosfet sa ugrađenim kanalom on se povezuje u kolu na taj način što su gejt i sors međusobno povezani. U naizmeničnom režimu transistor M_2 predstavlja dinamičku otpornost koja je jednaka izlaznoj otpornosti tranzistora M_2 , r_{o2} . Ovaj način polarizacije je bolji od prethodnog jer se sa njim dobija veća vrednost **dinamičke otpornosti**. Pored toga u ovoj polarizaciji veći je opseg promene izlaznog napona.



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 p-kanalni fet sa indukovanim kanalom. Polarizacija p-kanalnog feta obavlja se pomoću strujnog ogledala (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

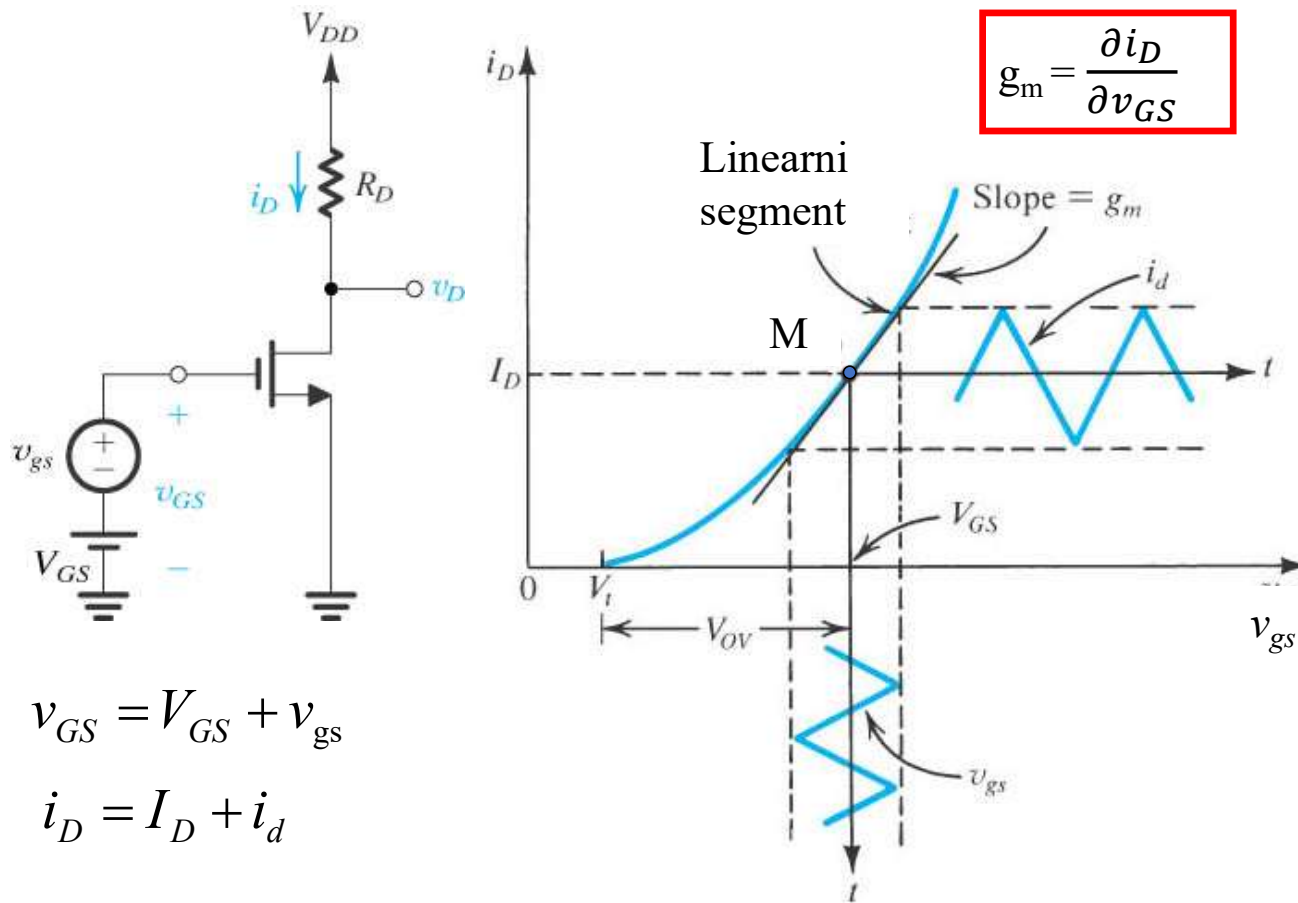
I napon praga V_t i transkonduktanski parametar k' su temperaturno zavisni. Apsolutna vrednost napona praga opada oko 2 mV pri povećanju temperature za 1°. Opadanjem napona praga dolazi do povećanja struje drejna.

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$
$$\begin{array}{l} T \nearrow \quad V_t \searrow \quad I_D \nearrow \\ T \nearrow \quad k_n' \searrow \quad I_D \searrow \end{array}$$

Transkonduktanski parametar k' opada sa temperaturom usled smanjenja pokretljivosti nosilaca naelektrisanja. Smanjenje k' ima dominantan uticaj tako da struja drejna opada sa porastom temperature. Ovo umanjeње struje drejna doprinosi stabilnosti pojačavača.

Model MOS tranzistora

Radna tačka – značenje modela za male signale



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

$$i_D = I_D + i_d$$

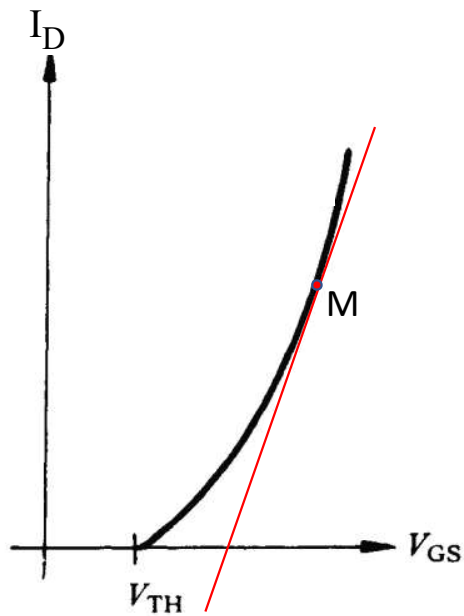
Transkonduktansa g_m , je jednaka nagibu prenosne karakteristike u mirnoj radnoj tački, M.

