

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

1. Mali signalni model JFET i MOSFET tranzistora
2. AC analiza sklopova sa JFET tranzistorom

Elektronički Elementi i Sklopovi

- FET tranzistori imaju izvrsno naponsko pojačanje te imaju visoku ulaznu impedanciju
- Disipacija snage FET tranzistora je niska te imaju solidan frekvencijski opseg
- Za izradu pojačala sa FET tranzistorom možemo koristiti JFET, MOSFET i MESFET tranzistore
- Treba imati u vidu da MOSFET osiromašenog tipa (i MESFET tranzistor) imaju veću ulaznu impedanciju nego JFET tranzistori
- Za razliku od BJT tranzistora kod kojega se malom ulaznom strujom upravlja velikom izlaznom strujom kod FET tranzistora se malim ulaznim naponom regulira izlazna struja

Elektronički Elementi i Sklopovi

U sklopu zajedničke source (S) elektrode, kod FET tranzistora ulaznim naponom V_{GS} se upravlja izlaznom strujom I_D . Za FET tranzistore (JFET i MOSFET osiromašenog tipa) vrijedi Shocklyeva jednačba:

$$(1) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Ekspanzijom jednačbe (1) dobije se:

$$(2) I_D = I_{DSS} - 2I_{DSS} \frac{V_{GS}}{V_P} + I_{DSS} \left(\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Pod pretpostavkom da je $V_{GS} < V_P$ možemo zanemariti zadnji član:

$$(3) I_D \approx I_{DSS} - 2I_{DSS} \frac{V_{GS}}{V_P}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz jednadžbe (3) slijedi ovisnost:

$$(4) \Delta I_D = g_m \Delta V_{GS}$$

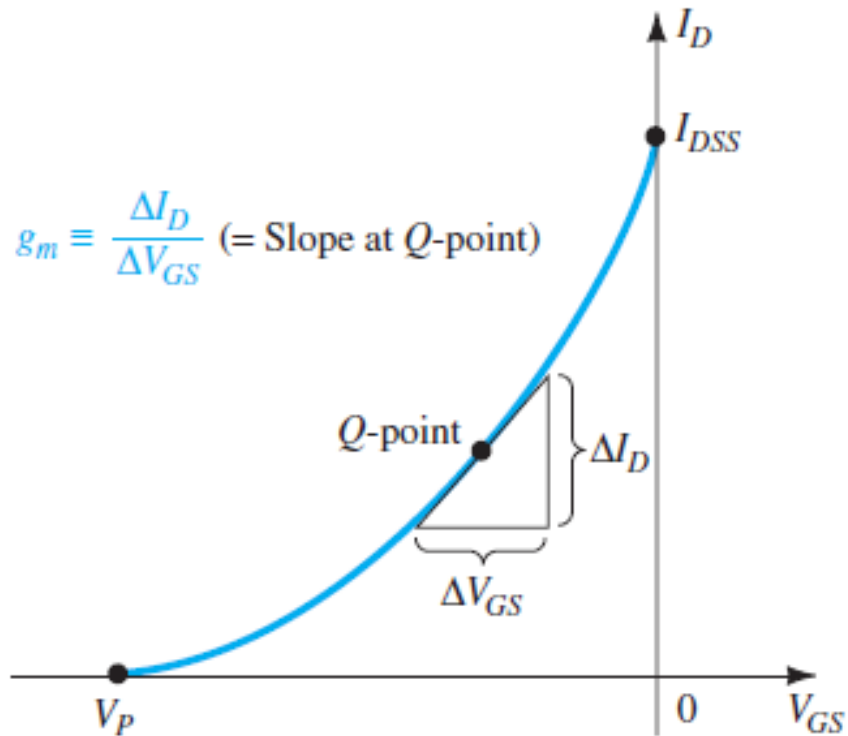
Koeficijent g_m naziva se još i **transkonduktancija** te se može izraziti kao:

$$(5) g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

Naziv **transkonduktancija** jest složenica od riječi *trans* i *konduktancija*. Naziv konduktancija dolazi iz činjenice da je g_m omjer struje i napona. Riječ *trans* dolazi iz podatka da g_m povezuje ulazne i izlazne veličine.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Transkodontancija g_m jest nagib krivulje na prienosnoj strujno-naponskoj karakteristici.



$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 1. Odrediti transkonduktanciju g_m za JFET tranzistor ako je struja $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$ i pinch-off napon $V_P = -4 \text{ V}$ za sljedeće radne točke:

a) $V_{GS} = -0.5 \text{ V}$

b) $V_{GS} = -1.5 \text{ V}$

c) $V_{GS} = -2.5 \text{ V}$

Za rješenje koristiti grafičku metodu!

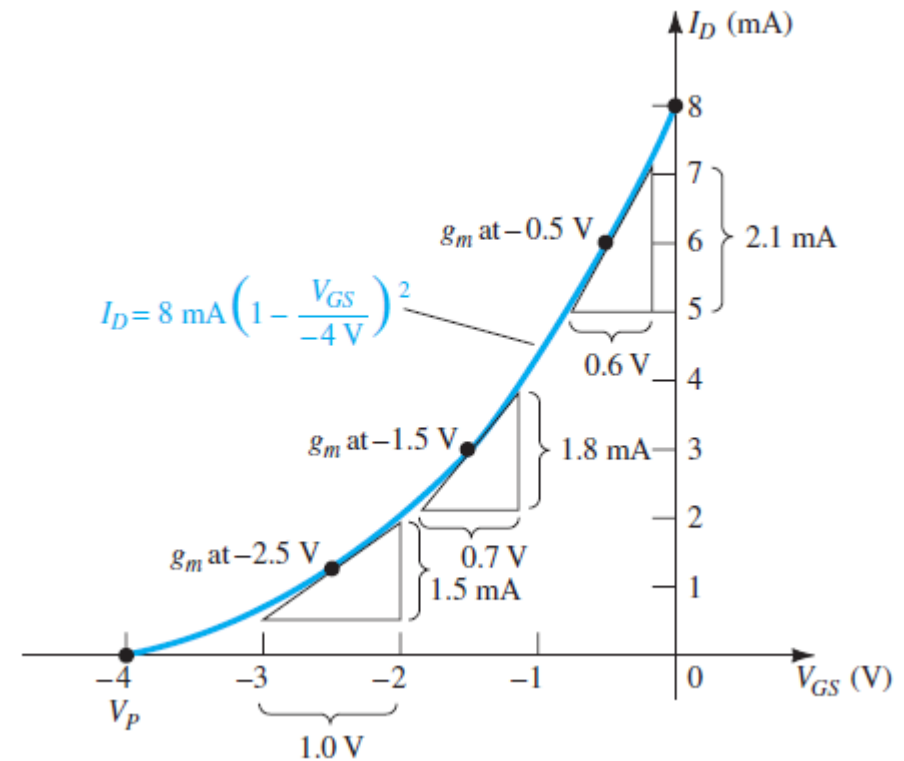
Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje: prijenosna karakteristika se nacrtava kao i ranije, pomoću Shocklyeve jednadžbe koristeći tri točke ($V_{GS} = 0\text{ V}$, $V_{GS} = V_P/2$, $V_{GS} = V_P$).

