

2 MOSFET KAO POJAČAVAČ - NASTAVAK

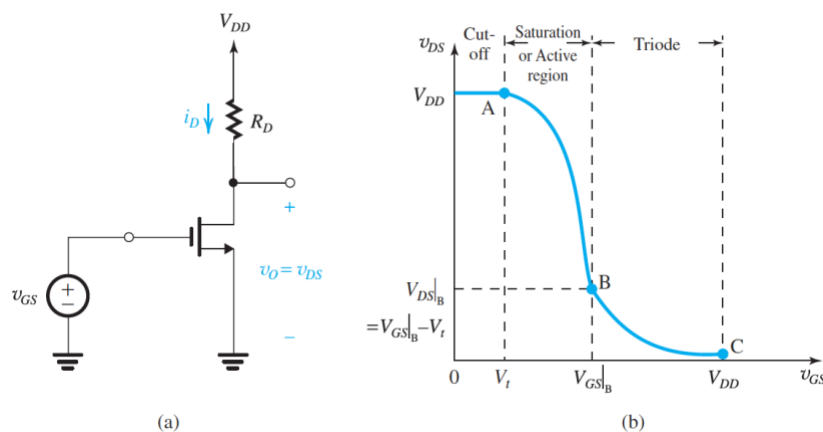
Strujno naponska karakteristika MOSFET-a $i_D - v_{GS}$ ukazuje da je u pitanju nelinearna zavisnost. Ipak, primjenom odgovarajućih dizajnerskih tehnika, može se dobiti gotovo linearno pojačanje pojačavača, koji je baziran na MOSFET-u.

2.2 Naponski pojačavač

MOSFET je, u principu, transkonduktanski pojačavač – ulaz mu je napon, a izlaz mu je struja. Međutim, naponski pojačavači imaju širu primjenu. Jednostavan način za konverziju transkonduktanskog pojačavača u naponski pojačavač je propuštanje izlazne struje kroz otpornik, i preuzimanje napona sa krajeva otpornika kao izlaz. Naponski pojačavač dobijen na ovaj način, baziran na MOSFET-u kao transkonduktansnom pojačavaču, je prikazan na slici 2.8(a). Ulazni napon je napon v_{GS} , otpornik R_D (otporno opterećenje) pretvara struju drejna i_D u napon $R_D i_D$, dok je V_{DD} napon napajanja kola, koji zajedno sa R_D omogućava rad MOSFET-a u zasićenju. U slučaju pojačavača prikazanog na slici 2.8(a), izlazni napon je napon između drejna i uzemljenja, a ne pad napona na otporniku R_D , iz razloga što je potrebno imati zajedničko uzemljenje (zajedničku referencu) između ulaza i izlaza. Izlazni napon v_{DS} je dat relacijom:

$$v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D \quad (2.17)$$

U pitanju je invertovani napon $R_D i_D$ „pomjeren“ za konstantnu vrijednost napona napajanja V_{DD} .



slika 2.8 (a) NMOS pojačavač; (b) Naponska prenosna karakteristika NMOS pojačavača.

2.3 Naponska prenosna karakteristika (VTC)

Naponska prenosna karakteristika (VTC – *Voltage-Transfer Characteristic*) je zapravo zavisnost izlaznog napona kola od njegovog ulaznog napona. Za NMOS pojačavač prikazan na slici 2.8(a), zavisnost izlaznog napona v_{DS} od ulaznog napona v_{GS} je prikazana na slici 2.8(b). Za ulazni napon manji od napona praga, $v_{GS} < V_t$, tranzistor je zakočen i struja $i_D = 0$, pa je napon $v_{DS} = V_{DD}$. Kada napon v_{GS} pređe vrijednost napona praga V_t , MOSFET počinje da provodi i napon v_{DS} opada. Kako je inicijalno v_{DS} još uvijek visoko, MOSFET će raditi u zasićenju (ili aktivnom režimu). Sa daljim povećanjem napona v_{GS} , MOSFET ostaje u zasićenju sve do tačke kada napon v_{DS} postane manji od v_{GS} , za vrijednost napona praga V_t (tačka B na grafiku, slika 2.8(b)). Za veće vrijednosti napona v_{GS} (veće od onog u tački B), MOSFET radi u omskom režimu rada i napon v_{DS} sporije opada.

