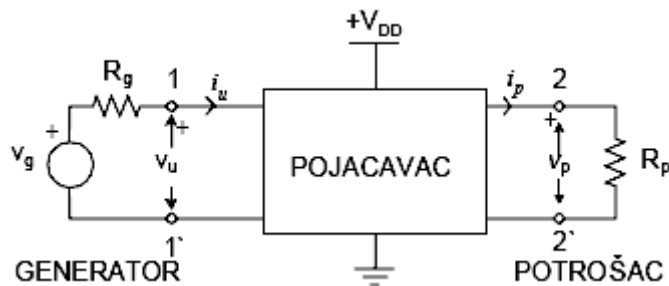
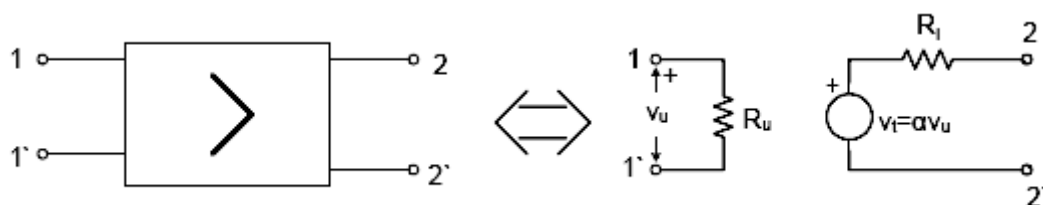


9 Pojačavači sa MOS tranzistorima

Funkcija pojačavača je da obezbedi povećanje amplitude ulaznog signala bez promene oblika signala u vremenu. Matematički, pojačanje je zapravo množenje ulaznog signala sa konstantom.

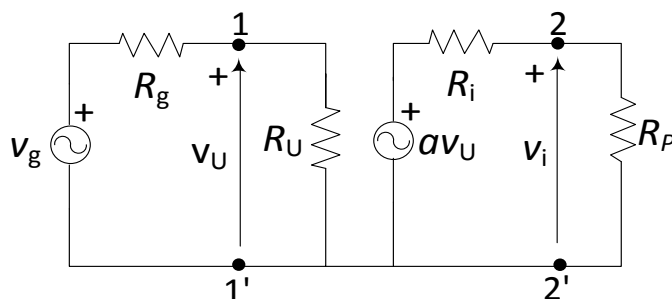


Blok šema pojačavača



Ekvivalentno kolo unilateralnog pojačavača

Ulazna otpornost R_U , izlazna otpornost R_I i napon praznog hoda pojačavača $v_t = av_U$ određuju se primenom Tevenenove teoreme.

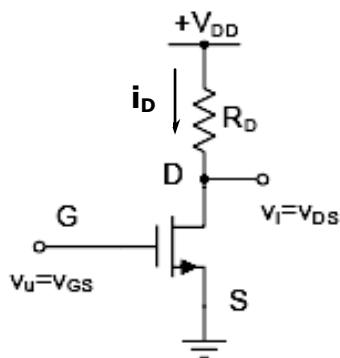


$$v_U = \frac{R_U}{R_U + R_g} v_g = \frac{1}{1 + R_g / R_U} v_g, \text{ za } R_U \gg R_g \text{ dobija se } v_U \approx v_g.$$
 Zato je poželjno da ulazna otpornost naponskog pojačavača bude što veća.

$$v_i = \frac{R_p}{R_p + R_i} av_U = \frac{1}{1 + R_i / R_p} av_U, \text{ za } R_i \ll R_p \text{ sledi } v_i \approx av_U.$$
 Zato je poželjno da izlazna otpornost naponskog pojačavača bude što manja.

- MOS pojačavač u sprezi sa zajedničkim sorsom ZS**

Sors je zajednička elektroda za ulazno i izlazno kolo ($S \equiv 1' = 2'$) – otuda potiče naziv. Ulaz je na gejtu ($G \equiv 1$), a izlaz na drejnu ($D \equiv 2$).



Radna prava – skup svih mogućih položaja MRT Q – za kolo sa slike, određena je jednačinom naponske ravnoteže

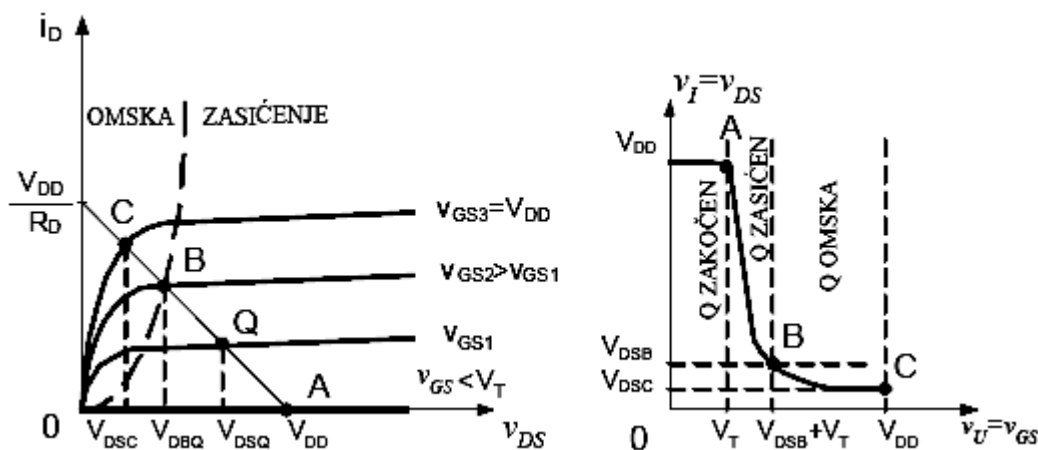
$$i_D = \frac{V_{DD} - v_{DS}}{R_D} \quad \text{i ucrtana u polje statičke izlazne}$$