$$\text{a) } g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{2.1\text{ mA}}{0.6\text{ V}} = 3.5\text{ mS}$$

$$\text{b) } g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{1.8\text{ mA}}{0.7\text{ V}} = 2.57\text{ mS}$$

$$\text{c) } g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{1.5\text{ mA}}{1.0\text{ V}} = 1.5\text{ mS}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Transkonduktancija g_m se može naći i analitički iz Shocklyeve jednadžbe:

$$(6) \quad g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = \frac{d}{dV_{GS}} I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = -2 \frac{I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

Budući da transkonduktancija g_m mora uvijek biti pozitivna:

$$(7) \quad g_m = 2 \frac{I_{DSS}}{|V_P|} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

Kada je napon $V_{GS} = 0$ tada je nagib na prijenosnoj karakteristici najveći. Stoga možemo izračunati parametar g_{m0} pri naponu $V_{GS} = 0$:

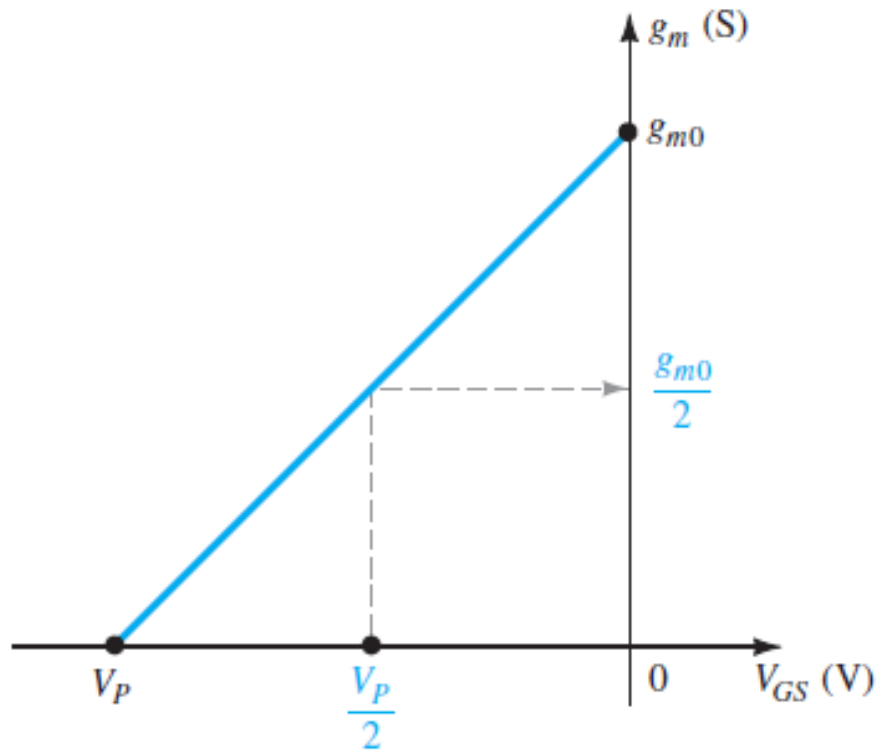
$$(8) \quad g_{m0} = 2 \frac{I_{DSS}}{|V_P|}$$

Kombiniranjem jednadžbi (8) i (7) dobije se:

$$(9) \quad g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Ovisnost transkonduktancije g_m o naponu V_{GS} slijedi iz jednadžbe (9):



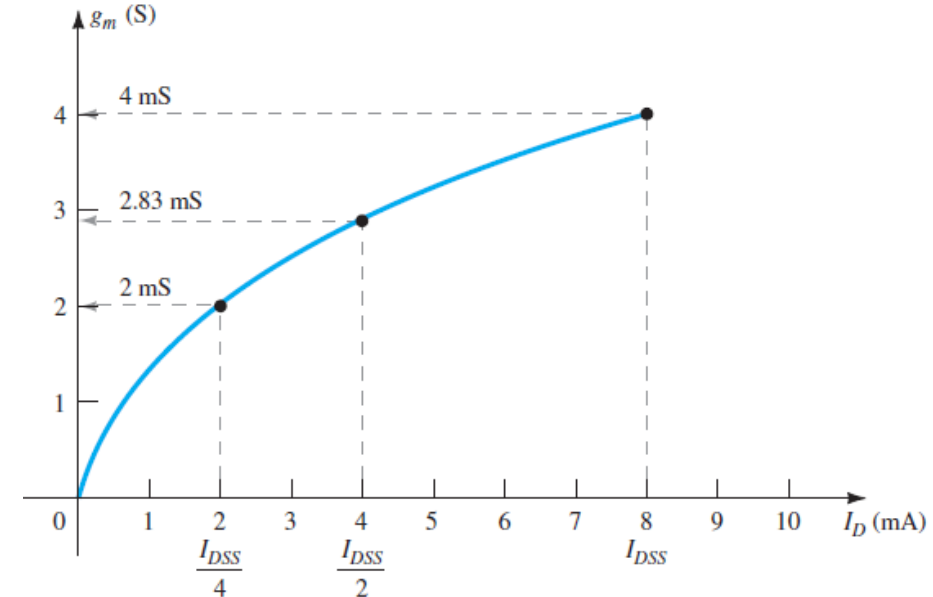
Elektronički Elementi i Sklopovi

Transkonduktancija g_m se može naći i izraziti kao ovisnost o struji I_D :

$$(10) \quad g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = \frac{d}{dV_{GS}} I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = -2 \frac{I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