Prema naponskoj prenosnoj karakteristici prikazanoj na slici 2.8(b), najveće naponsko pojačanje je u segmentu AB, koji odgovara aktivnom režimu MOSFET-a. Kada se MOSFET koristi kao pojačavač, radna tačka se mora nalaziti u segmentu AB u svakom trenutku. VTC kola prikazanog na slici 2.8(a), kada je MOSFET u zasićenju, data je izrazom:

$$v_{DS} = V_{DD} - \frac{1}{2}k_n R_D (v_{GS} - V_t)^2 \quad (2.18)$$

U pitanju je očigledno nelinearna zavisnost. Ipak, primjenom tehnike odgovarajuće polarizacije MOSFET-a, može se dobiti gotovo linearno pojačanje. Prije razmatranja odgovarajuće polarizacije, korisno bi bilo odrediti koordinate tačke B, koja predstavlja granicu između zasićenja i omske oblasti. Na osnovu relacije (2.18), dobija se da je v_{GS} koordinata tačke B data izrazom:

$$V_{GS}|_B = V_t + \frac{\sqrt{2k_n R_D V_{DD} + 1} - 1}{k_n R_D} \quad (2.19)$$

Tačka B se alternativno može okarakterisati i preko *overdrive* napona:

$$V_{OV}|_B = V_{GS}|_B - V_t = \frac{\sqrt{2k_n R_D V_{DD} + 1} - 1}{k_n R_D} \quad (2.20)$$

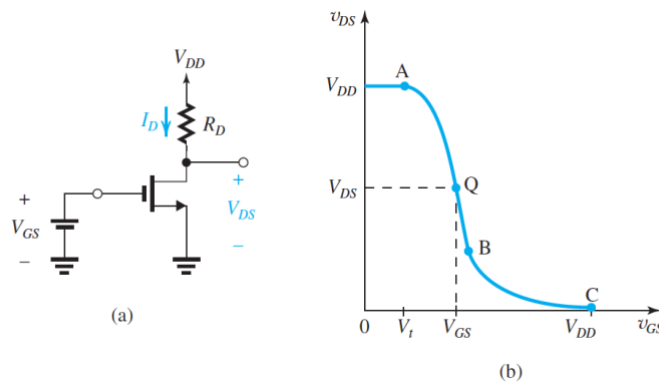
pri čemu je:

$$V_{DS}|_B = V_{OV}|_B \quad (2.21)$$

2.4 Linearno pojačanje uz pomoć odgovarajuće polarizacije MOSFET-a

Pravilnom polarizacijom se može ostvariti gotovo linearno pojačanje pojačavača na bazi MOSFET-a. Tehnika je ilustrovana slikom 2.9(a). Jednosmjerni napon V_{GS} se bira tako da se obezbijedi rad kola u tački Q na AB segmentu naponske prenosne karakteristike. Koordinate tačke Q su naponi V_{GS} i V_{DS} čija međusobna veza je data relacijom:

$$V_{DS} = V_{DD} - \frac{1}{2}k_n R_D (V_{GS} - V_t)^2 \quad (2.22)$$



slika 2.9 Polarizacija NMOS pojačavača tako da se radna tačka Q nalazi na segmentu AB naponske prenosne karakteristike.

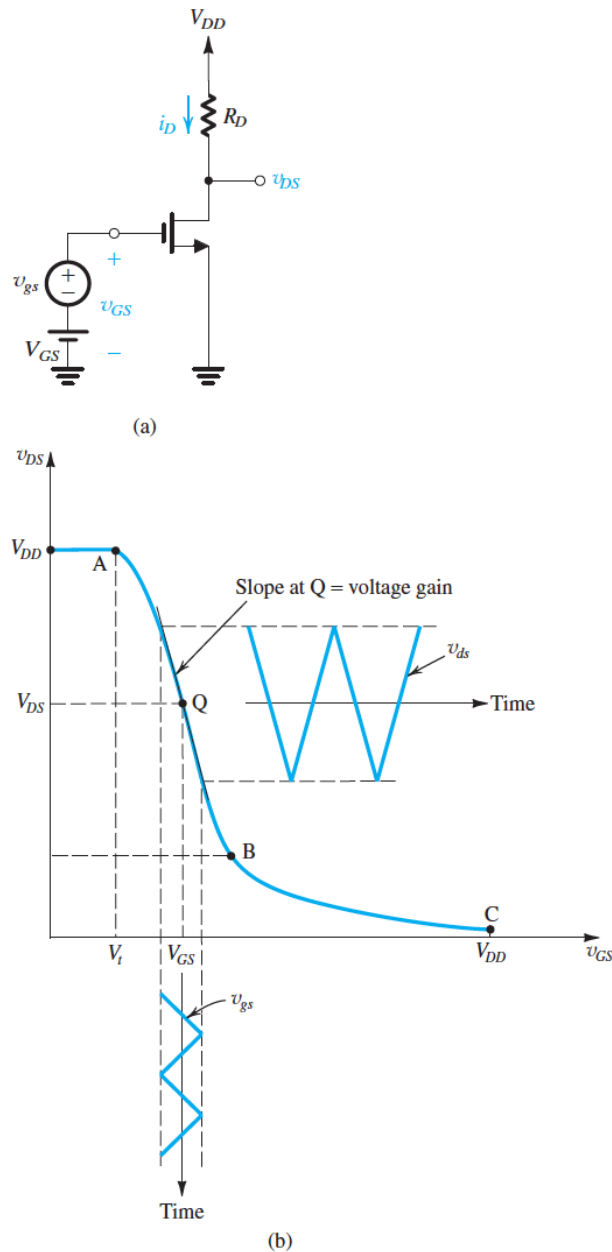
Tačka Q se označava kao tačka polarizacije (*bias point*) ili DC radna tačka. Takođe, kako u tački Q nije prisutan mali signal, koristi se i termin mirna radna tačka (*quiescent*), što je i razlog oznake Q.