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



i_d v_{gs} su naizmjenične komponente napona i struja

i_D v_{GS} su ukupni napon i ukupna struja

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}$$

$$g_m \approx \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} = \frac{i_d}{v_{gs}}$$

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

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

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

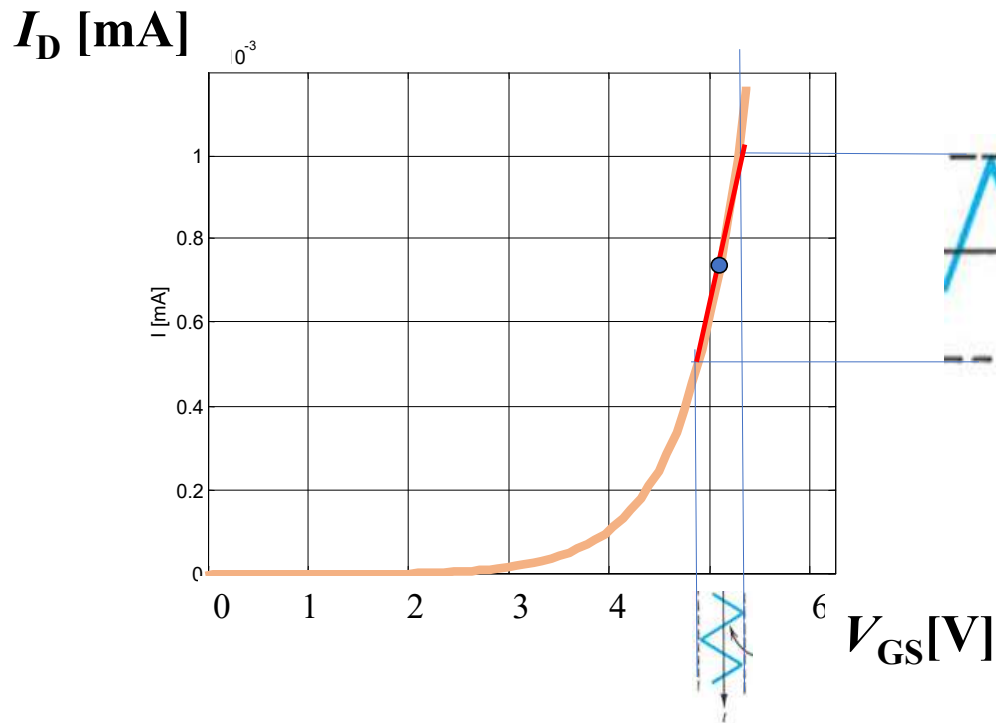
$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \approx 2 \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t) = 2 \cdot \sqrt{A \cdot I_D}$$

Model MOS tranzistora

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

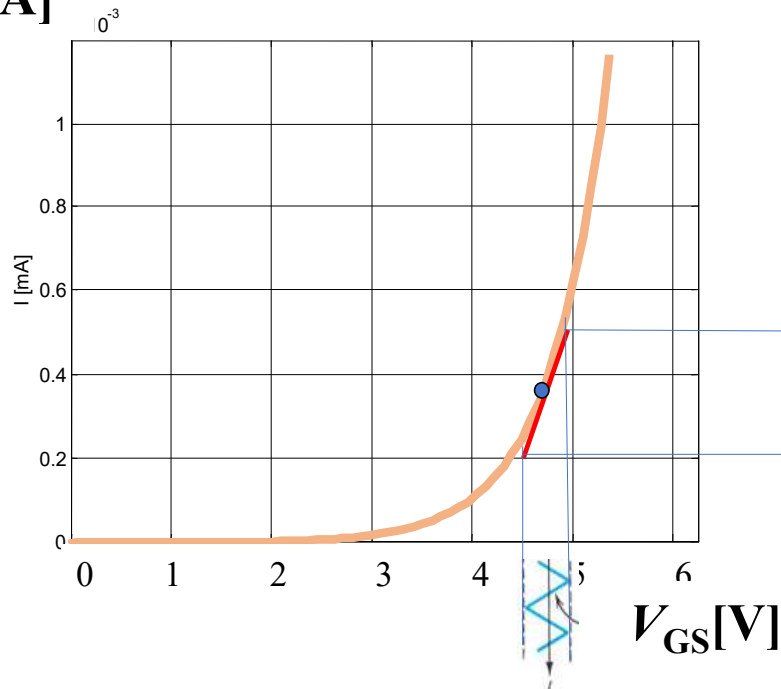
Model MOS tranzistora

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 [mA]



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

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

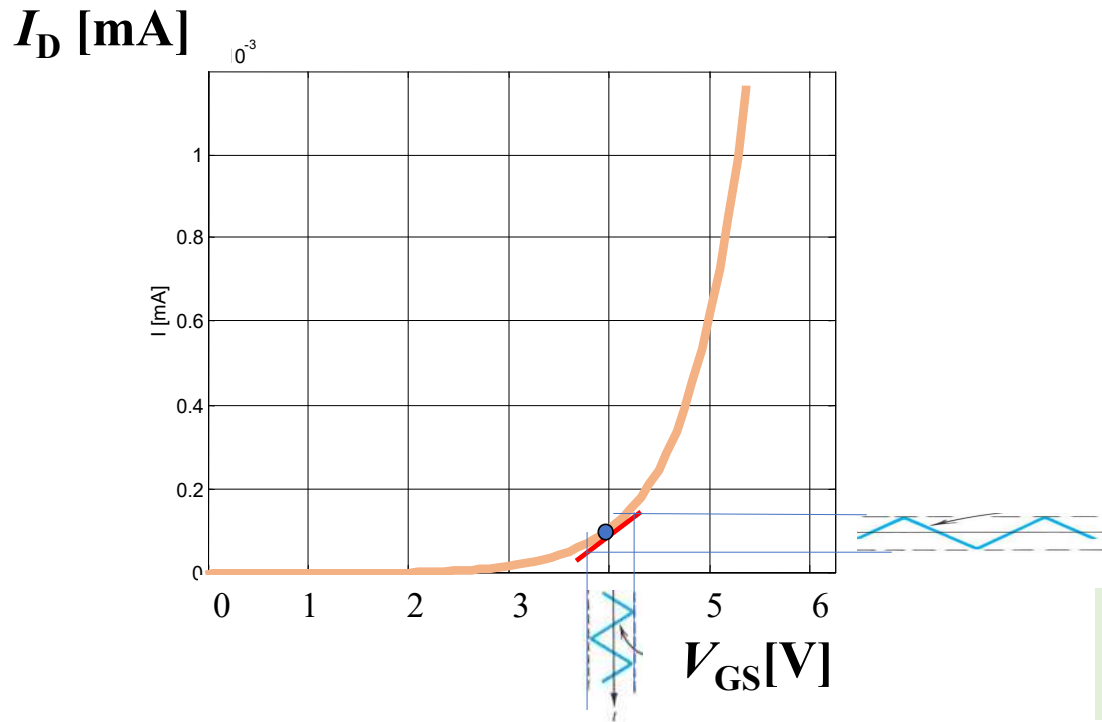
g_m ZAVISI od položaja mirne (DC) radne tačke.
Ista promena v_{gs} izazvaće različitu promenu struje i_d

