

2 MOSFET KAO POJAČAVAČ - NASTAVAK

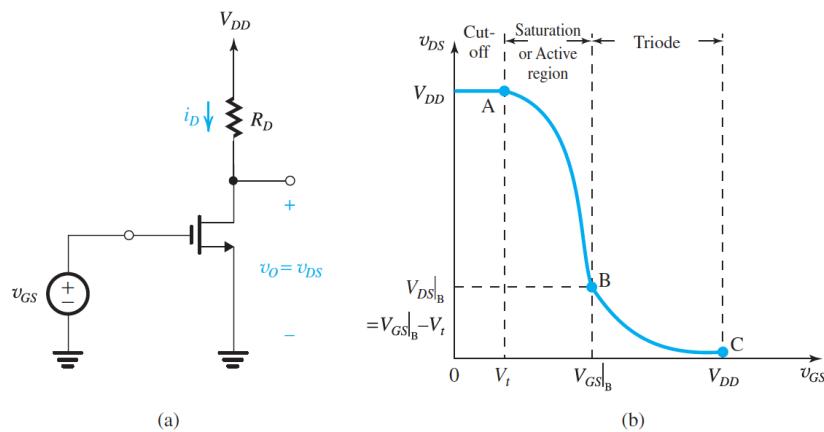
Strujno naponska karakteristika MOSFET-a $i_D - v_{GS}$ ukazuje da je u pitanju nelinearna zavisnost. Ipak, primjenom odgovarajućih dizajnerskih tehnika, može se dobiti gotovo linearno pojačanje pojačavača baziranog na MOSFET-u.

2.2 Naponski pojačavač

MOSFET je, u principu, transkonduktansni pojačavač – ulaz mu je napon, a izlaz mu je struja. Međutim, naponski pojačavači imaju širu primjenu. Jednostavan način za konverziju transkonduktansnog pojačavača u naponski pojačavač je propuštanjem izlazne struje kroz otpornik i izlaz je napon na krajevima otpornika. Jedan primjer ovakvog pojačavača je prikazan na slici 2.8(a). Ulagani napon je napon v_{GS} . Otpornik R_D (otporno opterećenje) pretvara struju drejna i_D u napon srazmjeran vrijednosti $R_D i_D$. V_{DD} je 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 naponu 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 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 uvek visoko, MOSFET će raditi u zasićenju (ili aktivnom režimu). Sa daljim povećanjem napona v_{GS} , MOSFET ostaje u zasićenju sve dok napon v_{DS} ne 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:

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

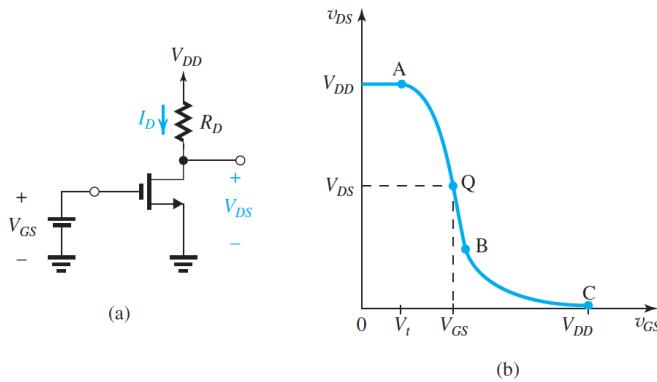
pri čemu je:

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

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.