Signal koji je potrebno pojačati, v_{gs} , koji se mijenja u vremenu, se superponira polarizacionom naponu V_{GS} , kako je ilustrovano slikom 2.10(a). Dakle, ukupna trenutna vrijednost napona $v_{GS}(t)$ je:

$$v_{GS}(t) = V_{GS} + v_{gs}(t) \quad (2.23)$$

Rezultujući napon $v_{DS}(t)$ se može dobiti na osnovu relacija (2.18) i (2.23). Grafički, tačku po tačku, napon $v_{DS}(t)$ se može dobiti na osnovu naponske prenosne karakteristike, kako je ilustrovano slikom 2.10(b). Na slici je ulazni napon v_{gs} trougaoni talasni oblik male amplitude. Amplituda signala v_{gs} treba da bude dovoljno mala, kako trenutna radna tačka ne bi „napuštala“ usko, gotovo linearno, područje

naponske prenosne karakteristike kola, u okolini polarizacione tačke Q. Što je segment uži, linearnost je veća, pa će samim tim talasni oblik v_{ds} , na izlazu pojačavača (slika 2.10(b)), biti bliži idealnom trougaonom talasnom obliku kakav je na ulazu. Upravo u ovome je suština dobijanja linearnog pojačanja od nelinearnog MOSFET-a.



slika 2.10 MOSFET pojačavač sa malim signalom $v_{gs}(t)$ superponiranim na DC polarizacioni napon V_{GS} . MOSFET radi na uskom, približno linearnom, segmentu naponske prenosne karakteristike kola u okolini polarizacione tačke Q, čime se na izlazu dobija linearno pojačan ulazni napon $v_{ds} = A_v v_{gs}$.

Ukoliko amplituda ulaznog napona v_{gs} ne bi bila dovoljno mala, trenutna radna tačka bi „napustila“ gotovo linearni segment prenosne naponske karakteristike kola, pa bi izlazni napon v_{ds} odstupao oblikom od ulaznog napona, odnosno, došlo bi do njegove nelinearne distorzije. Ako bi amplituda ulaznog signala v_{gs} postala dovoljno velika, trenutna radna tačka bi mogla da napusti segment AB u potpunosti. Ukoliko bi se ovo desilo za vrijeme „negativnog“ segmenta napona v_{gs} , tranzistor bi prestao da provodi određeni dio ciklusa i „pozitivni“ segment napona v_{ds} bi bio odsječen. Ukoliko bi se ovo desilo za vrijeme „pozitivnog“ segmenta napona v_{gs} , tranzistor bi prešao u omski režim rada određeni dio ciklusa i „negativni“ segment napona v_{ds} bi bio „spljošten“. Na osnovu prethodnog se može

zaključiti da odabir pozicije polarizacione tačke Q može imati veoma značajan uticaj na maksimalnu moguću amplitudu napona v_{ds} , što se označava kao maksimalni opseg (*swing*) signala na izlazu.

2.5 Small-signal naponsko pojačanje

Posmatra se MOSFET pojačavač prikazan na slici 2.10(a). Ukoliko je ulazni signal v_{gs} dovoljno mali, napon na izlazu v_{ds} će biti približno proporcionalan naponu v_{gs} sa konstantom proporcionalnosti, koja je jednaka nagibu približno lineranog segmenta VTC-a, oko polarizacione tačke Q. Upravo ovo je naponsko pojačanje pojačavača, i njegova vrijednost se može odrediti određivanjem nagiba tangente na VTC u tački Q:

$$A_v = \left. \frac{dv_{DS}}{dv_{GS}} \right|_{v_{GS}=V_{GS}} \quad (2.24)$$

Na osnovu relacije (2.18), dobija se:

$$A_v = -k_n(V_{GS} - V_t)R_D \quad (2.25)$$

Prethodni izraz se može zapisati i u funkciji *overdrive* napona:

$$A_v = -k_n V_{OV} R_D \quad (2.26)$$

Na osnovu prethodnog izraza može se zaključiti da je naponsko pojačanje negativno, odnosno da postoji fazna razlika od 180° između ulaznog i izlaznog napona, što se moglo zaključiti i na osnovu reosne karakteristike prikazane na slici 2.10(b). Osim toga, naponsko pojačanje je proporcionalno otpornosti R_D , transkonduktansnom parametru k_n MOSFET-a i *overdrive* naponu V_{OV} , što se intuitivno moglo zaključiti.