Model MOS tranzistora

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

Modela za male signale u oblasti zasićenja

Izlazna otpornost MOSFET-a

Prilikom porasta napona V_{DS} dolazi do skraćivanja 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} .

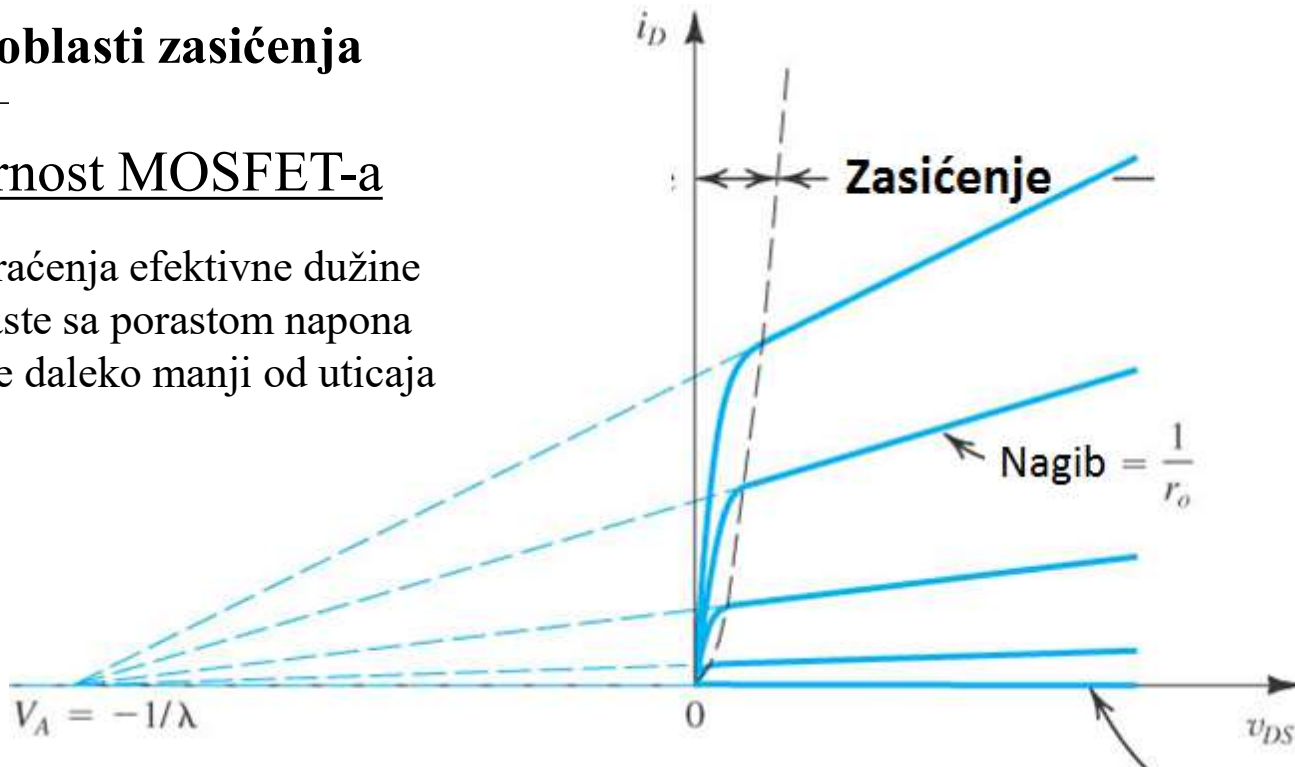
$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2 \left(1 + \frac{1}{V_A} \cdot V_{DS}\right)$$

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

V_A je Erlijev napon

λ je faktor proporcionalnosti

Izlazna otpornost r_o , je jednaka recipročnoj vrednosti nagiba izlazne karakteristike u radnoj tački, M.



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

$$r_o = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} = \frac{V_A}{I_D}$$

Model MOS tranzistora

Model za male signale (dinamički model) u oblasti zasićenja

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

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

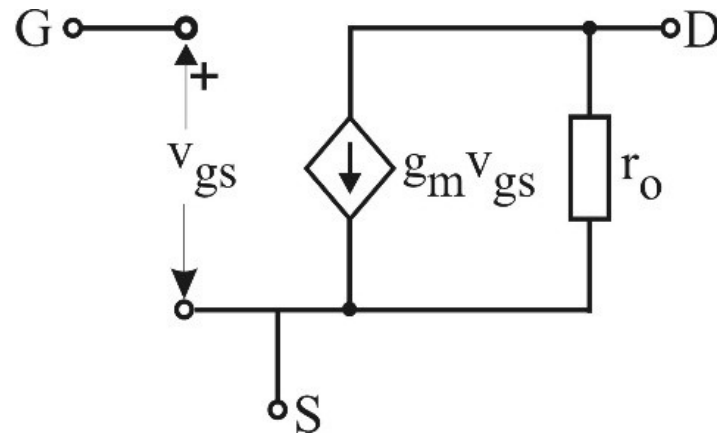
Parcijalni izvodi su dinamički parametri tranzistora:

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \quad r_o = \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D}$$

Priraštaji napona predstavljaju naizmjenične komponente: $v_{gs} = \Delta v_{GS}$ $v_{ds} = \Delta v_{DS}$ $i_d = \Delta i_D$