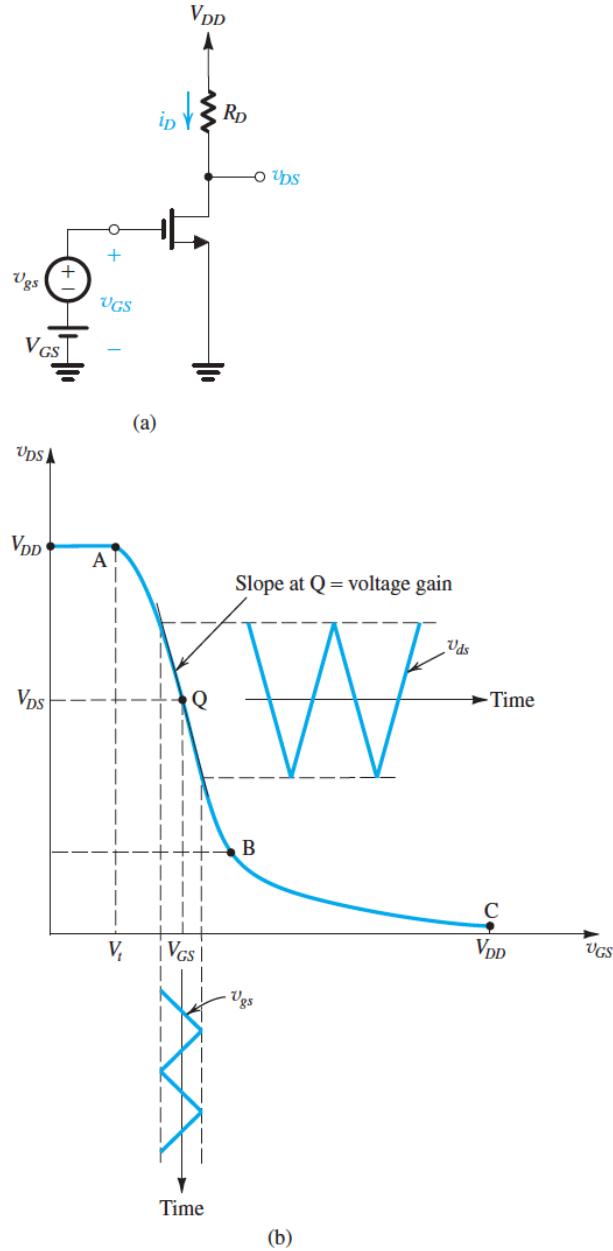
Tačka Q se označava kao tačka polarizacije (*bias point*) ili DC radna tačka. Takođe, kako u tački Q nije prisutan mali signal, koristi se i termin mirna radna tačka (*quiescent*), što je i razlog oznake Q.

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 „napušтала“ 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 i na ulazu. Upravo ovo je suština metode dobijanja linearog pojačanja koristeći nelinearnu oblast rada 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 linerano 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. Oblik izlaznog napona v_{ds} bi odstupao 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. Ukoliko bi se ovo desilo u toku opadanja vrijednosti 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 u toku porasta vrijednosti 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 linearne 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. To se moglo zaključiti i na osnovu prenosne 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 i intuitivno moglo zaključiti.

Još jedan izraz za naponsko pojačanje A_v se može izvesi 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} . Moguće je i sljedeći način izražavanja naponskog pojačanja A_v :

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

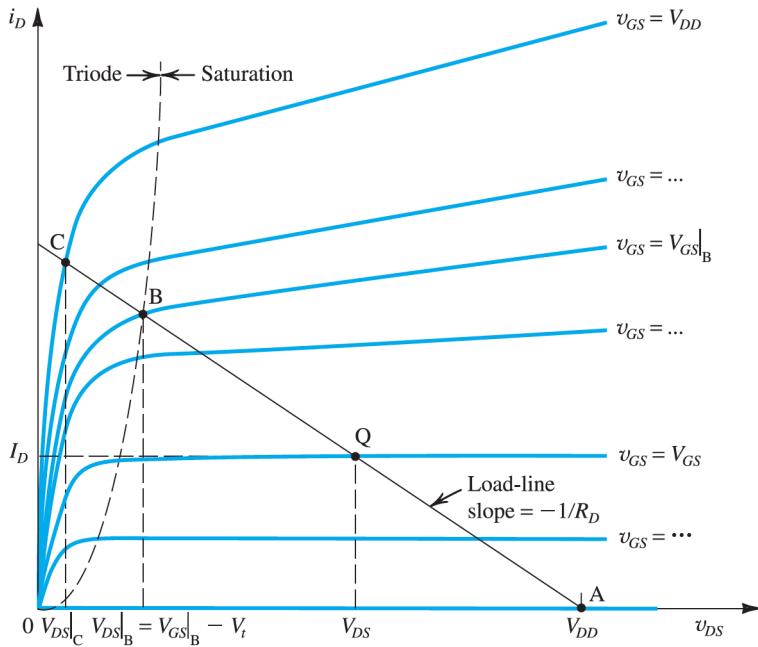
2.6 Određivanje naposne prenosne karakteristike grafičkom analizom