Još jedan izraz za naponsko pojačanje A_v se može izvesti ukoliko se iskoristi izraz za jednosmjernu struju drejna u funkciji napona V_{OV} :

$$I_D = \frac{1}{2} k_n V_{OV}^2$$

Slijedi da je naponsko pojačanje:

$$A_v = -\frac{R_D I_D}{V_{OV}/2} \quad (2.27)$$

što znači da je pojačanje jednostavno jednako odnosu pada napona na otporniku R_D i polovine *overdrive* napona V_{OV} . Moguć je i sljedeći način izražavanja naponskog pojačanja A_v :

$$A_v = -\frac{V_{DD} - V_{DS}}{V_{OV}/2} \quad (2.28)$$

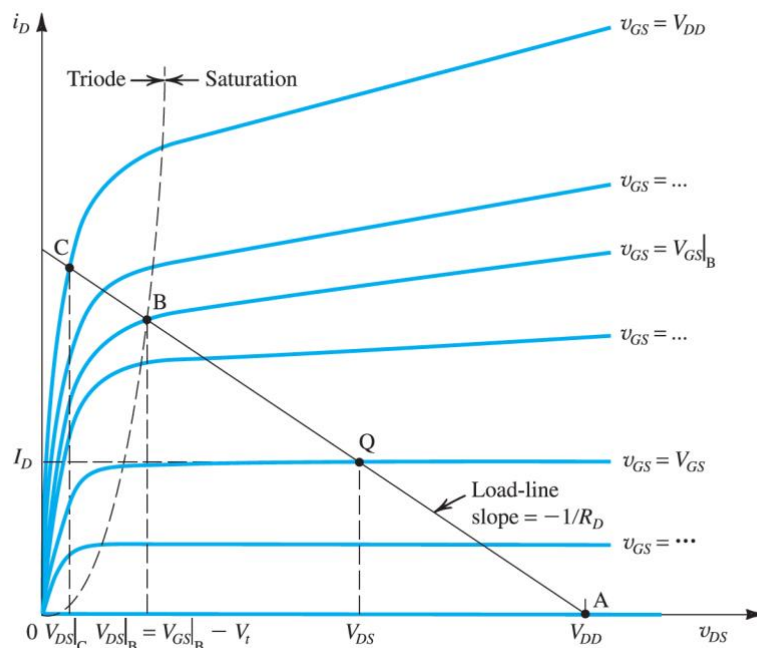
2.6 Određivanje naponske prenosne karakteristike grafičkom analizom

Na slici 2.11 prikazan je grafički metod određivanja naponske prenosne karakteristike pojačavača prikazanog na slici 2.10(a). Iako se ovaj pristup rijetko koristi u praksi, koristan je za bolje razumijevanje rada kola, posebno u smislu određivanja optimalne pozicije tačke polarizacije. Grafička analiza se bazira na zapažanju da će za svaku vrijednost napona v_{GS} , kolo raditi u tači presjeka $i_D - v_{DS}$ karakteristike, koja odgovara određenoj vrijednosti napona v_{GS} , i prave koja je data relacijom (2.17), a koja se može zapisati i na sljedeći način:

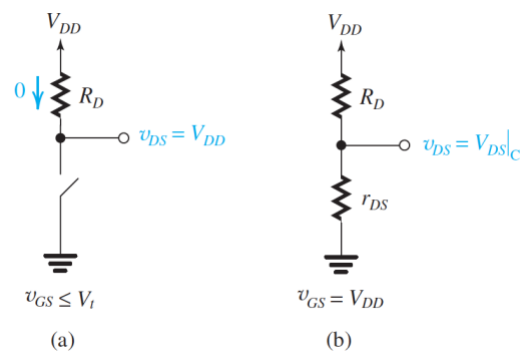
$$i_D = \frac{V_{DD}}{R_D} - \frac{1}{R_D} v_{DS} \quad (2.29)$$

Prava koja je predstavljena prethodnom relacijom je pridružena $i_D - v_{DS}$ karakteristici na slici 2.11. Ona siječe horizontalnu osu za $v_{DS} = V_{DD}$ i ima nagib $-(1/R_D)$. Kako ova prava predstavlja uticaj otpornog

opterećenja R_D , označava se kao *load line*. VTC se određuje tačku po tačku. Na slici 2.11 su označene četiri značajne tačke: tačka A na kojoj je $v_{GS} = V_t$, tačka polarizacije Q ($v_{GS} = V_{GS}$, $v_{DS} = V_{DS}$), tačka B od koje MOSFET prelazi u omski režim rada i tačka C koja je duboko u omskom režimu rada MOSFET- a kada je $v_{GS} = V_{DD}$. Ukoliko se MOSFET koristi kao prekidač, potrebne su koordinate tačkaka A i C: za tačku A, MOSFET je zakočen (otvoren prekidač), dok za tačku C, MOSFET ima malu otpornost r_{DS} , kao i mali pad napona između drejna i sorsa (zatvoren prekidač). Inkrementalna otpornost u tački C se označava o kao otpornost zatvaranja (*closure*). Rad MOSFET-a kao prekidača je ilustrovan slikom 2.12.



slika 2.11 Određivanje naponske prenosne karakteristike kola prikazanog na slici 2.10(a) grafičkom analizom.