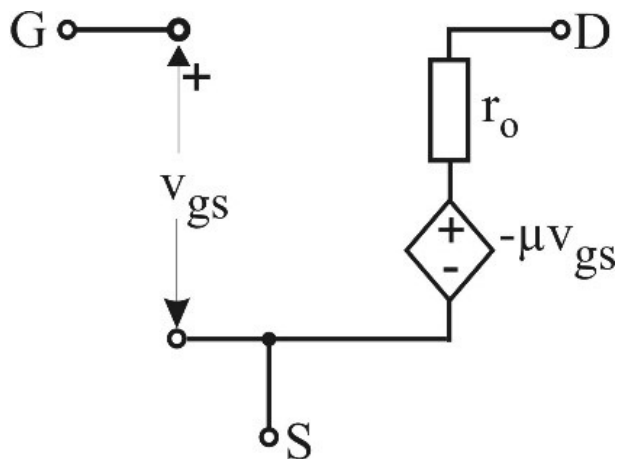
$$i_d = g_m \cdot v_{gs} + \frac{1}{r_o} \cdot v_{ds}$$

r_o izlazna otpornost
 g_m transkonduktansa



Model MOS tranzistora

Model za male signale (dinamički model) u oblasti zasićenja



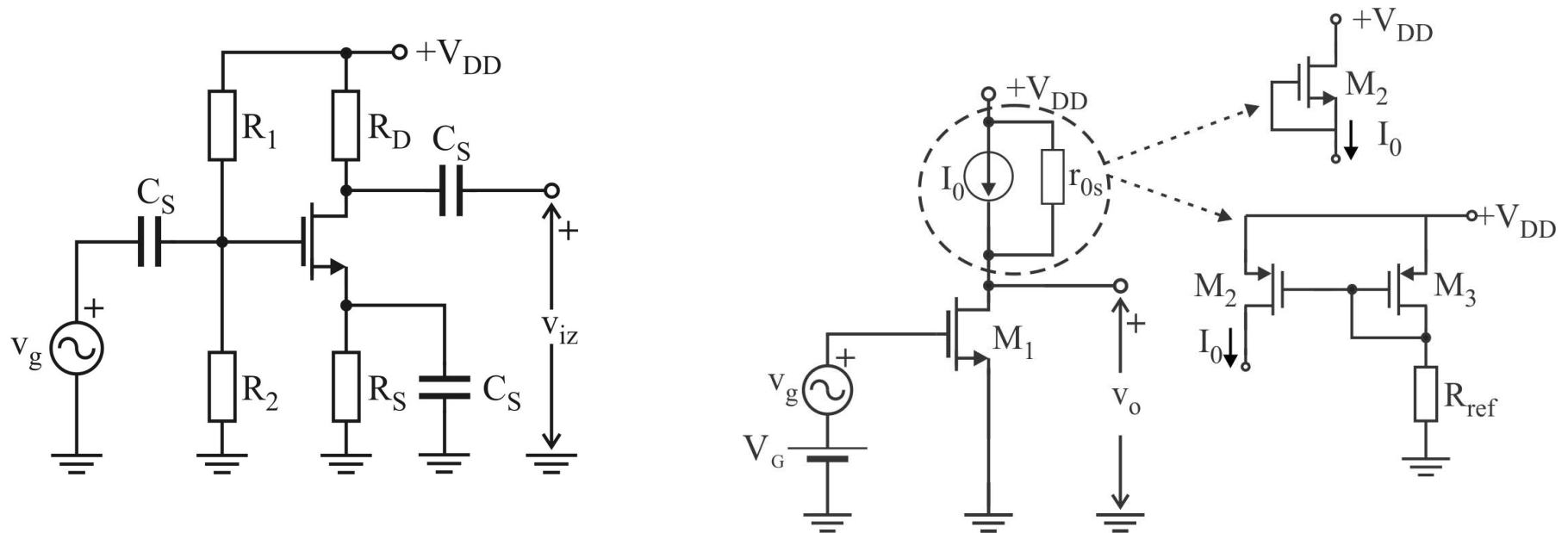
U naponskom modelu se umesto strujnog generatora kontrolisanog naponom koristi naponski generator kontrolisan naponom. Ovaj model je pogodan kada postoji mogućnost da se struja drejna odredi iz konturne jednačine.

μ je koeficijent naponskog pojačanja

μ je jednak proizvodu strmine i izlazne otpornosti.

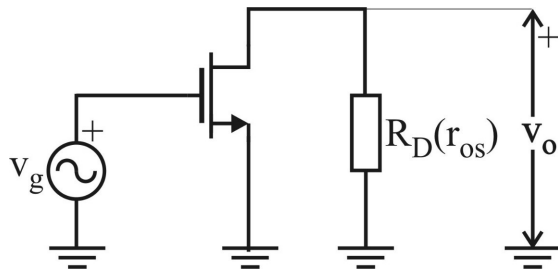
$$\mu = \frac{\partial V_{DS}}{\partial V_{GS}}$$
$$\mu = g_m \cdot r_o$$

Pojačavač sa zajedničkim sorsom



Ovo je najčešći način povezivanja MOSFET-a kao pojačavača. Ulazna elektroda je gejtl, 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 dinamičku otpornost r_{0s} . Prednost primene izvora konstantne struje u odnosu na otpronik je znatno veća vrednost otpornosti $r_{0s} \gg R_D$.

Pojačavač sa zajedničkim sorsom



$$R_D \ll r_o$$

$$v_{gs} = v_g$$

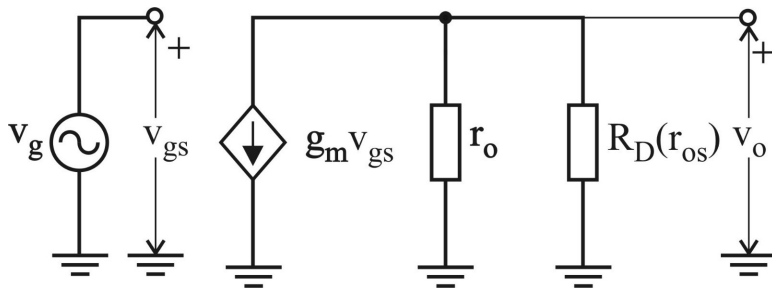
$$v_o = -g_m \cdot v_{gs} \cdot (r_o \parallel R_D \parallel R_S)$$