Na slici 2.11 prikazan je grafički metod određivanja naposne 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 tački 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:

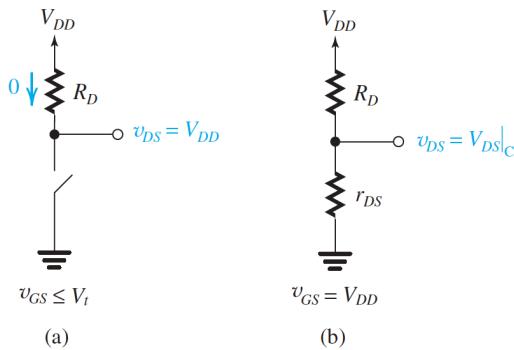
$$i_D = \frac{V_{DD}}{R_D} - \frac{1}{R_D} v_{DS} \quad (2.29)$$

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 tačaka 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 drenova i sorsa (zatvoren prekidač). Inkrementalna otpornost u tački C se označava i 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.



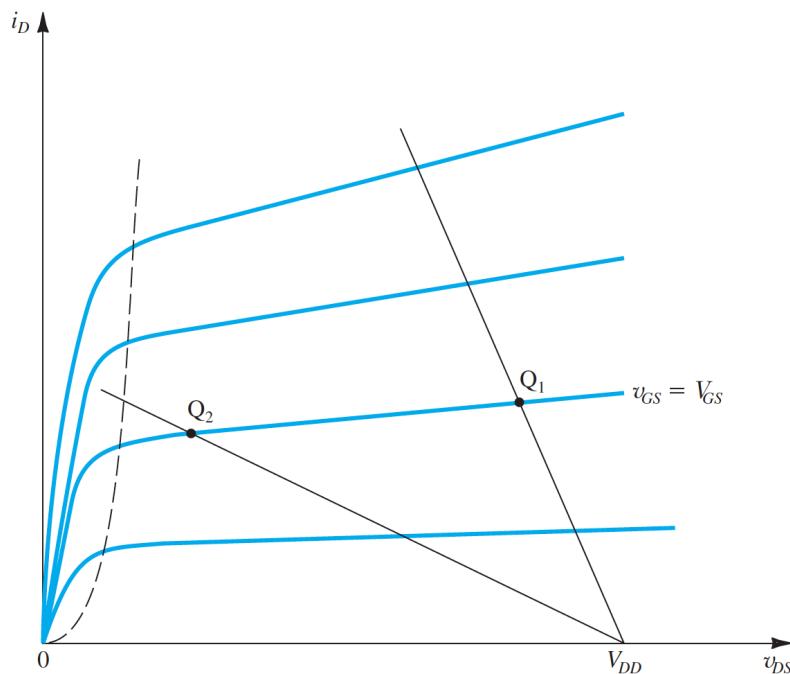
slika 2.12 MOSFET u kolu prikazanom na slici 2.10(a) kao prekidač.

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

bliže tački B, manja je maksimalna moguća vrijednost „negativnog“ signala na izlazu, odnosno, manji je opseg „negativnog“ signala na izlazu. Potrebno je naći kompromis: za dato R_D , treba 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 napona 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 na izlazu, 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 suviše velika, došlo bi do prelaska MOSFET-a u omski režim rada, u dijelu ciklusa koji je u okolini negativnog vrha izlaznog 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, transkonduktansni 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 koeficijent modulacije dužine kanala $\lambda \rightarrow 0$, a) otpornost $R_D = 1 \text{k}\Omega$, b) otpornost $R_D = 2 \text{k}\Omega$.