karakteristike MOS tranzistora. Napon $v_U = v_{GS}$ određuje konkretan položaj mirne radne tačke na radnoj pravoj.

Tako je za $v_U = v_{GS} < V_T$ MOS tranzistor zakočen, jer nije formiran kanal u podlozi ispod gejta, pa je $i_D = 0$, a MRT se nalazi u položaju A na slici.

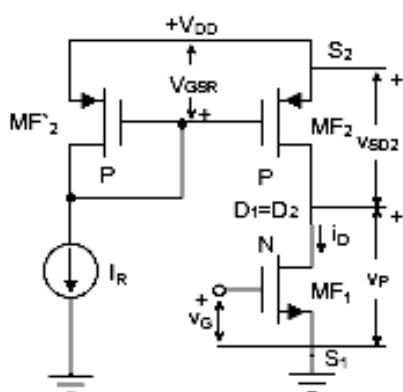
Za $V_T < v_U = v_{GS} < V_{GS2}$, radna tačka se nalazi negde između položaja A i B, a tranzistor radi u režimu zasićenja. Položaj tačke B određen je uslovom stiskanja kanala na strani drejna: $v_{GD_B} = V_T = v_{GS_B} - v_{DS_B}$, odnosno $v_{U_B} = v_{GS_B} = V_T + v_{DS_B}$.

Za $V_{GS2} < v_U = v_{GS} < V_{DD}$ mirna radna tačka se nalazi između tačaka B i C na slici, a tranzistor radi u omskoj oblasti. Tačka C određena je presekom radne prave i statičke karakteristike tranzistora za $v_{GS} = V_{DD}$.



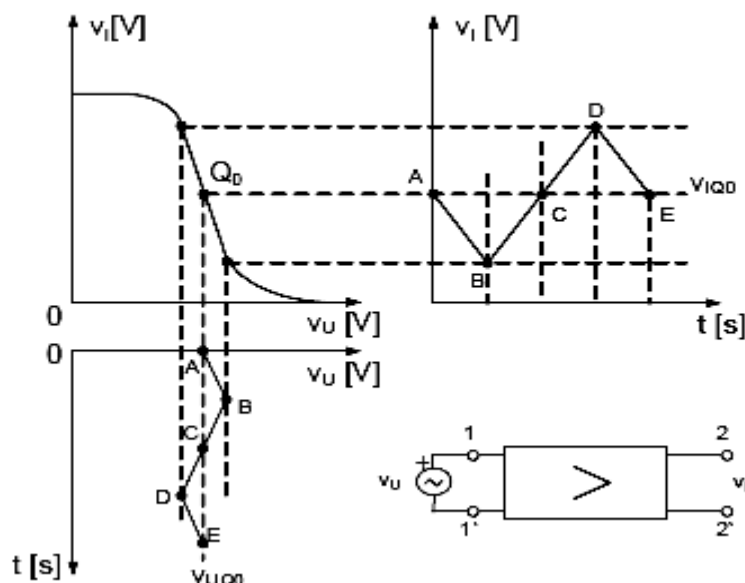
Statička i prenosna karakteristika pojačavača sa prethodne slike

Na osnovu prethodne analize konstruisana je prenosna karakteristika pojačavača – zavisnost izlaznog od ulaznog napona, $v_I = f(v_U)$. Prenosna karakteristika se može odrediti i analitički kada se za svaku oblast rada koristi odgovarajuća veza između struje drejna i_D i napona v_{GS} i v_{DS} .



U integrisanim kolima se umesto otpornika R_D u kolu drejna koristi aktivno opterećenje, kao kod komplementarnog CMOS pojačavača sa slike. P kanalni MOSFET sa indukovanim kanalom MF_2 predstavlja aktivno opterećenje NMOSFET-a MF_1 . PMOSFET MF_2 se polariše preko strujnog ogledala koje čine tranzistori identičnih karakteristika, MF_2 i MF_2' . Strujno ogledalo preslikava struju I_R na NMOSFET MF_1 određujući tako struju njegove mirne radne tačke. Primetimo da PMOSFET MF_2 radi u zasićenju, jer mu je napon između drejna i gejta uvek nula.

Prenosna karakteristika pojačavača (zavisnost izlaznog od ulaznog napona) je izuzetno pogodna za analizu rada pojačavača i određivanje opsega u kome se vrši pojačavanje signala bez izobličenja (linearni opseg).