Uvrštavanjem $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$ u jednadžbu (10) dobije se:

$$(11) \quad g_m = -2 \frac{I_{DSS}}{V_P} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} = g_{m0} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Ulazna impedancija Z_i

Ulazna impedancija Z_i komercijalno dobavljenih FET tranzistora je dovoljno velika da se može smatrati:

$$(12) Z_i(FET) = \infty \Omega$$

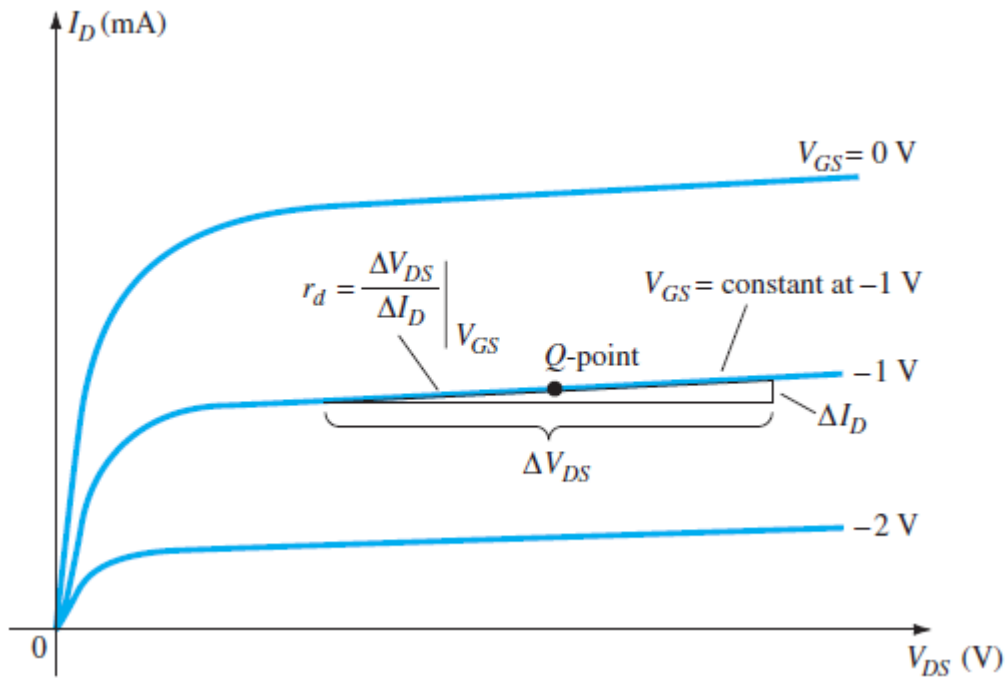
Izlazna impedancija Z_o

Za mali signalni model, izlaznu impedanciju označavamo oznakom r_d dok se u specifikacijama proizvođača izlazna impedancija obično označava sa g_{os} ili sa y_{os} . Izlazna impedancija Z_o može se povezati sa ovim parametrima putem relacije:

$$(13) Z_o = r_d = \frac{1}{g_{os}} = \frac{1}{y_{os}}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

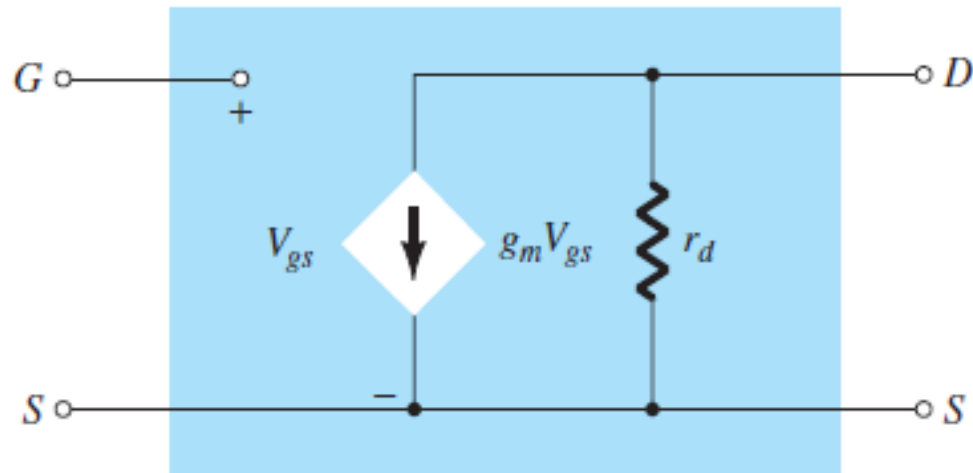
Izlaznu impedanciju r_d možemo definirati kao nagib na izlaznoj strujno-naponskoj karakteristici pri konstantnom naponu V_{GS} .



$$(14) r_d = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \Big|_{V_{GS} = \text{const.}}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