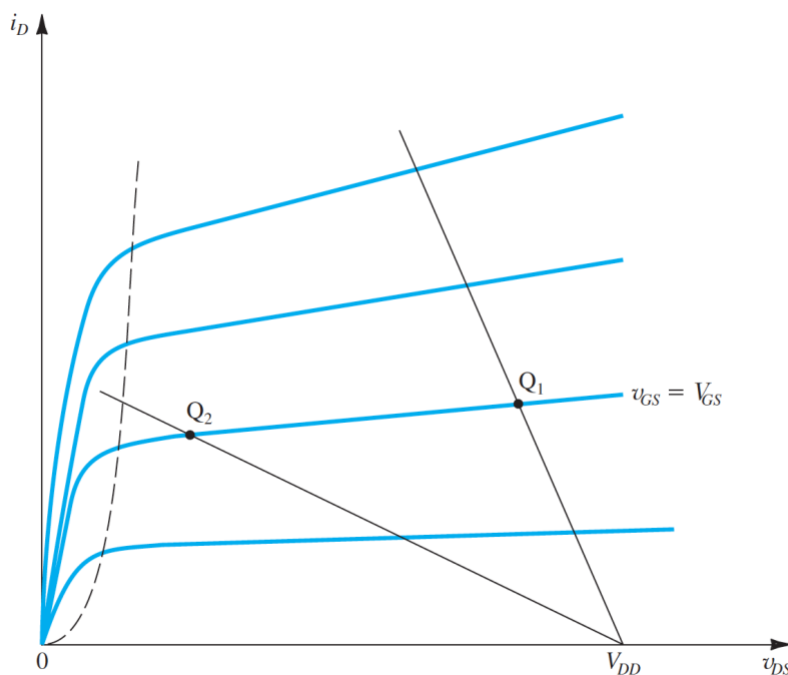
slika 2.12 MOSFET u kolu prikazanom na slici 2.10(a) kao prekidač.

2.7 Pozicioniranje polarizacione tačke Q

Za MOSFET pojačavač, polarizaciona tačka Q je određena vrijednošću napona V_{GS} i vrijednošću otpornosti R_D . Dva važna parametra prilikom odlučivanja o poziciji polarizacione tačke Q su traženo pojačanje i *swing* signala na izlazu kola. Posmatra se VTC prikazana na slici 2.10(b). Vrijednost otpornosti R_D je fiksna i jedino je moguće izabrati napon V_{GS} . Kako se nagib karakteristike povećava prema tački B, veće pojačanje odgovara poziciji tačke Q bliže tački B. Sa druge strane, što je tačka Q

bliža tački B, manja je maksimalna moguća vrijednost „negativnog“ signala na izlazu, odnosno, manji je opseg „negativnog“ signala na izlazu. Potrebno je izvršiti kompromis: za dato R_D , potrebno je pozicionirati tačku Q što bliže tački B kako bi se dobilo veliko pojačanje, ali i dovoljno daleko od tačke B kako bi se obezbijedio traženi „negativni“ opseg signala na izlazu.

Prilikom odabira otpornosti R_D , korisno je obratiti pažnju na $i_D - v_{DS}$ karakteristiku. Na slici 2.13 prikazane su dvije linije opterećenja koje rezultiraju dvijema ekstremnim polarizacionim tačkama: tačka Q_1 je suviše blizu naponu napajanja V_{DD} , što vodi do značajnog ograničenja „pozitivnog“ opsega signala v_{ds} . Ukoliko bi amplituda ulaznog napona bila „dovoljno“ velika, došlo bi do zakočenja MOSFET-a, u dijelu ciklusa koji je u okolini pozitivnog vrha signala, a samim tim i do odsijecanja pozitivnih vrhova izlaznog signala. Ova situacija se označava kao nedostatak „headroom-a“. Slično, tačka Q_2 je previše blizu granici prema omskom regionu, što značajno ograničava negativni opseg signala v_{ds} . Ukoliko bi amplituda ulaznog napona bila „dovoljno“ velika, došlo bi do prelaska MOSFET-a u omski režim rada, u dijelu ciklusa koji je u okolini negativnog vrha signala, a samim tim i do izobličenja izlaznog signala. Ova situacija se označava kao nedostatak „legroom-a“.



slika 2.13 Pozicioniranje polarizacione tačke Q.

Literatura

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

VJEŽBA

1 Uticaj pozicije polarizacione tačke Q

- Za pojačavač prikazan na slici 2.10(a), odrediti poziciju polarizacione tačke Q, ukoliko je polarizacioni napon $V_{GS} = 1$ V. Poznato je: napon napajanja kola $V_{DD} = 3$ V, transkonduktanski parametar $k'_n = 137.5 \mu\text{S}$, dimenzije MOSFET-a $(W/L) = (100 \mu\text{m} / 1 \mu\text{m})$ i napon praga $V_t = 0.55$ V. Smatrati da je koeficijent modulacije dužine kanala $\lambda \rightarrow 0$, a) otpornost $R_D = 1 \text{ k}\Omega$, b) otpornost $R_D = 2 \text{ k}\Omega$.