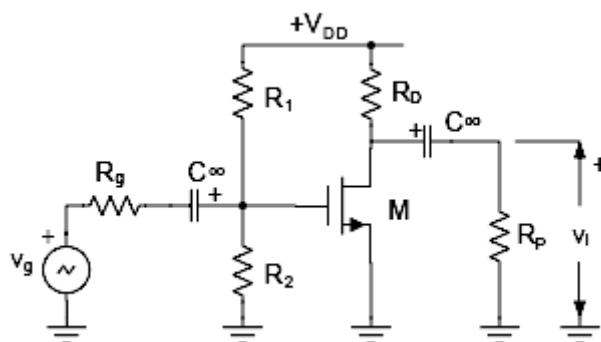


Na slici je prikazan idealni pojačavač sa prenosnom karakteristikom. Ilustrovano je postavljanje mirne radne tačke i grafičko određivanje pojačanja u linearnom režimu rada.

Mirna radna tačka Q_0 pojačavača postavlja se pomoću jednosmernog kola za polarizaciju na sredinu strmog, nelinearnog dela prenosne karakteristike. Tako se obezbeđuje maksimalni opseg za pojačavanje simetričnih ulaznih signala (npr. sinusnih) bez izobličenja.

Opseg vrednosti ulaznog napona za koji nema izobličenja zavisi od oblika prenosne karakteristike i položaja mirne radne tačke.

Podrazumeva se da se korisni, trougaoni ulazni napon, koji se pojačava, superponira (sabira) sa jednosmernim naponom u MRT Q_0 . Sabiranje, odnosno dovođenje malog, promenljivog, naizmeničnog signala na ulaz pojačavača vrši se posredstvom spreznog kondenzatora, kao što je pokazano na sledećoj potpunoj šemi pojačavača sa ZS.



Potpuna šema MOS pojačavača sa zajedničkim sorsom

Otpornici R_1 i R_2 određuju položaj mirne radne tačke Q definisanjem napona

$V_{GSQ} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_{DD}$. Sprezni kondenzator C_∞ , velike kapacitivnosti, služi za dodavanje

malog, promenljivog, korisnog signala v_g naponu gejta, tako da se jednosmerni napon gejta $V_{GS} = V_{GSQ}$ ne promeni.

Pre priključenja korisnog signala (kada je $v_g = 0$), kondenzator se napunio do napona $u_{C\infty} = V_{GSQ}$. Neka je korisni signal simetričan i bipolaran, sa nultom srednjom vrednošću. Ako je kapacitivnost spreznog kondenzatora dovoljno velika, vremenska konstatna punjenja kondenzatora tokom pozitivne poluperiode, odnosno pražnjenja tokom negativne poluperiode, biće dovoljno velika da se napon na kondenzatoru praktično ne promeni, održavajući tako konstantan jednosmerni napon na gejtu.

Identičnu funkciju razdvajanja naizmeničnog i jednosmernog signala ima i izlazni sprežni kondenzator C_∞ između potrošača R_p i drejna MOSFET-a koji obezbeđuje da do potrošača stiže samo pojačani naizmenični signal.

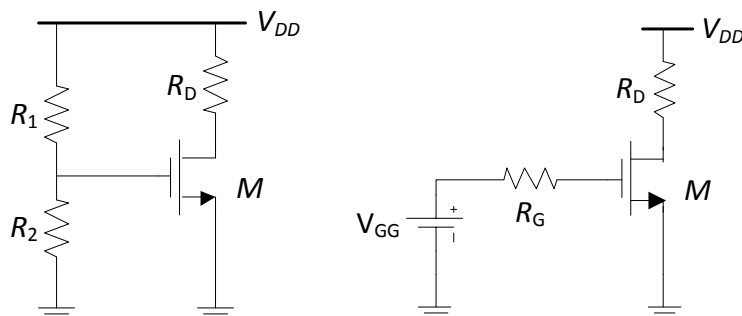
• Analiza rada MOS pojačavača sa ZS pomoću modela za male signale

Prenosna karakteristika daje potpuni uvid u ponašanje pojačavača kada se ulazni signal menja po amplitudi. Jednosmerno kolo za polarizaciju služi da postavi mirnu radnu tačku u željeni deo karakteristike. Ako je mirna radna tačka postavljena na sredinu strmog, linearnog dela prenosne karakteristike, a amplituda ulaznog signala dovoljno mala da pri pomeranju radna tačka ne napusti linearni segment, ostvareno je linearno pojačavanje ulaznog signala.

Ako je amplituda ulaznog signala velika i menja se u opsegu od $v_U = 0$ do $v_U = V_{DD}$ izlazni signal će se menjati u opsegu od $v_I = V_{DD}$ do $v_I = 0$ (videti prenosnu karakteristiku). Ovakav režim rada se naziva prekidački režim, jer je izlaz pojačavača ili na masi, $v_I = 0$, ili na naponu napajanja, $v_I = V_{DD}$. Prekidački režim se koristi u impulsnoj i digitalnoj elektronici.

Određivanje linearnog pojačanja pojačavača može se vršiti grafičkim putem (preko statičkih karakteristika), analitičkim putem (koristeći izraze koji povezuju napone i struje tranzistora) ili pomoću tzv. modela tranzistora za male signale u okolini mirne radne tačke. Analiza rada pojačavača sa ZS sa prethodne slike pomoću modela za male signale odvija se u 3 koraka.