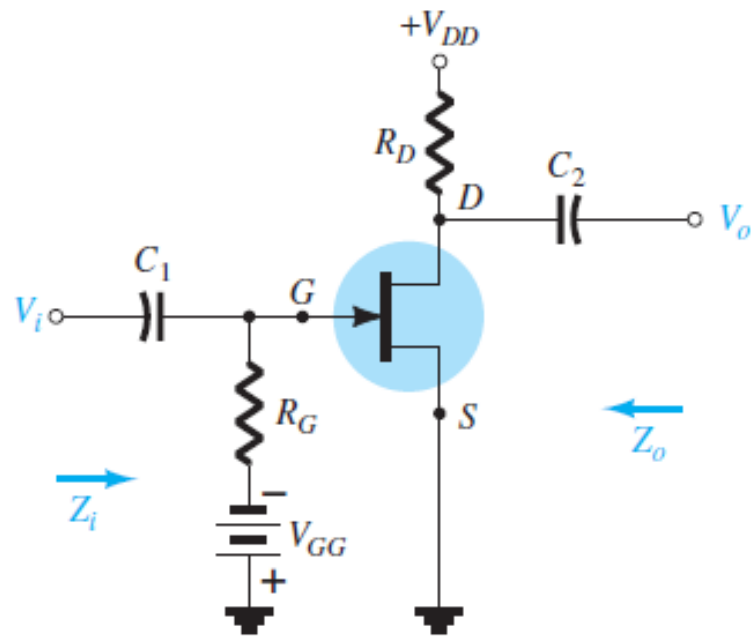
Ekvivalentni AC model FET tranzistora je prikazan na slici dolje:



Činjenicu da se izlaznom strujom I_D upravlja ulaznim naponom V_{GS} reflektira prisutnost strujnog izvora $g_m V_{gs}$ u izlaznom krugu.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Na slici je sklop sa JFET tranzistorom kojemu je uzemljena source (S) elektroda. Analiza je slična kao i kod BJT tranzistora, dakle treba pronaći veličine Z_i , Z_o i A_v .



Prvo se pomoću DC analize odredi transkoduktancija g_m i izlazni otpor r_d FET tranzistora.

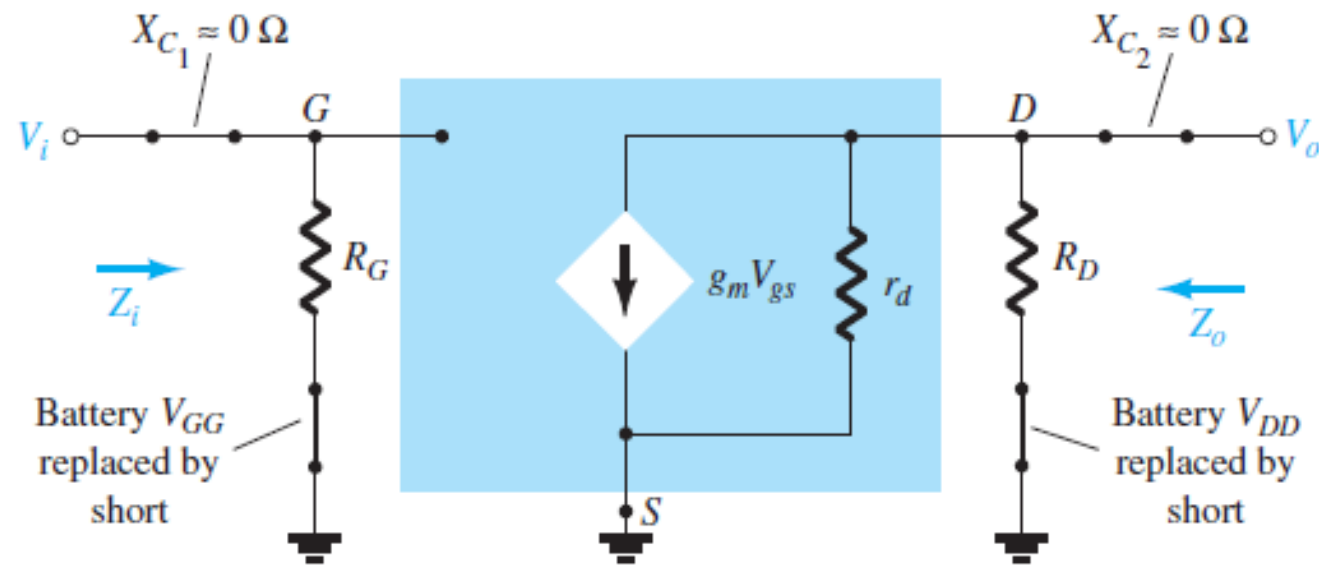
Kod AC analize svi kondenzatori se mogu zamijeniti kratkim spojem jer reaktancija kondenzatora ovisi kao

$$(14) \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Ako je frekvencija f dovoljno velika tada $X_C \approx 0$. Nadalje u svrhu AC analize svi DC naponski izvori se uzemlje (tj. zamjene se kratkim spojem).

Elektronički Elementi i Sklopovi

Slično kao i kod AC analize BJT tranzistora, FET tranzistor se u svrhu AC analize zamijeni malim signalnim modelom FET tranzistora:



Elektronički Elementi i Sklopovi

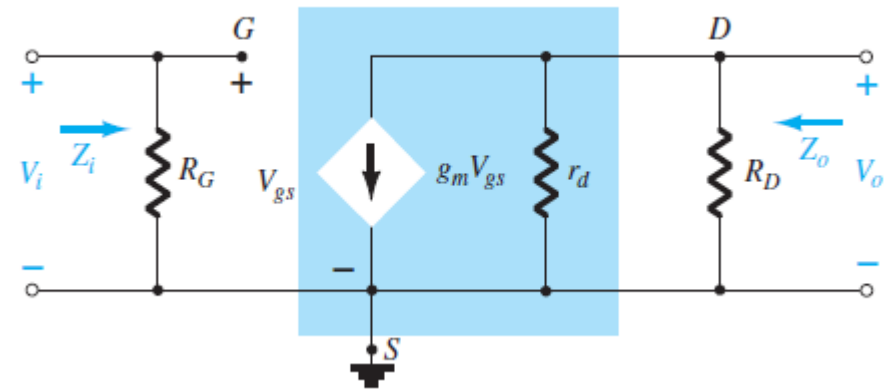
Iz nadomjesne sheme FET tranzistora je odmah vidljivo da je ulazna impedancija Z_i jednaka:

$$(15) Z_i = R_G$$

Razlog zašto jednačba (15) vrijedi je zbog toga što smatramo da je ulazna impedancija FET tranzistora beskonačna.