Naponsko pojačanje pojačavača, A_o :

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

Naponsko pojačanje pojačavača sa kapacitivnom spregom:

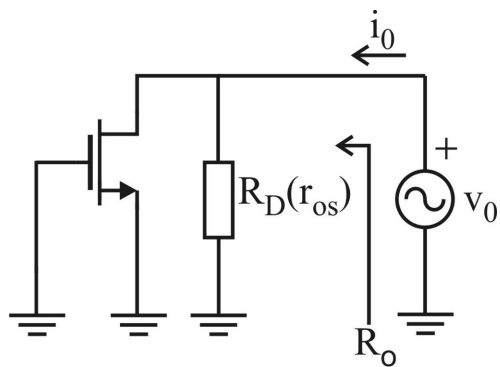
$$A_o \approx -g_m \cdot R_{DS}$$



Naponsko pojačanje direktno spregnutog pojačavača:

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

Pojačavač sa zajedničkim sorsom



$$v_{gs} = 0$$

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

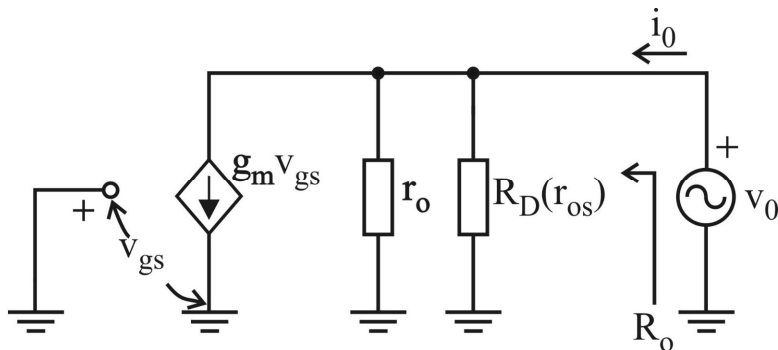
Izlazna otpornost za pojačavač sa kapacitivnom spregom:

$$R_D \ll r_o$$

$$R_o = r_o \parallel R_D \approx R_D$$

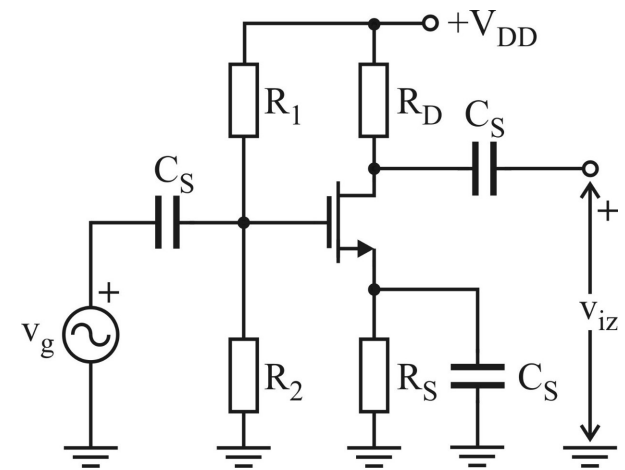
Izlazna otpornost za direktno spregnuti pojačavač, odnosno pojačavač koji koristi aktivno opterećenje:

$$R_o = r_o \parallel r_{os}$$

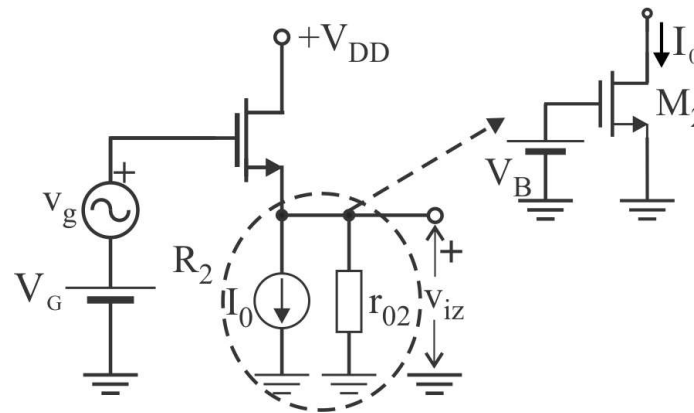
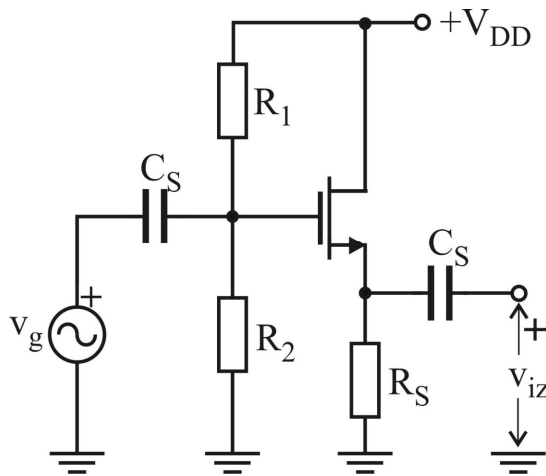


Pojačavač sa zajedničkim sorsom

- 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.

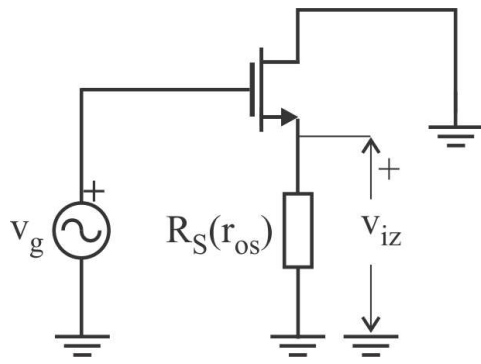


Pojačavač sa zajedničkim drejnom



Ulazna elektroda je gejt, izlazna sors a zajednička elektroda je drejn. Kada se koristi kapacitivna sprega tranzistor se polarise 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



$$v_{gs} = v_g - v_o$$

$$v_o = g_m \cdot v_{gs} \cdot r_o \parallel R_S$$

$$A_o = \frac{v_o}{v_g} = \frac{g_m \cdot r_o \parallel R_S}{1 + g_m \cdot r_o \parallel R_S}$$