➤ **1. korak:** Koristeći princip superpozicije, rešavanjem kola za velike signale (jednosmerni režim) odrede se parametri mirne radne tačke.

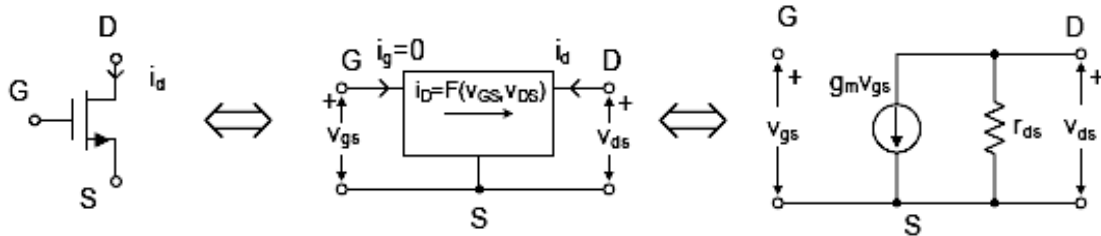


Ekvivalentno kolo za velike signale pojačavača sa ZS sa prethodne slike

Određivanje položaja mirne radne tačke Q vrši se rešavanjem ekvivalentnog kola za „velike signale“, kako je već pokazano u odeljku o polarizaciji MOSFET-ova. Radi kompletnosti postupak cemo ukratko ponoviti.

$V_{GG} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_{DD}$ i $R_G = R_1 \parallel R_2$ su parametri ekvivalentnog Tevenenovog generatora u kolu gejta. Kako kroz R_G ne protiče struja (nema struje gejta kod FET-a), a sors je na masi, to je napon između gejta i sorsa u mirnoj radnoj tački, $V_{GSQ} = V_{GQ} - V_{SQ} = V_{GQ}$. Pretpostavljajući da tranzistor radi u režimu zasićenja, struja drejna u mirnoj radnoj tački je onda $I_{DQ} = \frac{K}{2}(V_{GSQ} - V_T)^2 = \frac{K}{2}(V_{GG} - V_T)^2$. Napon drejna je tada $V_{DQ} = V_{DD} - I_{DQ}R_D$. Sada je još potrebno proveriti da li je $V_{GDQ} = V_{GQ} - V_{DQ} < V_T$, čime se potvrđuje da tranzistor radi u zasićenju.

➤ **2. korak:** Određivanje parametara modela za male signale kojim će se zameniti MOS tranzistor. Model za male signale je četvoropol čiji parametri povezuju promenljive komponente napona i struja tranzistora u okolini mirne radne tačke i određuju se diferenciranjem statičkih karakteristika u okolini MRT.



Model MOS tranzistora za male signale

U ulaznom kolu nema struje gejta ($i_G = 0$), pa se između gejta i sorsa nalazi otvorena veza na čijim krajevima je napon v_{GS} . U izlaznom kolu su dva parametra: zavisini strujni izvor $g_m \cdot v_{GS}$ (g_m – transkonduktansa) i izlazna dinamička otpornost r_{ds} .

Kako je u režimu zasićenja MOS tranzistora $i_D = \frac{K}{2}(v_{GS} - V_T)^2(1 + \lambda \cdot v_{DS})$, diferenciranjem u okolini mirne radne tačke Q dobija se:

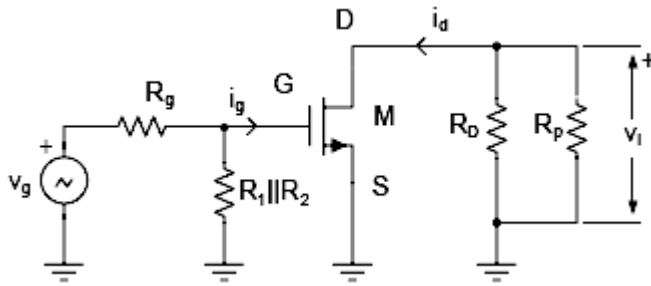
$$di_D = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_Q \cdot dv_{GS} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right|_Q \cdot dv_{DS} = g_m \cdot dv_{GS} + \frac{1}{r_{ds}} \cdot dv_{DS}.$$

Transkonduktansa g_m je onda $g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{DS}=\text{const}} = 2 \frac{K}{2} (v_{GSQ} - V_T)(1 + \lambda v_{DSQ})$, što uz $v_{DS}=\text{const.}$ i zanemarivanje modulacije kanala ($\lambda = 0$) zbog male promene napona v_{GD} uzrokovane malom promenom napona v_{GS} , daje $g_m = K(v_{GSQ} - V_T) = \sqrt{2KI_{DQ}}$, gde je I_{DQ_0} struja drejna u mirnoj radnoj tački Q.