Da bi odredili izlaznu impedanciju postavimo da je $V_i = 0$. U tom slučaju je napon $V_{gs} = 0$. Budući da je $V_{gs} = 0$ onda je i strujni izvor $g_m V_{gs} = 0$ te ga možemo zamijeniti otvorenim krugom. Izlazna impedancija Z_o je tada:

$$(16) Z_o = R_D \parallel r_d$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Pojačanje A_v se kao i kod BJT tranzistora odredi iz omjera izlaznog i ulaznog napona V_o/V_i .

Za izlazni napon V_o možemo pisati da je jednak:

$$(17) V_o = -g_m V_{gs} (R_D \parallel r_d)$$

Ulazni napon V_i odredimo iz nadomjesne sheme:

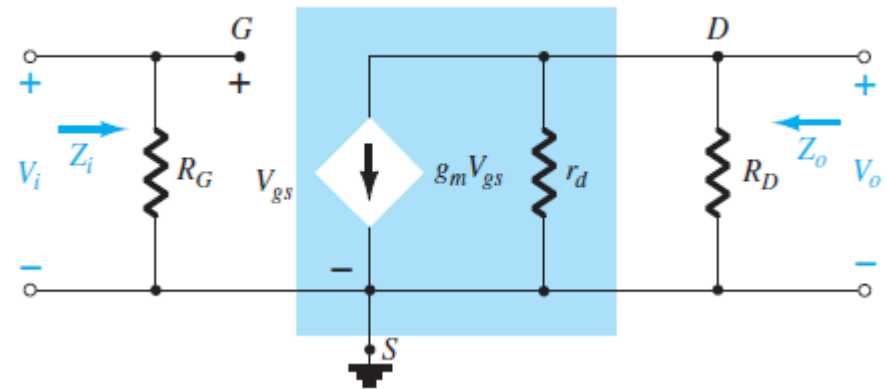
$$(18) V_i = V_{gs}$$

Uvrštavanjem (18) u (17) dobije se:

$$(19) A_v = -g_m (R_D \parallel r_d)$$

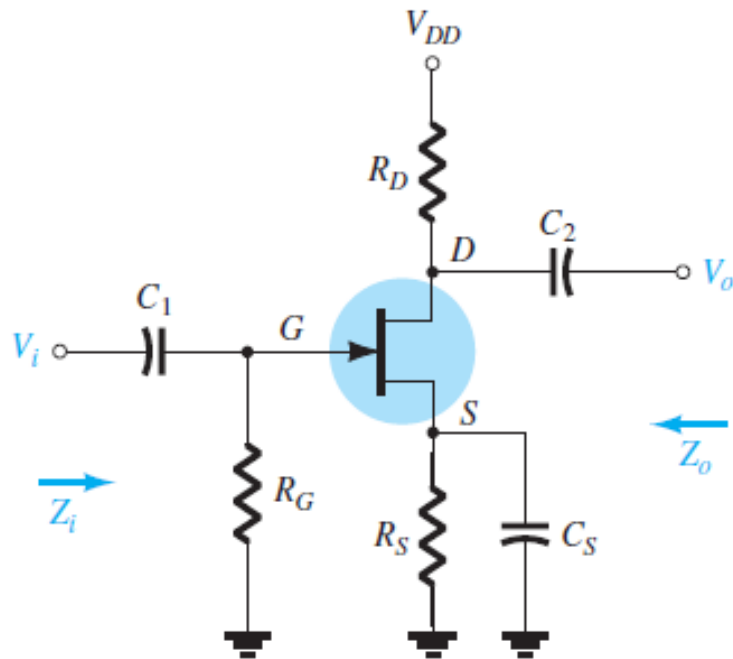
Ako je $r_d \geq 10 R_D$ jednačina (19) postaje:

$$(20) A_v \cong -g_m R_D$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Na slici je konfiguracija JFET tranzistora sa bypass kondenzatorom na otporniku R_S .