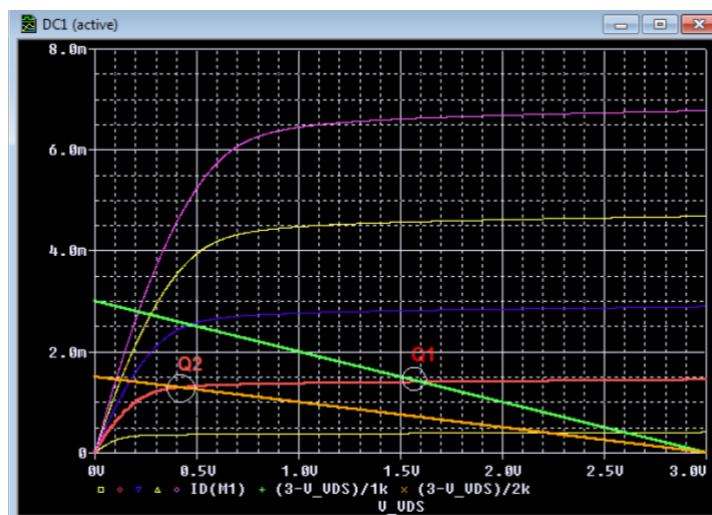
Za kolo prikazano na slici 2.10(a), polarizaciona struja drejna iznosi:

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = 1.39 \text{ mA}$$

dok je napon V_{DS} :

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D = 1.61 \text{ V}$$

Na slici 1.1 je prikazana i_D - v_{DS} karakteristika MOSFET-a za vrijednosti napona gejtsors 0.8 V, 1 V, 1.2 V, 1.4 V i 1.6 V (pogledati prethodnu vježbu). Na istoj slici, prikazana je i linija opterećenja, relacija (2.29). Polarizaciona tačka Q_1 ima koordinate (1.60 V, 1.40 mA). Ukoliko se otpornost R_D poveća na 2 k Ω , polarizaciona tačka se pomjera prema omskom regionu. Polarizaciona tačka Q_2 ima koordinate (420 mV, 1.29 mA).



slika 1.1

- Za isto kolo izvršiti parametarsku DC analizu u cilju određivanja naponske prenosne karakteristike. Ulazni napon se mijenja u opsegu 0 V do 1.5 V sa korakom 1mV. Parametar je otpornost R_D koja ima vrijednosti 1 k Ω i 2 k Ω . Označiti poziciju polarizacione tačke Q za oba slučaja.

Na slici 1.2 su prikazani rezultati simulacije. Može se uočiti da je nagib karakteristike za veću vrijednost otpornosti veći, što je i očekivano jer je pojačanje u aktivnom režimu rada proporcionalno ovoj otpornosti.

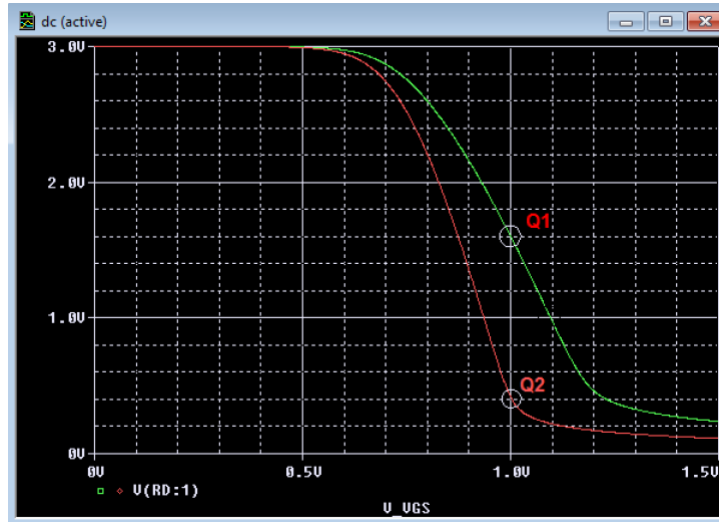
- U cilju ilustracije uticaja pozicije DC radne tačke na ponašanje pojačavača, u slučaju izlaznog signala velike amplitude, izvršiti simulaciju rada kola prikazanog na slici 2.10(a) u vremenskom domenu. Na ulaz kola dovesti trougaoni talasni oblik *peak-to-peak* vrijednosti 0.4 V i frekvencije 1 kHz, sa polarizacionim naponom $V_{GS} = 1$ V. Napon napajanja kola je $V_{DD} = 3$ V i otpornost a) $R_D = 1 \text{ k}\Omega$, b) $R_D = 2 \text{ k}\Omega$.