Dalje je $\frac{1}{r_{ds}} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right|_{v_{GS}=\text{const}} = \frac{K}{2} (v_{GSQ} - V_T)^2 \cdot \lambda = \lambda \cdot I_{DQ}$, pa je onda izlazna otpornost

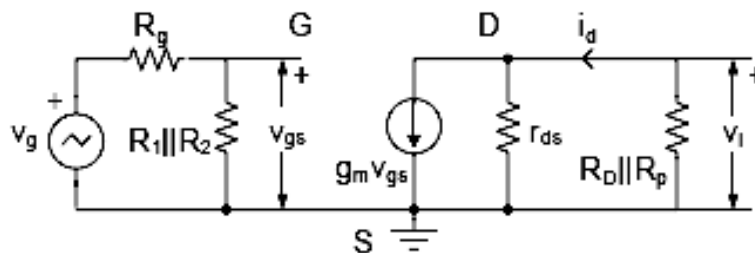
$r_{ds} = \frac{1}{\lambda \cdot I_{DQ}}$, što ako $\lambda \rightarrow 0$ daje $r_{ds} \rightarrow \infty$. Primitimo još jednom da parametri modela za male signale direktno zavise od položaja MRT Q koja je postavljena polarizacijom tranzistora u prethodnom koraku.

➤ **3. korak:** Koristeći princip superpozicije tražene veličine se određuju rešavanjem ekvivalentnog kola za male signale u kome je tranzistor zamenjen modelom za male signale u okolini MRT. Parametri modela su određeni u prethodnom koraku.



Formiranje kola za male signale. Sve nezavisne jednosmerne pobude u kolu se poništavaju (naponski izvori se kratko prespoje, a strujni izvori otvore). Svi sprežni kondenzatori (C_∞) se kratko prespoje, a sve eventualne induktivnosti (L_∞) se otvore.

Zamenom tranzistora modelom za male signale konačno se dobija ekvivalentno kolo pojačavača za male signale:



Zamenom izraza $v_{GS} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_g + R_1 \parallel R_2} v_g$ i $i_D = g_m v_{GS} + \frac{v_i}{r_{ds}}$ u izraz za izlazni napon

$v_i = -(R_D \parallel R_p) i_D$ i sređivanjem dobija se naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{v_i}{v_g} = - \frac{R_1 \parallel R_2}{R_g + (R_1 \parallel R_2)} g_m \frac{r_{ds} \cdot (R_D \parallel R_p)}{r_{ds} + (R_D \parallel R_p)}.$$

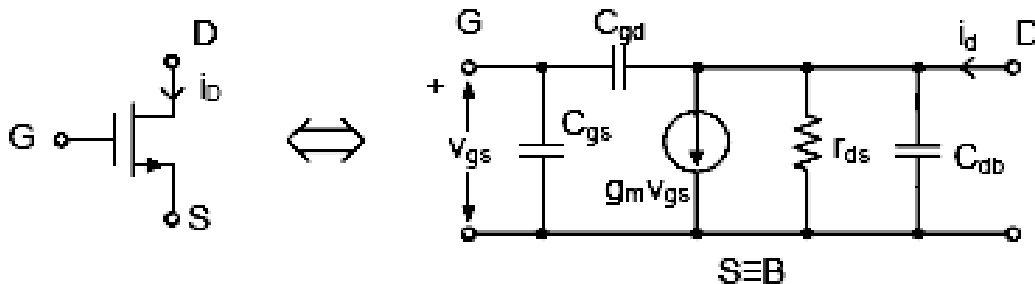
Za $R_g \rightarrow 0$ i $r_{ds} \gg R_D \parallel R_p$ što je karakterističan slučaj u praksi :

$$A_v = \frac{v_i}{v_g} = -g_m (R_D \parallel R_p).$$

Ulazna otpornost (otpornost koju „vidi“ ulazni signal) iznosi $R_u = R_1 \parallel R_2$.

Izlazna otpornost (otpornost koju „vidi“ potrošač) iznosi : $R_i = r_{ds} \parallel R_D \approx R_D$.

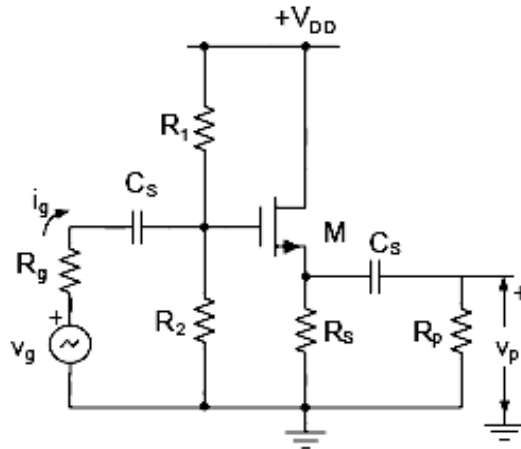
Pri analizi pojačavača na visokim učestanostima moraju se uzeti u obzir kapacitivnosti između elektroda MOS tranzistora, pa model za male signale izgleda kao na slici. Analiza rada pojačavača na visokim učestanostima se detaljno izlaže u okviru Analogue elektronike.