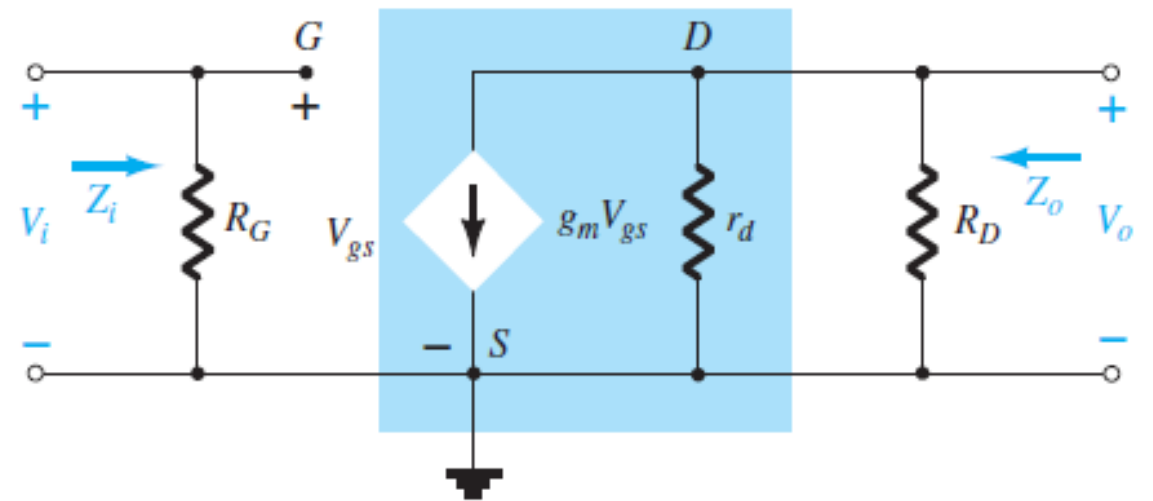
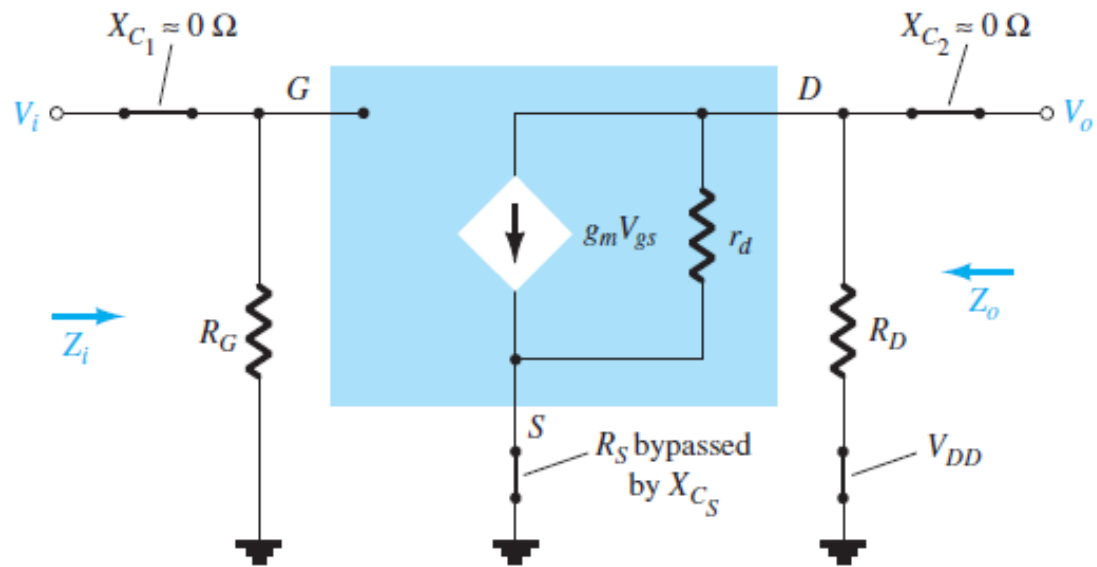


Da bi odredili parametre (g_m , r_d) nadomjesnog malog signalnog modela FET tranzistora treba prvo provesti DC analizu, tj. pronaći statičku radnu točku Q .

Zatim smatramo da je frekvencija dovoljno visoka da sve kondenzatore možemo zamijeniti kratkim spojem te sve DC izvore kratko spojimo (uzemljimo).

Elektronički Elementi i Sklopovi

Kada sve kondenzatore kratko spojimo te DC izvore također kratko spojimo te FET tranzistor zamijenimo sa malim signalnim modelom dobijemo ekvivalentnu shemu:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rezultirajući izrazi za Z_i , Z_o i A_v su identične kao i kada imamo uzemljenu source elektrodu (S) bez bypass kondenzatora:

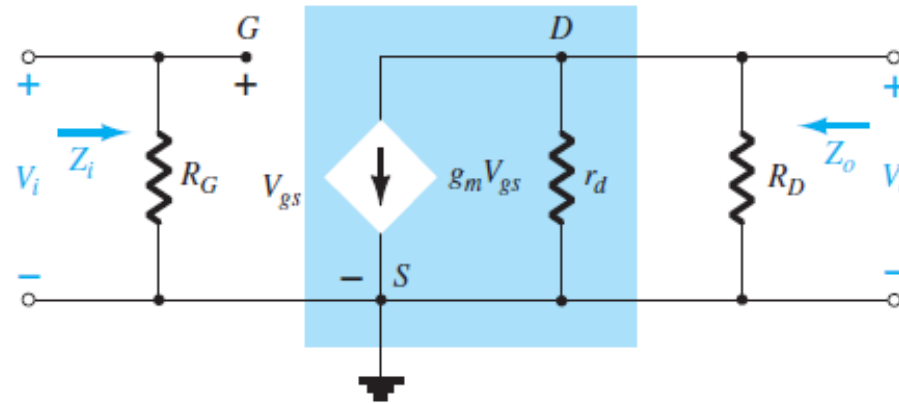
$$(21) Z_i = R_G$$

$$(22) Z_o = R_D \parallel r_d$$

$$(23) A_v = -g_m(R_D \parallel r_d)$$

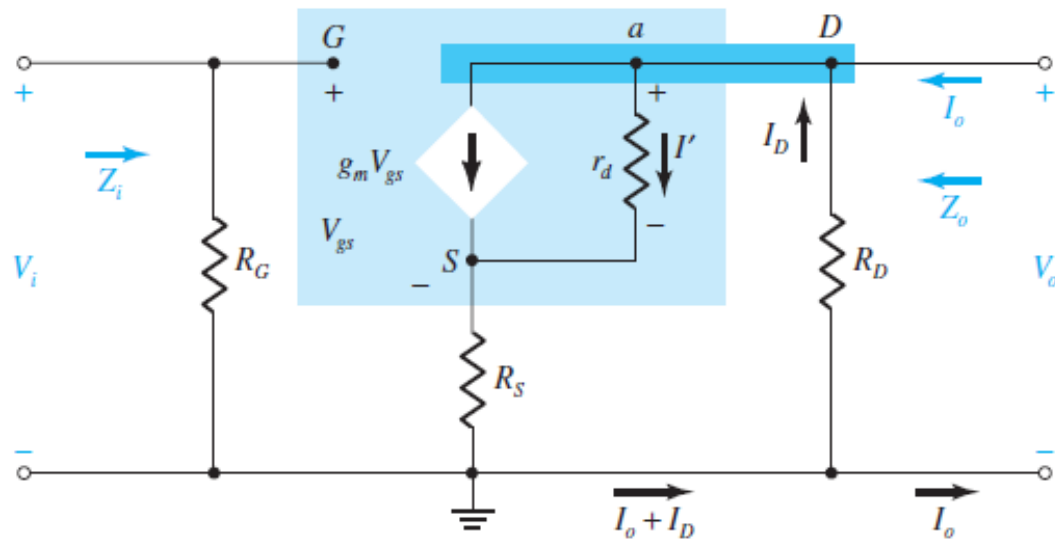
Uz uvjet $r_d \geq 10 R_D$ pojačanje A_v jest:

$$(24) A_v \cong -g_m R_D$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Ako se bypass kondenzator C_S ukoni, tada nadomjesna shema postaje kompliciranija za analizu:



Ulazna impedancija Z_i se odredi jednostavno kao i do sada:

$$(25) Z_i = R_G$$

Izlaznu impedanciju Z_o možemo odrediti ako postavimo da je $V_i = 0$

$$(26) Z_o = \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{V_i=0}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Budući da je $V_i = 0$ imamo da je:

$$(27) V_{gs} = -V_S$$

S druge strane imamo da je napon V_S jednak:

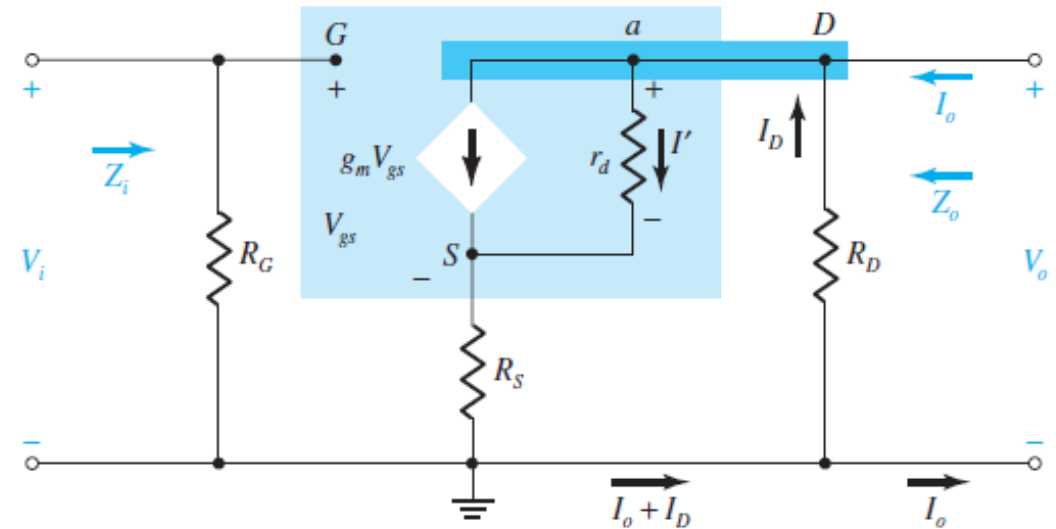
$$(28) V_S = (g_m V_{gs} + I') R_S$$

Uvrštavanjem (28) u (27) dobije se:

$$(29) I' = -\frac{V_{gs}(1+g_m R_S)}{R_S}$$

Uporabom Kirchhoffovog zakona za struje u točki A imamo:

$$(30) I_o = g_m V_{gs} + I' - I_D = -\frac{V_{gs}}{R_S} - I_D$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Nakon sređivanja jednačbe (30) dobije se:

$$(31) V_{gs} = -(I_o + I_D)R_S$$

Također, budući da je napon $V_i = 0$ imamo da:

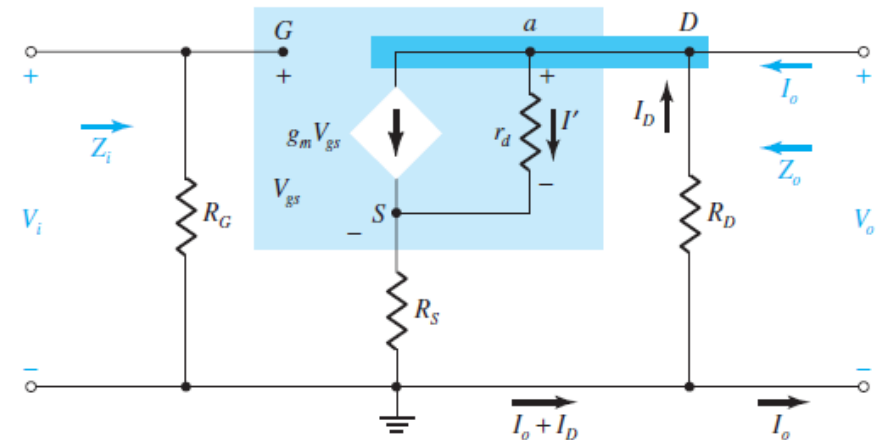
$$(32) V_o = V_{r_d} + V_S = V_{r_d} - V_{gs}$$

Stoga je struja I' jednaka:

$$(33) I' = \frac{V_{r_d}}{r_d} = \frac{V_o + V_{gs}}{r_d}$$

Uvrštavanjem (33) u (30) dobije se:

$$(34) I_o = g_m V_{gs} + \frac{V_o + V_{gs}}{r_d} - I_D$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Sada se korištenjem izraza $V_o = -I_D R_D$ te $V_{gs} = -(I_o + I_D)R_S$ dobije:

$$(35) I_o \left(\frac{R_S}{r_d} + g_m R_S + 1 \right) = -I_D \left(\frac{R_D}{r_d} + \frac{R_S}{r_d} + g_m R_S + 1 \right)$$

Izlazna impedancija se sada može izračunati kao:

$$(36) Z_o = \frac{V_o}{I_o} = -\frac{I_D}{I_o} R_D = \frac{\frac{R_S}{r_d} + g_m R_S + 1}{\frac{R_D}{r_d} + \frac{R_S}{r_d} + g_m R_S + 1} R_D$$