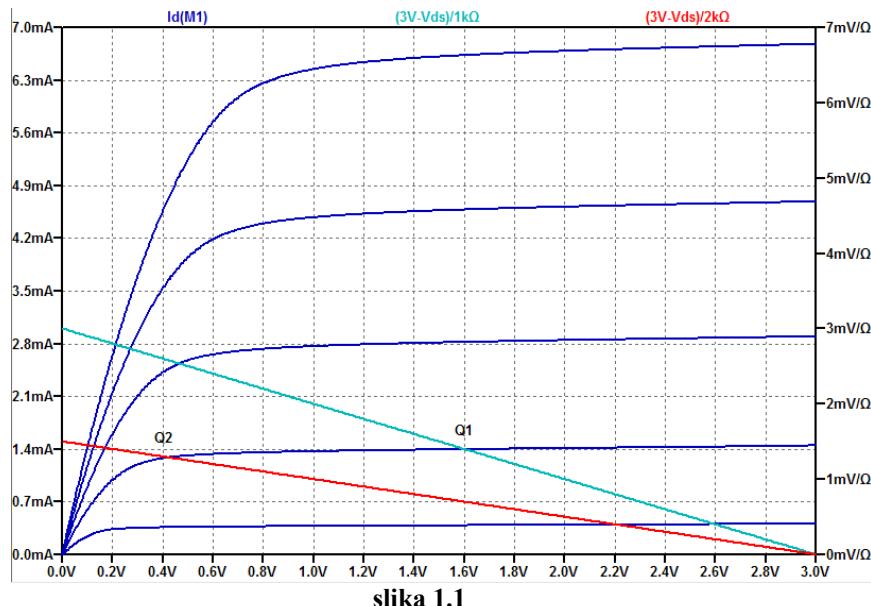
Za kolo prikazano na slici 2.10(a), polarizaciona struja drejna iznosi:

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

dok je napon V_{DS} :

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$$

Na slici 1.1 je prikazana $i_D - v_{DS}$ karakteristika MOSFET-a za vrijednosti napona gejt-sors 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 $2 \text{k}\Omega$, polarizaciona tačka se pomjera prema omskom regionu. Polarizaciona tačka Q_2 ima koordinate $(420$ mV, 1.29 mA).



- Za isto kolo izvršiti parametarsku DC analizu u cilju određivanje naponske prenosne karakteristike. Ulazni napon se mijenja u opsegu 0 V do 1.5 V sa korakom 1 mV. Parametar je otpornost R_D koja ima vrijednosti $1 \text{k}\Omega$ i $2 \text{k}\Omega$. 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.

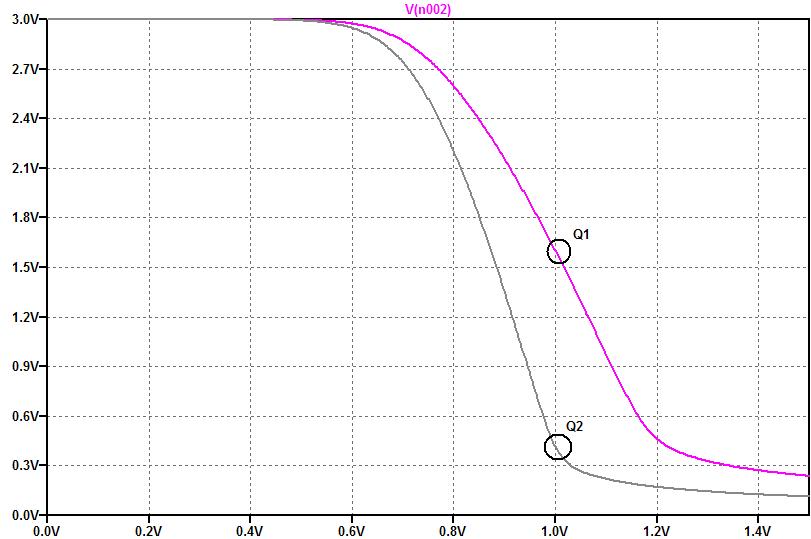
- U cilju ilustracije uticaja pozicije DC radne tačke na ponašanje pojačavača, u slučaju izlaznog signala velike amplitude, izvršiti simulaciju rada kola prikazanog na slici 2.10(a) u vremenskom domenu. Na ulaz kola dovesti trougaoni talasni oblik *peak-to-peak* vrijednosti 0.4 V i frekvencije 1 kHz, 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 Q₁ iznosi:

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

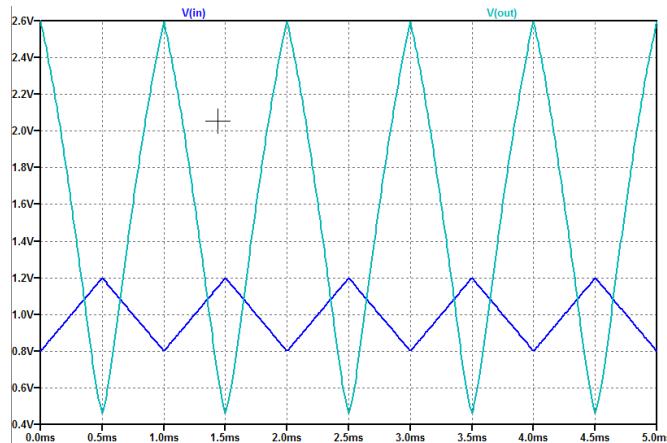
dok je naponsko pojačanje kola prikazanog na slici 2.10(a), za polarizacionu tačku Q₁:

$$A_v = -g_m R_D = -6.2$$



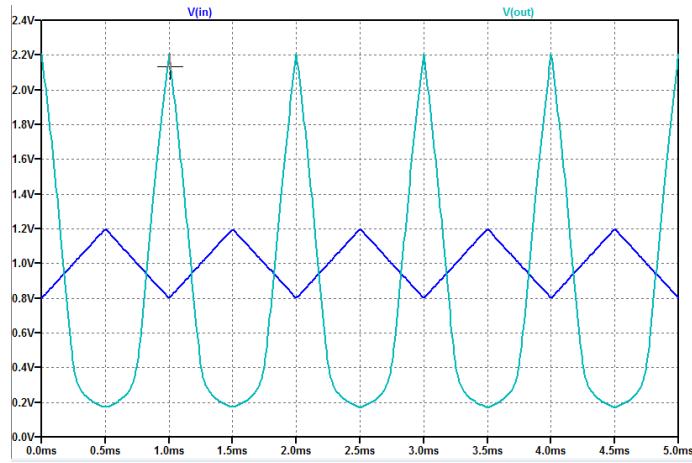
slika 1.2

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

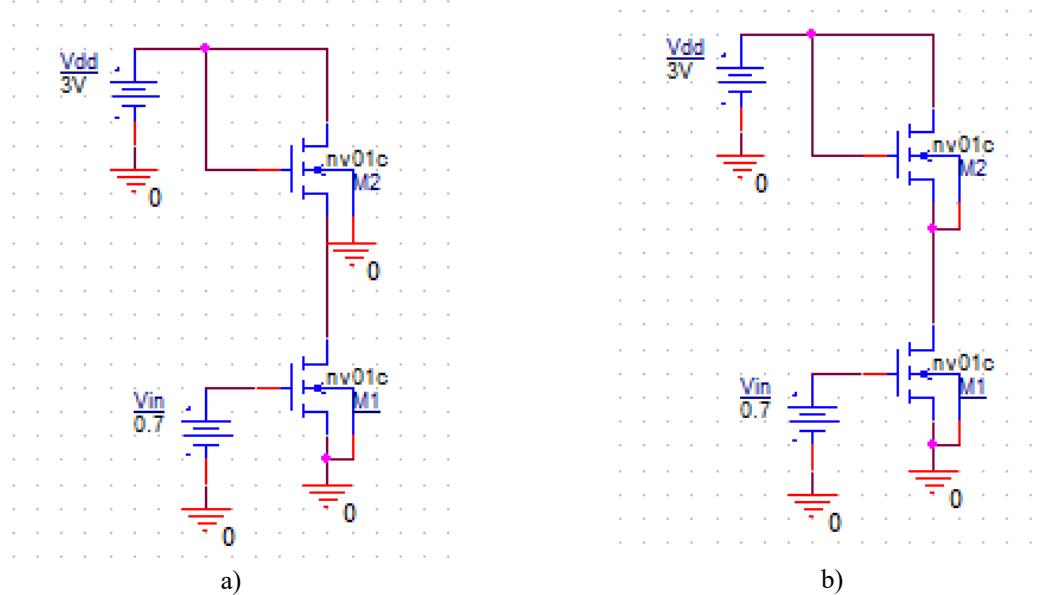
b) Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.4. Može se uočiti značajna distorzija izlaznog napona u „negativnom“ dijelu signala. Ovaj primjer ilustruje značaj pravilnog pozicioniranja polarizacione tačke pojačavača. Naime, veoma je važno da polarizaciona tačka bude negdje „na sredini“ aktivnog regiona, 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 $V_{th} = 0.55 \text{ V}$. 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