Model MOS tranzistora za male signale na visokim učestanostima

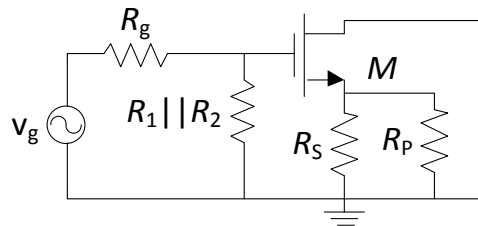
- **MOS pojačavač u sprezi sa zajedničkim drejnom ZD**

Potrošač se vezuje za sors MOSFET-a, a pobudni generator za gejt.

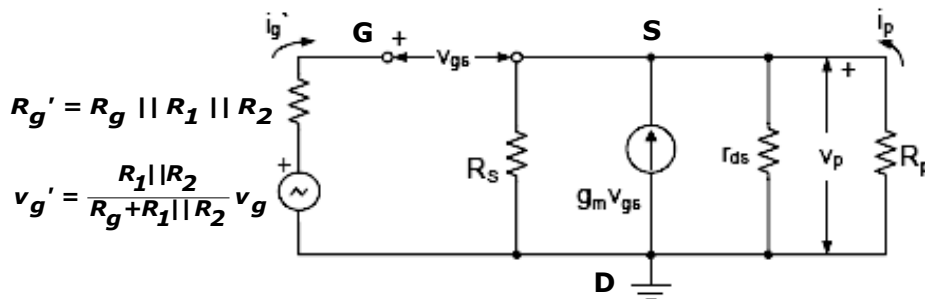


Potpuna šema diskretnog pojačavača sa zajedničkim drejnom (ZD)

Naponsko pojačanje stepena sa ZD odredićemo primenom modela MOSFET-a za male signale. Nakon poništavanja ems baterije za polarizaciju V_{DD} i kratkog prespajanja svih kondenzatora dobija se kolo na slici levo. Zamenom tranzistora modelom za male signale u okolini mirne radne tačke dobija se ekvivalentno kolo pojačavača sa ZD za male signale sa slike dole. Nakon anuliranja ems baterije V_{DD} drejn MOSFET-a se nalazi na masi



za mali, naizmenični signal. Ulazno kolo pojačavača, između gejta i drejna (koji je na masi) zamenjeno je ekvivalentnim Tevenenovim generatorom.



Iz ekvivalentnog kola za male signale sledi

$$v_p = v_s = (g_m \cdot v_{gs})(R_S \parallel R_P \parallel r_{ds}), \quad v_{gs} = v_g - v_s = v_g' - v_s = v_g' - v_p \text{ sledi}$$

$$v_p = v_s = g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds}) v_g' - g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds}) v_p$$

$$v_p(1 + g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds})) = g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds}) v_g'.$$

$$A_V' = \frac{v_p}{v_g'} = \frac{g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds})}{1 + g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds})}, \text{ odnosno naponsko pojačanje prema } v_g \text{ je}$$

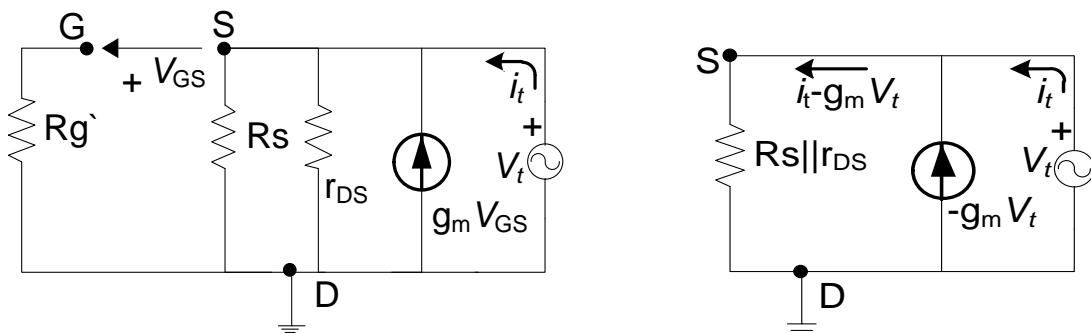
$$A_V = \frac{v_p}{v_g} = \frac{g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds})}{1 + g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds})} \cdot \frac{R_1 \parallel R_2}{R_g + R_1 \parallel R_2}.$$

Naponsko pojačanje je uvek manje od 1, ali je zbog $g_m \cdot (R_S \parallel R_P \parallel r_{ds}) \gg 1$ blisko jedinici. Stepen sa ZD naziva se i *source follower* jer napon sorsa sledi napon gejta.

Ulazna otpornost koju „vidi“ Tevenenov generator v_g' je beskonačno velika, dok realni pobudni generator v_g „vidi“ $R_U = R_1 \parallel R_2$.

Izlazna otpornost koju „vidi“ potrošač R_p je $R_i = \frac{r_{ds} \parallel R_S}{1 + g_m(r_{ds} \parallel R_S)}$ i vrlo je mala jer je $g_m \cdot (R_S \parallel r_{ds}) \gg 1$.