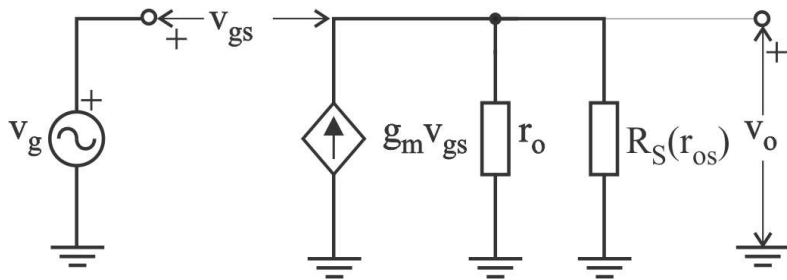
Naponsko pojačanje pojačavača sa kapacitivnom spregom:

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

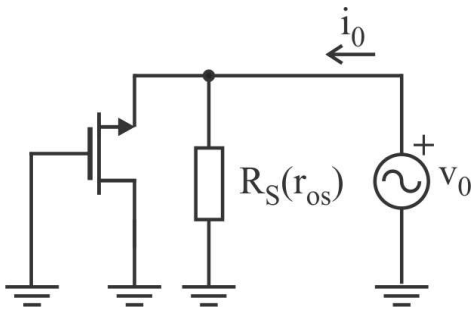
Naponsko pojačanje direktno spregnutog pojačavača:

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

Naponsko pojačanje je uvek manje od 1.



Pojačavač sa zajedničkim drejnom



$$v_{gs} = -v_0$$

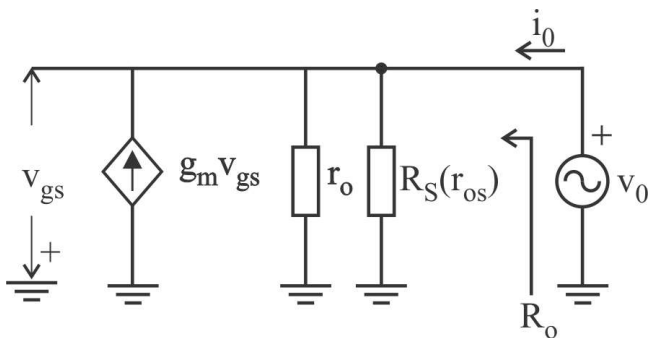
$$i_o = -g_m \cdot v_{gs} + \frac{v_o}{r_o} + \frac{v_o}{R_S}$$

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

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

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

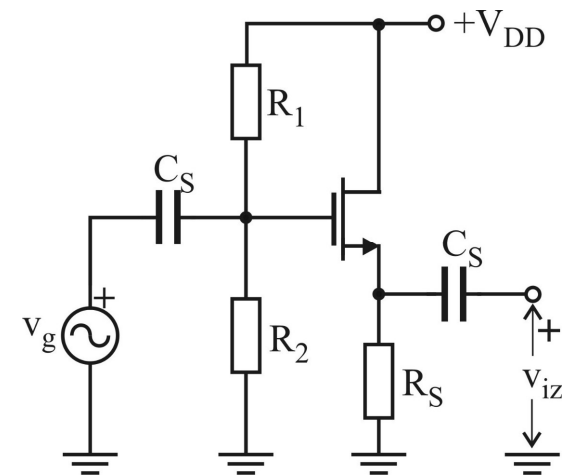
$$R_o \approx \frac{1}{g_m}$$



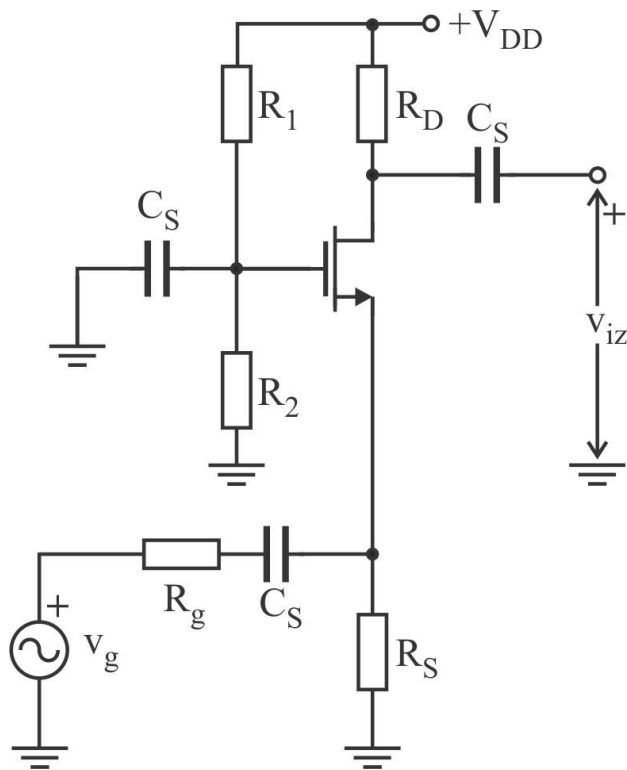
Izlazna otpornost ima malu vrednost. Red veličine recipročne transkonduktanse je nekoliko stotina oma.

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

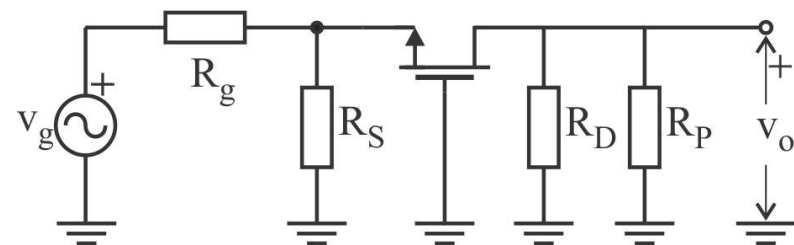
- Pojačavač sa zajedničkim drejnom ne pojačava napon. Naponsko pojačanje je manje od 1 i veoma blizu jediničnog.
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).
- Izlazna otpornost je vrlo mala i približno jednaka recipročnoj vrednosti strmine.
- Kao i kod pojačavača sa zajedničkim sorsom ulazna 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.