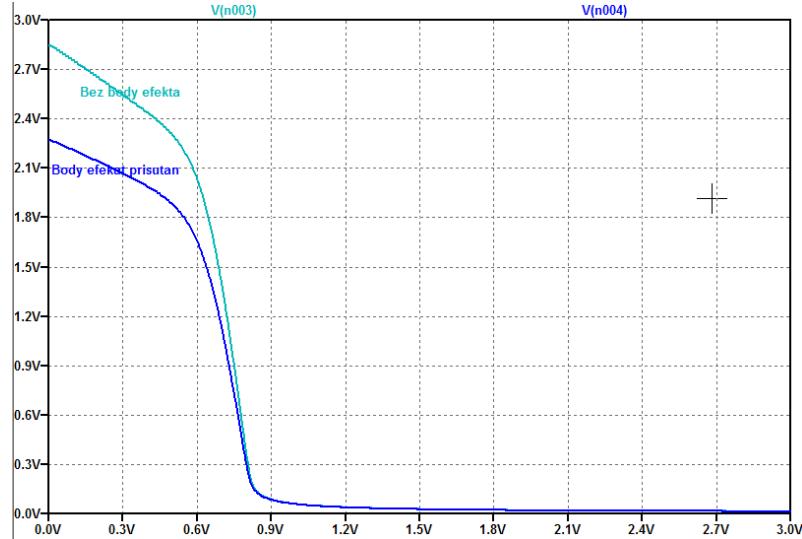
- Ponoviti prethodnu DC analizu pri čemu su sors i *body* MOSFET-a M₂ kratko vezani u cilju eliminisanja *body* efekta, slika 1.5(b).

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, pri čemu je polarizacioni napon na ulazu 0.7 V (zašto?). Razlog ovakvog ponašanja je

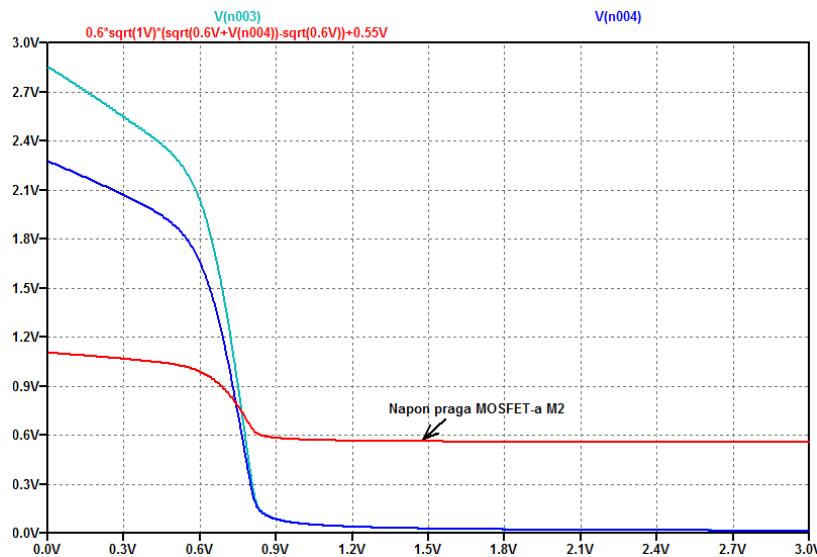
povećanje napona praga MOSFET-a M₂ zbog prisustva *body* efekta. Naime, napon praga MOSFET-a zavisi od napona između sorsa i podloge prema sljedećoj relaciji:

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

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

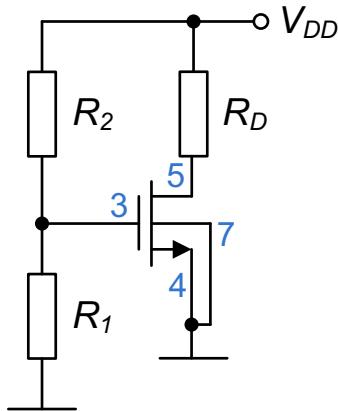
Literatura

- 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.

LABORATORIJSKA VJEŽBA

1 Određivanje izlazne otpornosti, napona V_A i koeficijenta modulacije dužine kanala MOSFET-a

Za kolo prikazano na slici 1.1 izmjeriti napone V_{DS} , V_{GS} i napon V_{RD} na krajevima otpornika R_D , kao i otpornost R_D . Izračunati struju I_D . Napon napajanja kola je $V_{DD}=10$ V, $R_I=47$ k Ω , $R_2=100$ k Ω , $R_D=\{3.3$ k Ω , 120 $\Omega\}$. Rezultate mjerena upisati u tabelu 1.1.



Slika 1.1

Tabela 1.1

$R_D = 3.3$ kΩ
R_D [Ω]
V_{GS} [V]
V_{DS} [V]
V_{RD} [V]
$I_D = V_{RD}/R_D$ [mA]
$R_D = 120$ Ω
R_D [Ω]
V_{GS} [V]
V_{DS} [V]
V_{RD} [V]
$I_D = V_{RD}/R_D$ [mA]

Na osnovu izmjerenih rezultata izračunati izlaznu otpornost r_{ds} MOSFET-a:

$$r_{ds} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} = \text{_____} [\text{k}\Omega]$$

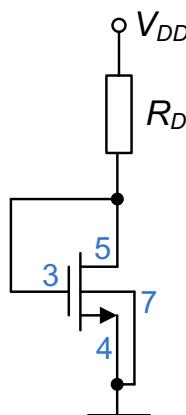
Na osnovu izmjerenih rezultata i izračunate izlazne otpornost r_{ds} , odrediti napon V_A i koeficijent modulacije dužine kanala λ MOSFET-a:

$$V_A = r_{ds} I_D - V_{DS} = \text{_____} [\text{V}]$$

$$\lambda = \frac{1}{V_A} = \text{_____} [\text{V}^{-1}]$$

2 Određivanje transkonduktansnog parametra i napona praga MOSFET-a

Za kolo prikazano na slici 1.2 izmjeriti napon V_{GS} i napon V_R na krajevima otpornika R_D , kao i otpornost R_D . Izračunati struju I_D . Napon napajanja kola je $V_{DD}=10$ V, $R_D = \{100 \text{ k}\Omega, 22 \text{ k}\Omega, 3.3 \text{ k}\Omega\}$. Rezultate mjerenja upisati u tabelu 1.2.



Slika 1.2

Tabela 1.2

R_D = 100 kΩ	
R _D [Ω]	
V _{GS} [V]	
V _{RD} [V]	
I _D =V _{RD} /R _D [μA]	
R_D = 22 kΩ	
R _D [Ω]	
V _{GS} [V]	
V _{RD} [V]	
I _D =V _{RD} /R _D [μA]	
R_D = 3.3 kΩ	
R _D [Ω]	
V _{GS} [V]	
V _{RD} [V]	
I _D =V _{RD} /R _D [μA]	