a) Transkonduktansa g_m MOSFET-a za polarizacionu tačku Q_1 iznosi:

$$g_m = \sqrt{2k_n I_D} = 6.20 \text{ mS}$$

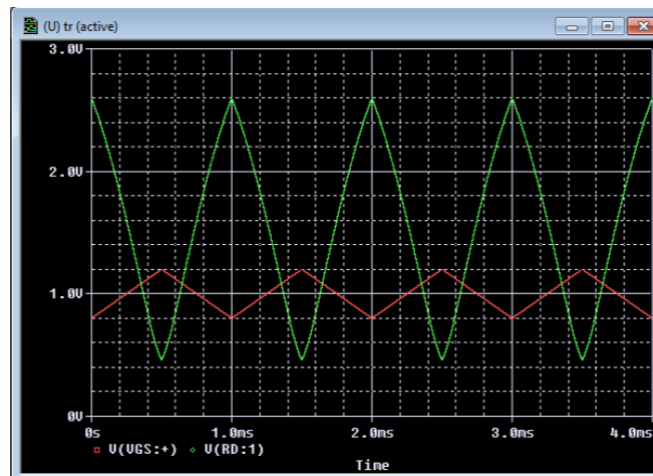
dok je naponsko pojačanje kola prikazanog na slici 2.10(a), za polarizacionu tačku Q₁:

$$A_v = -g_m R_D = 6.2$$



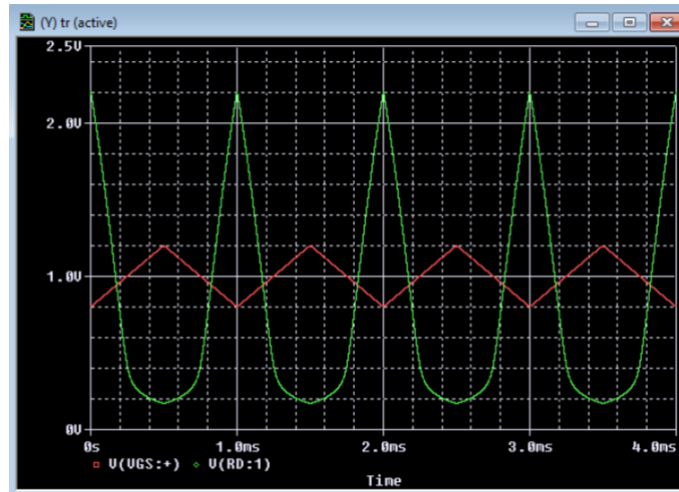
slika 1.2

Na slici 1.3 su prikazani rezultati simulacije. Može se primijetiti da je pojačanje dosta linearno. Vrijednost pojačanja dobijena u simulacijama je manja nego ona dobijena računskim putem. **Zašto?**



slika 1.3

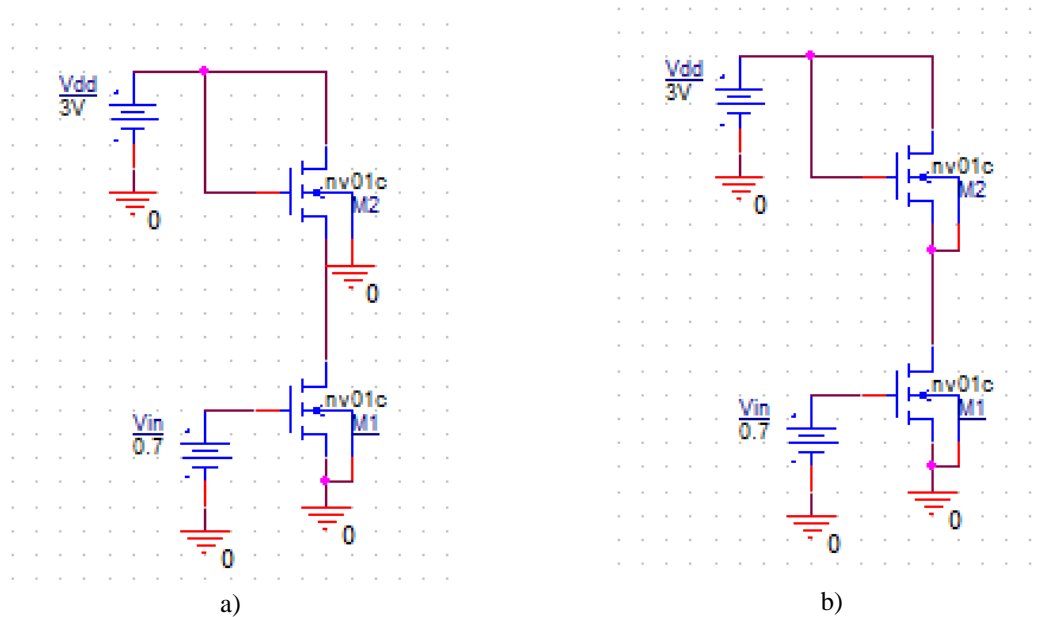
b) Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.4. Može se uočiti značajna distorzija izlaznog napona u „negativnom“ dijelu signala. Ovaj primjer ilustruje značaj pravilnog pozicioniranja polarizacione tačke pojačavača. Naime, veoma je važno da polarizaciona tačka bude negdje „na sredini“ aktivnog regiona, kako bi izlazni napon imao što veći opseg, uz prihvatljivu linearnost.