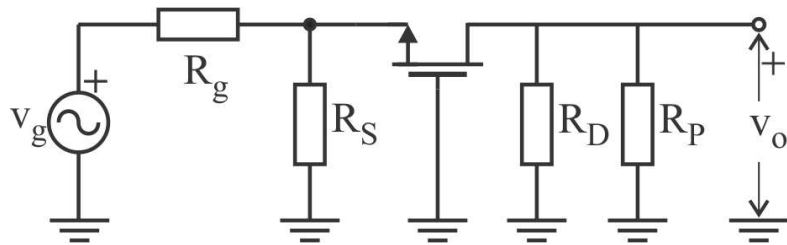
Pojačavač sa zajedničkim gejtom



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



Pojačavač sa zajedničkim gejtom

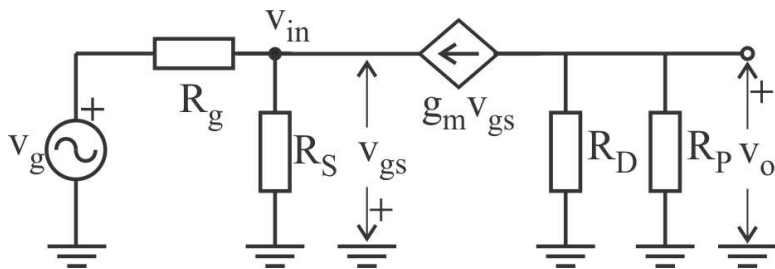


Ekvivalentna otpornost između izlaznih priključaka tranzistora, drejna i gejta iznosi:

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

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

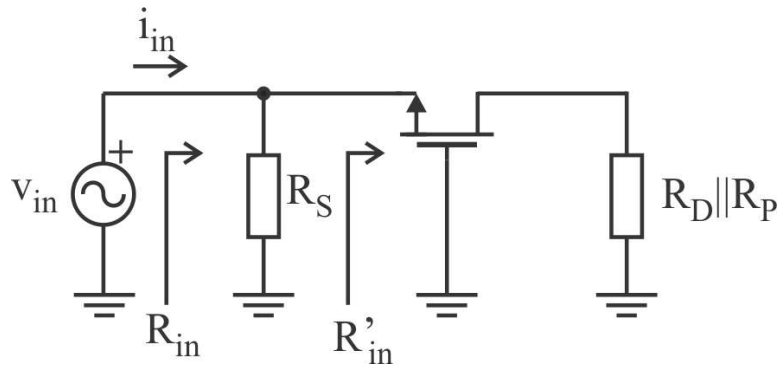
$$A_o = -\frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{v_o}{v_{gs}} = R_{DG} \cdot g_m$$



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



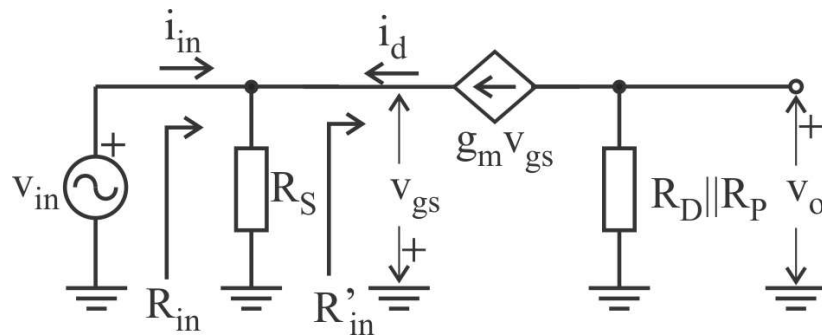
$$-i_{in} + \frac{v_{in}}{R_S} - g_m \cdot v_{gs} = 0$$

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

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

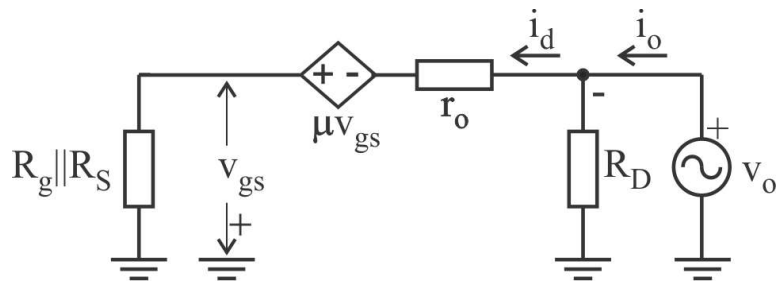
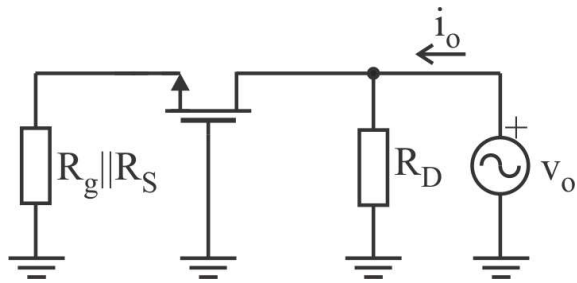
$$R_{in} = R'_{in} || R_S \approx R'_{in}$$

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



Ulazna otpornost je veoma mala, reda stotinak oma.