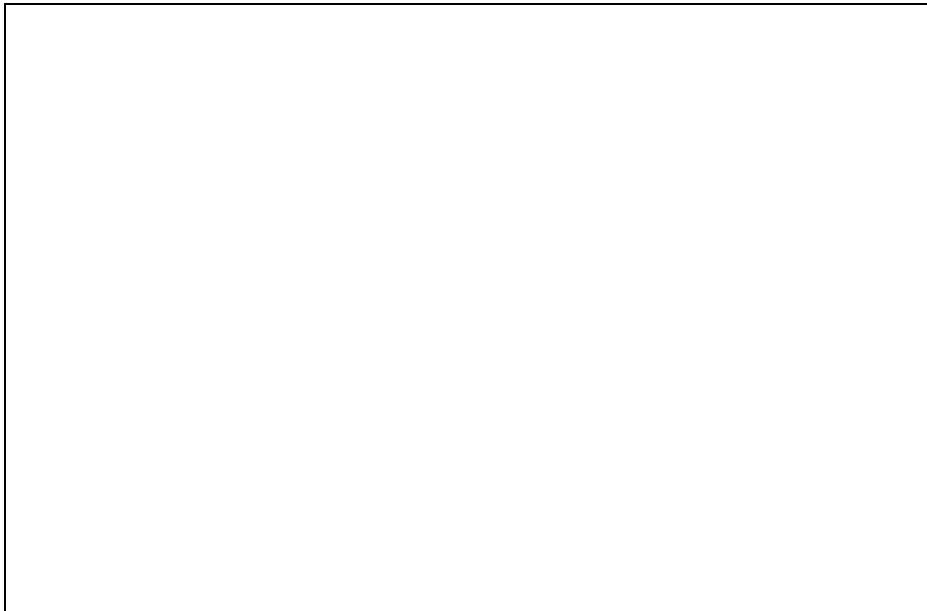
Grafički prikazati tačke (x,y) , pri čemu je $x=V_{GS}$ i $y = \sqrt{\frac{I_D}{1+\lambda V_{DS}}}$, kao i optimalnu pravu kroz ove tri tačke. Na osnovu dobijene prave odrediti transkonduktansni parametar k_n i napon praga V_m .

Nanomene:

- Transkonduktansni parametar se izračunava na osnovu koeficijenta pravca optimalne prave, dok je napon praga presiek optimalne prave sa x osom:

$$y = \sqrt{\frac{k_n}{2}}(x - V_{tn})$$

2. Za određivanje optimalne prave i ostala izračunavanja koristiti kod iz priloga. Djelovi koda u okviru kojih je potrebno unijeti rezultate mjerjenja su označeni žutom bojom.



Slika 1.3 – Određivanje transkonduktansnog parametra i napona praga MOSFET-a

$$V_{th} = \underline{\hspace{2cm}} \text{[V]}, \\ k_n = \underline{\hspace{2cm}} \text{[mA/V^2]}$$

PRILOG

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math

# 1 Određivanje izlazne otpornosti, napona VA i koeficijenta modulacije
# dužine kanala MOSFET-a

Vds1 = 5.17 # Unesite vrijednosti u V
Vds2 = 9.78 # Unesite vrijednosti u V
Id1 = 1.47 # Unesite vrijednosti u mA
Id2 = 1.51 # Unesite vrijednosti u mA

rds = round((Vds2-Vds1)/(Id2-Id1),1)
VA = round(rds*Id1-Vds1,1)

# 2 Određivanje transkonduktansnog parametra i napona praga MOSFET-a

Id = [0.0835, 0.359, 1.98] # Unesite vrijednosti u mA
Vgs = [1.76, 2.22, 3.52] # Unesite vrijednosti u V

y = [0, 0, 0]
for i in range(0,3):
    y[i]=math.sqrt(Id[i]/(1+Vgs[i]/VA))
plt.plot(Vgs,y,'+')
p = np.polyfit(Vgs,y,1)
f = np.poly1d(p)
Vgs = [1,2,3,4]
plt.plot(Vgs,f(Vgs), color = 'tomato', label = 'optimal line')
plt.xlabel('Vgs[V]')
plt.ylabel('sqrt(Id/(1+lambdaVds)) [sqrt(mA)]')
```

```
plt.legend()
plt.grid()

print("rds [kOhm]")
print(rds)
print("VA [V]:")
print(VA)
print("kn [mA/V2]:")
print(2*p[0]*p[0])
print("Napon praga [V]:")
print(-p[1]/p[0])
```