slika 1.4

2 Uticaj *body* efekta na pojačanje

- Za kolo prikazano na slici 1.5(a) izvršiti DC analizu u cilju određivanja naponske prenosne karakteristike. Ulazni napon se mijenja u opsegu od 0 V do 3 V sa korakom 1 mV. Parametar $\gamma = 0.6 \text{ V}^{1/2}$, parametar $2\phi_f = 0.6 \text{ V}$, dok je napon praga $V_{t0} = 0.55 \text{ V}$. Dimenzije MOSFET-ova su $(W/L)_1 = (70 \mu\text{m}/0.7 \mu\text{m})$ i $(W/L)_2 = (7 \mu\text{m}/7 \mu\text{m})$.



slika 1.5

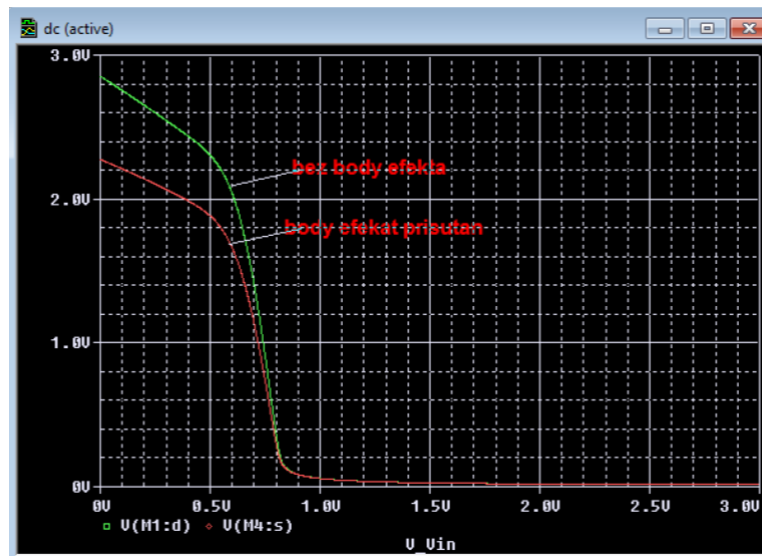
- Ponoviti prethodnu DC analizu pri čemu su sors i *body* MOSFET-a M2 kratko vezani u cilju eliminisanja *body* efekta, slika 1.5(b).

Na slici 1.6 prikazani su rezultati obje simulacije, radi lakšeg poređenja. Očigledan nedostatak ovog pojačavača je u tome što mu je naponsko pojačanje narušeno zbog prisustva *body* efekta kod MOSFET- a M2. U slučaju kola prikazanog na slici 1.5(a) prenosna karakteristika ima nagib u zoni zasićenja MOSFET- a M1 od -7.156 V/V. U slučaju kola prikazanog na slici 1.5(b) prenosna karakteristika ima nagib u zoni zasićenja MOSFET- a M1 od -8.714 V/V. Pojačanje je izračunato *Bias Point* analizom (kao u slučaju operacionog pojačavača), pri čemu je polarizacioni napon na ulazu 0.7 V

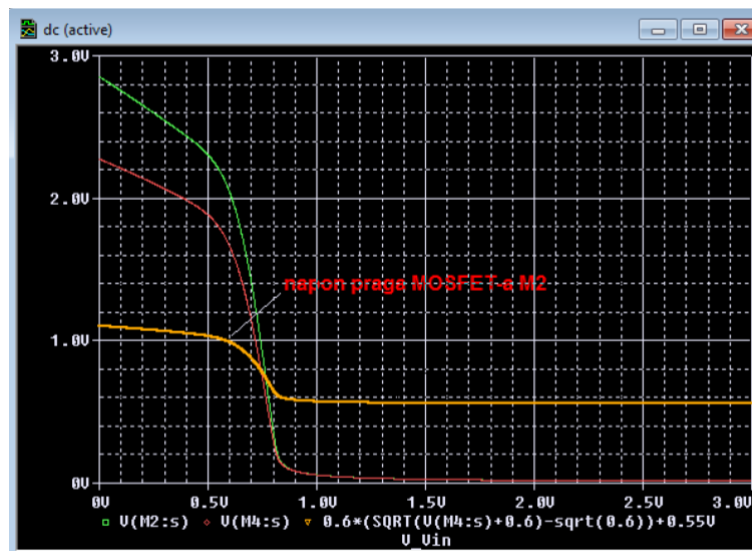
(**zašto?**). Razlog ovakvog ponašanja je povećanje napona praga MOSFET-a M₂ zbog prisustva *body* efekta. Naime, napon praga MOSFET-a zavisi od napona između sorsa i podloga prema sljedećoj relaciji:

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

Za $\gamma = 0.6 \text{ V}^{1/2}$ i $2\phi_f = 0.6 \text{ V}$, napon praga se sa promjenom napona sors-podloga mijenja kako je prikazano na slici 1.6. Razlika između dvije prikazane prenosne karakteristike približno je jednaka razlici napona praga MOSFET-a M₂ u slučaju bez *body* efekta i u slučaju kada je *body* efekat prisutan.



slika 1.5



slika 1.6

Postupak izvođenja simulacija možete preuzeti sa: [MOSFET kao pojačavač](#)

Literatura

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