Pojačavač sa zajedničkim gejtom



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

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

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

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

$$R_o = R'_o \parallel R_D$$

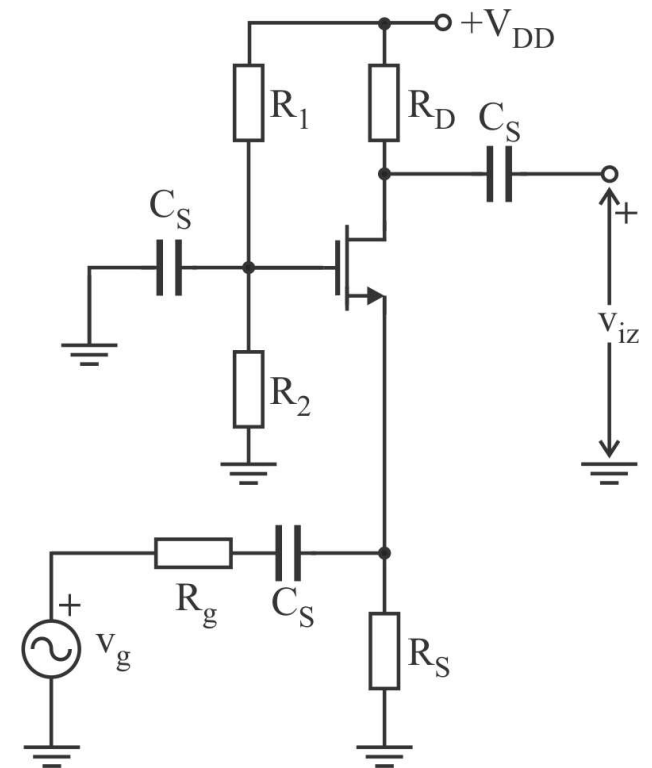
$$R'_o \gg R_D$$

$$R_o \approx R_D$$

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

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

- Naponsko pojačanje zavisi od otpornosti potrošača. Što je otpornost potrošača veća 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.
- Koristi se 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°	$-g_m \cdot R_{DS}$	$R_G = R_1 \parallel R_2$	R_D
Zajednički sors sa aktivnim opterećenjem	180°	$-g_m \cdot (r_o \parallel r_{os})$	∞	$r_o \parallel r_{os}$
Zajednički drejn	0°	≈ 1	$R_G = R_1 \parallel R_2$	$\frac{1}{g_m}$
Zajednički gejt	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 je manje osetljiv na promene temperature u odnosu na bipolarni transistor.
- MOSFET pojačavači pokazuju bolje karakteristike na visokim frekvencijama zbog manjih vrednosti parazitskih 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 elektrostatickog pražnjenja.

Poređenje MOSFET i bipolarnih pojačavača

Bipolar: g_m increases linear with current

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

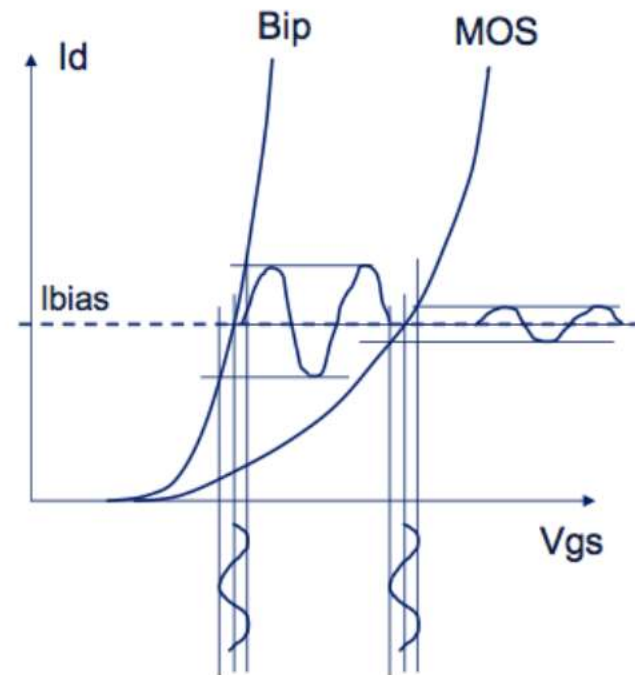
$$g_m = \frac{d I_C}{d V_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$$

MOS: g_m increases with squareroot of current

$$I_d = k \cdot \frac{w}{l} \cdot (V_{gs} - V_{th})^2$$

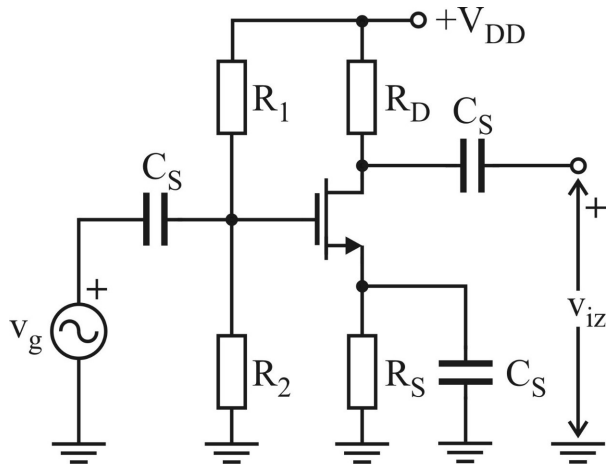
$$g_m = \frac{d I_d}{d V_{be}} = k \cdot \frac{w}{l} \cdot 2 \cdot (V_{gs} - V_{th})$$

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



bipolar transistor will achieve more g_m

Poređenje MOSFET i bipolarnih pojačavača



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

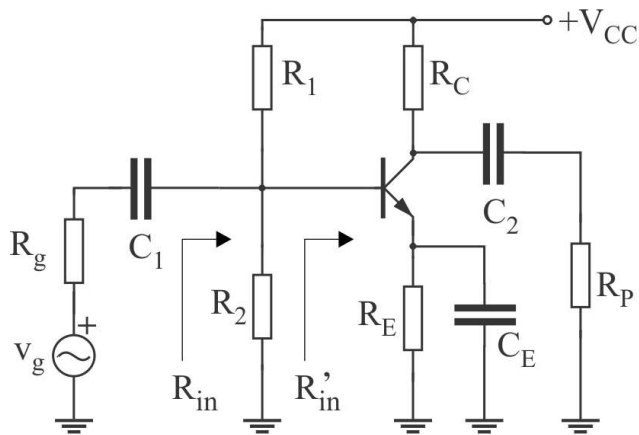
$$I_D \cdot R_D \approx \frac{V_{DD}}{2} \quad g_m = \frac{2 \cdot I_D}{V_{GS} - V_{tn}}$$

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

$$A_o \approx V_{DD}$$

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.



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

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

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

Elementarna pitanja

1. Režimi rada MOSFET-a.
2. Model MOSFET-a za velike signale u režimu zasićenja.
3. Model MOSFET-a za male signale.

Ostala ispitna pitanja

4. Definicija transkonduktanse i izvođenje izraza za transkonduktansu u funkciji struje drejna.
5. Definicija izlazne otpornosti i izvođenje izraza za izlaznu otpornost u funkciji struje drejna.
6. Polarizacija MOSFET-a otpornicima (električne šeme za polarizaciju sa: konstantnim naponom G, polarizaciju sa otpornikom između G i D, polarizaciju sa 4 otpornika).
7. Polarizacija MOSFET-a aktivnim opterećenjima (električne šeme za: automatsku polarizaciju sa MOSFET tranzistorom, polarizaciju sa strujnim izvorom).
8. Pojačavač sa zajedničkim sorsom (izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine).
9. Pojačavač sa zajedničkim drejnom (izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
10. Pojačavač sa zajedničkom gejtom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)