Ako vrijedi da je $r_d \geq 10R_D$ onda imamo da je:

$$(37) Z_o \cong R_D$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Da bi pronašli naponsko pojačanje A_v možemo krenuti iz Kirchhoffovog zakona za ulazni krug:

$$(38) V_i - V_{gs} - V_{R_S} = 0$$

Korištenjem izraza $V_{R_S} = I_D R_S$ izraz (38) postaje:

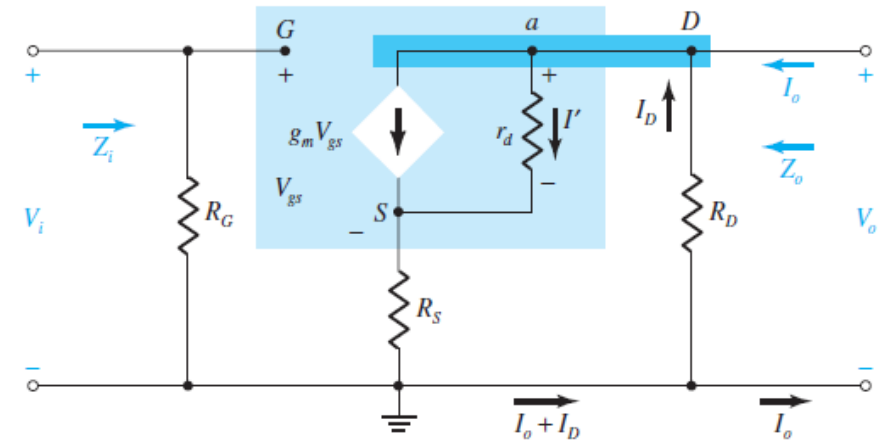
$$(39) V_{gs} = V_i - I_D R_S$$

Također za izlazni krug možemo pisati:

$$(40) V_o = V_{r_d} + V_{R_S}$$

Sada možemo izračunati struju I' :

$$(41) I' = \frac{V_o - V_{R_S}}{r_d}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Primjenom Kirchhoffovog zakona za struje u točki D dobije se:

$$(42) I_D = I' + g_m V_{gs}$$

Uvrštavanjem (41) u (42) imamo:

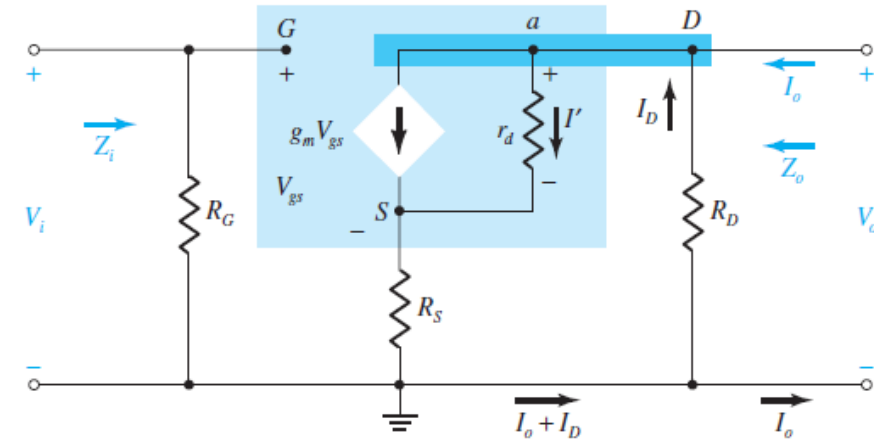
$$(43) I_D = \frac{V_o - V_{RS}}{r_d} + g_m V_{gs}$$

Uvrštavanjem $V_{RS} = I_D R_S$, $V_o = -I_D R_D$ i izraza $V_{gs} = V_i - I_D R_S$ u (43) proizlazi:

$$(44) I_D = \frac{V_o - I_D R_S}{r_d} + g_m (V_i - I_D R_S) = g_m (V_i - I_D R_S) - \frac{I_D R_S + I_D R_D}{r_d}$$

Nakon sređivanja (44) postaje:

$$(45) I_D \left(1 + g_m R_S + \frac{R_S + R_D}{r_d} \right) = g_m V_i$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz jednadžbe (45) slijedi:

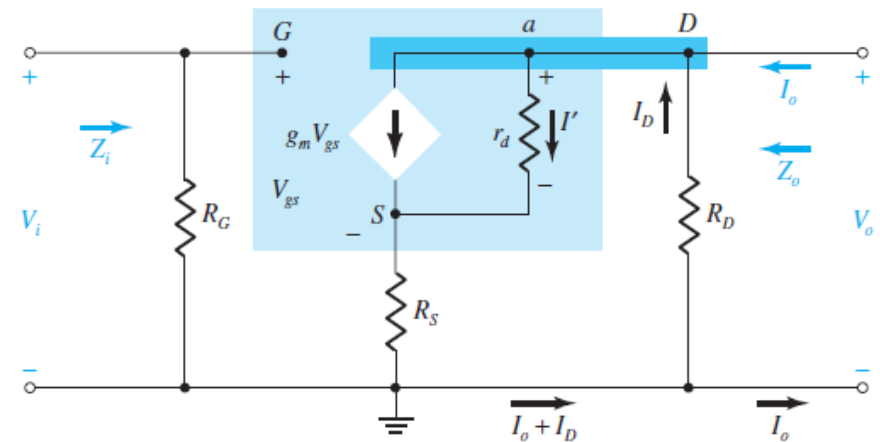
$$(46) I_D = \frac{g_m V_i}{1 + g_m R_S + \frac{R_S + R_D}{r_d}}$$

S obzirom da je izlazni napon $V_o = -I_D R_D$ onda množenjem (46) sa R_D se dobije:

$$(47) V_o = -I_D R_D = -\frac{g_m V_i}{1 + g_m R_S + \frac{R_S + R_D}{r_d}} R_D$$

Iz (47) slijedi da je naponsko pojačanje A_v :

$$(48) A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S + \frac{R_S + R_D}{r_d}}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Ako je zadovoljen uvjet da je $r_d \geq 10(R_S + R_D)$ jednačba (48) postaje:

$$(49) A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$