Određivanje izlazne otpornosti preko test generatora: $R_i = \frac{v_t}{i_t}$

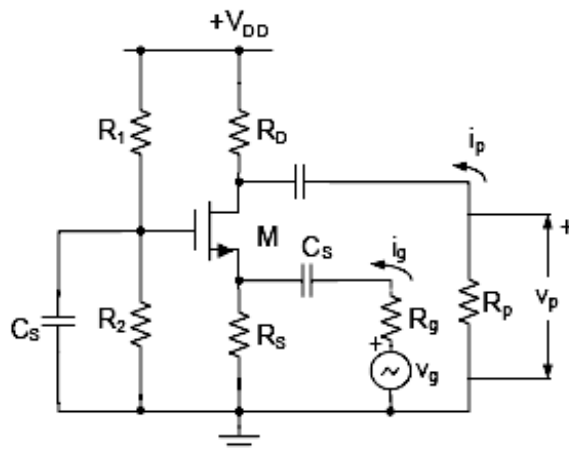


Očigledno je $v_{GS} = v_G - v_S = 0 - v_t = -v_t$, jer je pobudni generator v_g' poništen. Dalje je $v_t = (i_t + g_m v_{GS})(r_{DS} \parallel R_S) = (i_t - g_m v_t)(r_{DS} \parallel R_S)$, pa se rešavanjem po v_t dobija $v_t[1 + g_m(r_{DS} \parallel R_S)] = i_t \cdot (r_{DS} \parallel R_S)$. Sada je $R_i = \frac{v_t}{i_t} = \frac{r_{DS} \parallel R_S}{1 + g_m(r_{DS} \parallel R_S)}$.

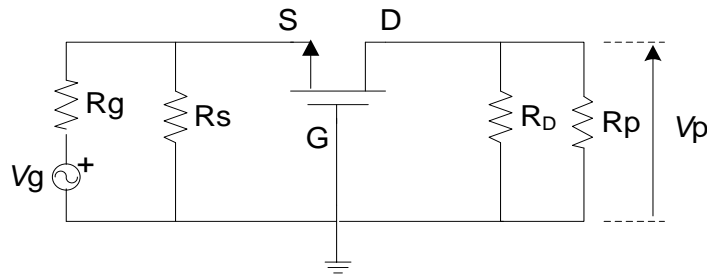
Kako je ulazna otpornost stepena vrlo velika, izlazna otpornost vrlo mala, a naponsko pojačanje približno 1, to je stepen sa ZD odličan razdvojni stepen, koji realni naponski izvor (v_g, R_g) na ulazu „pretvara“ u idealni naponski izvor ($v_i = v_s = v_g, R_i \approx 0$) na izlazu.

• MOS pojačavač u sprezi sa zajedničkim gejtom ZG

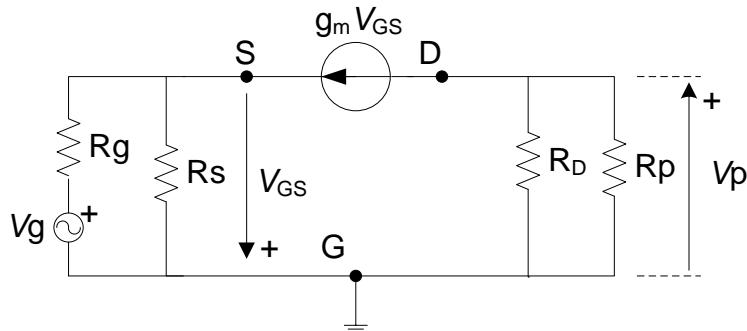
Diskretni pojačavač sa zajedničkim gejtom prikazan je na sledećoj slici. Potrošač se vezuje za drejn MOSFET-a, a pobudni generator za sors. Sprežni kondenzator C_s između gejta i mase dovodi gejt na masu za naizmenični signal.



Potpuna šema diskretnog NMOS pojačavača u sprezi sa zajedničkim gejtom (ZG)

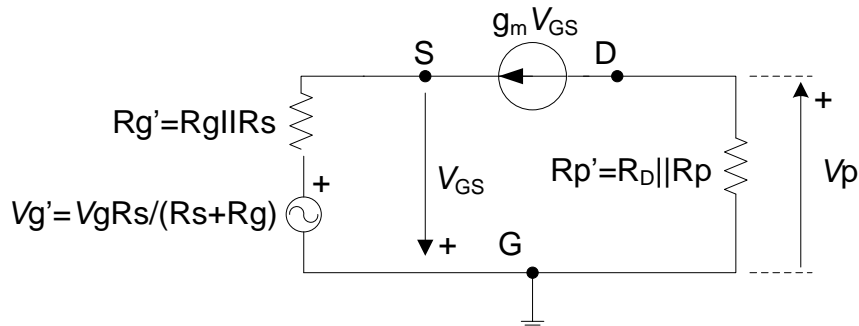


Ekvivalentna šema za male signale (svi sprežni kondenzatori su kratko spojeni, a ems baterije V_{DD} poništena).



Ekvivalentna šema za male signale u kojoj je N MOSFET zamenjen modelom za male signale u okolini mirne radne tačke (MRT) uz $r_{ds} \rightarrow \infty$.

Nakon primene Tevenenove teoreme između tačaka S i G i ekvivalentiranja otpornosti između drejna i gejta, dobija se sledeće jednostavnije kolo:



Kako je $v_p = -g_m v_{GS} \cdot R_p'$, a $v_{GS} = v_G - v_S = 0 - v_S = -v_S$, to je $v_p = -g_m v_{GS} \cdot R_p' = g_m v_S \cdot R_p'$. Dalje je $v_S = v_g' + g_m v_{GS} R_g' = v_g' - g_m v_S R_g'$, pa nakon sređivanja dobijamo $v_S(1 + g_m R_g') = v_g'$, tj. $v_S = v_g' / (1 + g_m R_g')$ Sada je izlazni napon

$$v_p = g_m R_p' \cdot v_S = \frac{g_m R_p'}{(1 + g_m R_g')} \cdot v_g'.$$

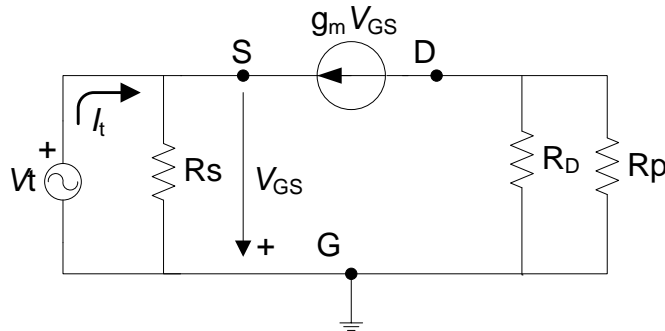
Naponsko pojačanje $A_v' = \frac{v_p}{v_g'} = \frac{g_m R_p'}{1 + g_m R_g'}$, odnosno naponsko pojačanje stepena sa ZG u odnosu na mali, pobudni, promenljivi signal v_g je

$$A_v = \frac{v_p}{v_g} = \frac{g_m R_p'}{(1 + g_m R_g')} \cdot \frac{R_s}{R_s + R_g} = \frac{g_m (R_p \parallel R_D)}{1 + g_m (R_g \parallel R_s)} \cdot \frac{R_s}{R_s + R_g}.$$

Pojačanje je značajno samo kada je otpornost pobudnog generatora mala i tada iznosi:

$$A_V = \left. \frac{v_P}{v_g} \right|_{R_g \rightarrow 0} = g_m (R_p \parallel R_D).$$

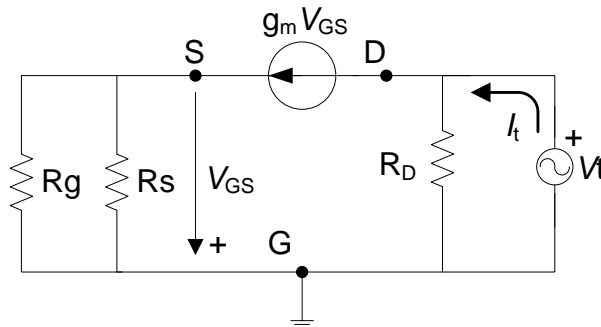
Ulazna otpornost koju „vidi“ pobudni generator v_g određuje se uobičajenim postupkom iz sledećeg kola (uz $r_{ds} \rightarrow \infty$):



$i_t = \frac{v_t}{R_s} - g_m v_{GS} = \frac{v_t}{R_s} - g_m (v_G - v_S)$. Kako je $v_S = v_t$, sledi $i_t = \frac{v_t}{R_s} + g_m v_t$. Sređivanjem izraza dobija se $R_s i_t = v_t + g_m R_s \cdot v_t = (1 + g_m R_s) v_t$, odnosno ulazna otpornost je

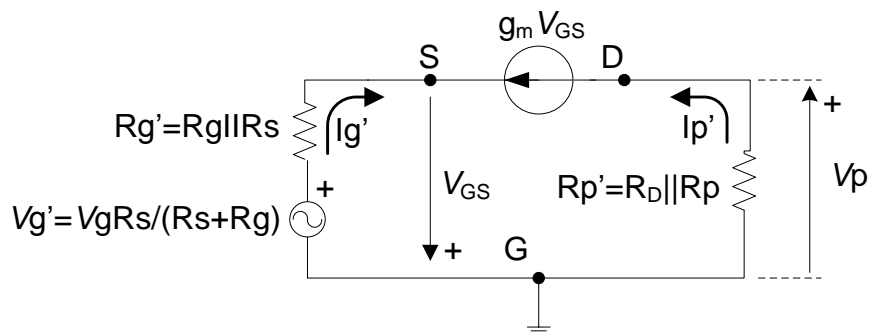
$$R_U = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_s}{1 + g_m R_s} \text{ i vrlo je mala.}$$

Izlazna otpornost koju „vidi“ potrošač je $R_i = R_D$ (uz $r_{ds} \rightarrow \infty$) i određena je iz sledećeg kola:



Strujno pojačanje nije beskonačno veliko, kao kod stepena sa ZS i ZD, već je

$$A_i = \frac{i_p'}{i_g'} = -1, \text{ što je očigledno iz sledećeg kola (uz } r_{ds} \rightarrow \infty \text{).}$$



Stepen sa ZG naziva se i *current follower* (strujni pratilac), jer ima malu ulaznu i veliku izlaznu otpornost i strujno pojačanje po modulu jednako 1.