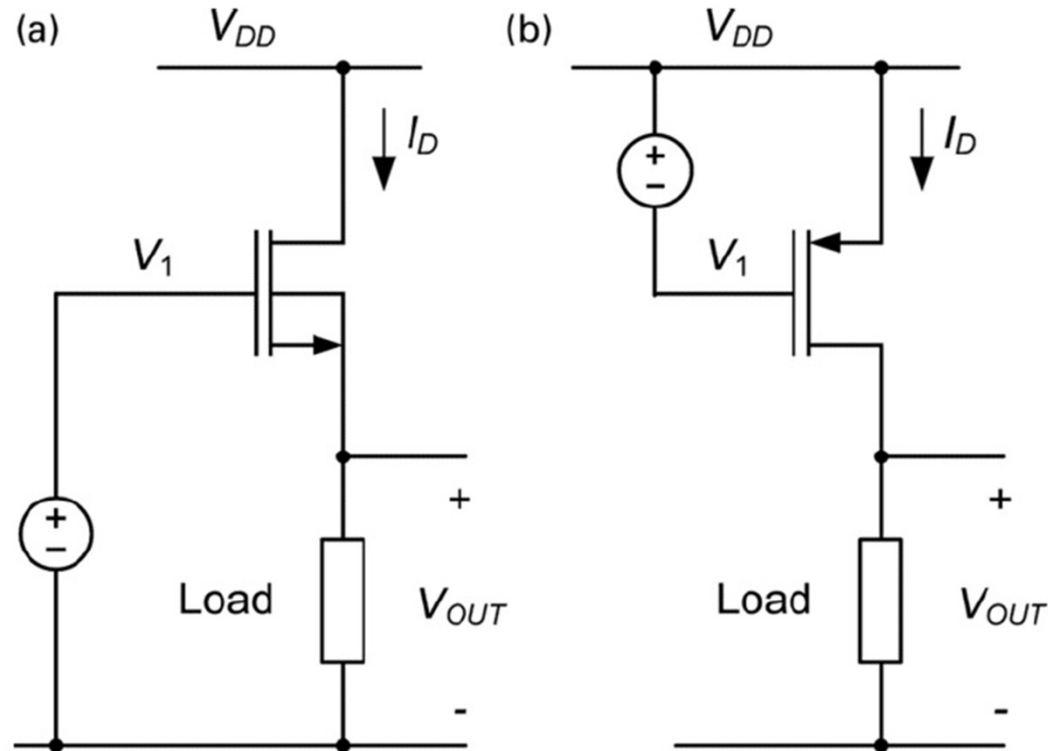


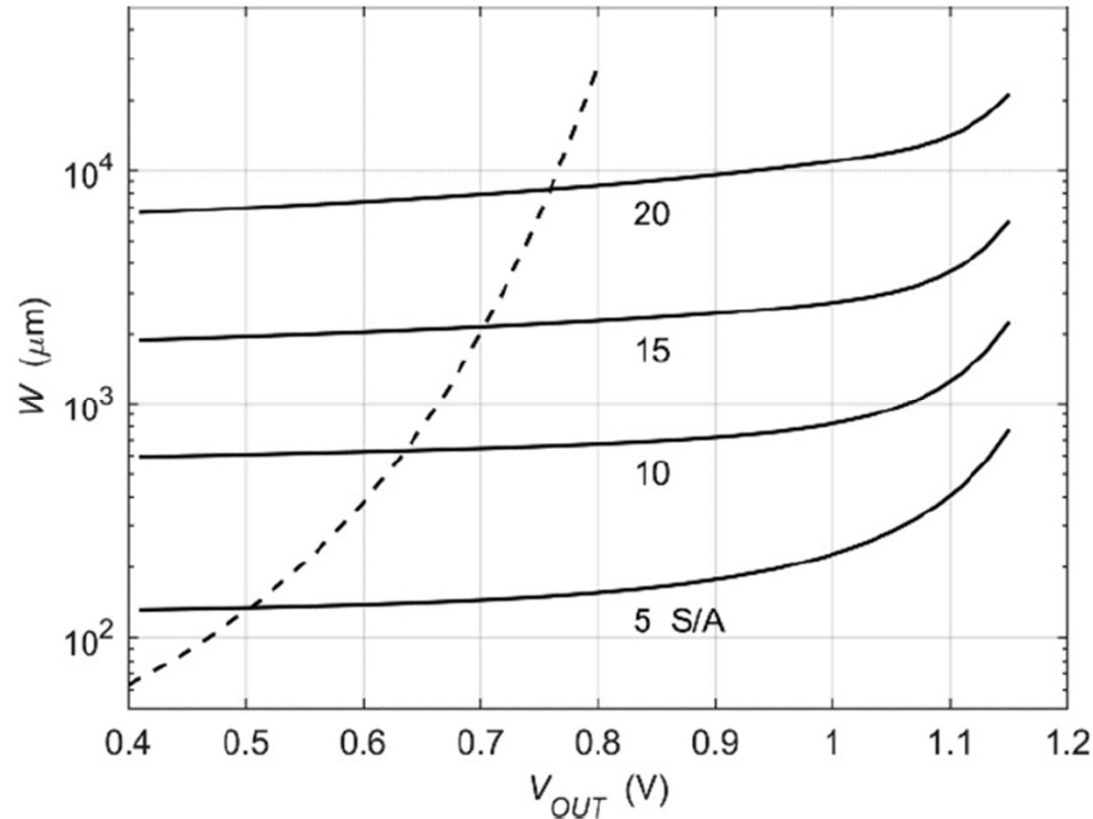
□ Low-Dropout Voltage Regulator

- U integrisanim kolima česta je potreba za napajanjem sa malom razlikom između ulaznog i izlaznog napona (Low-Dropout)



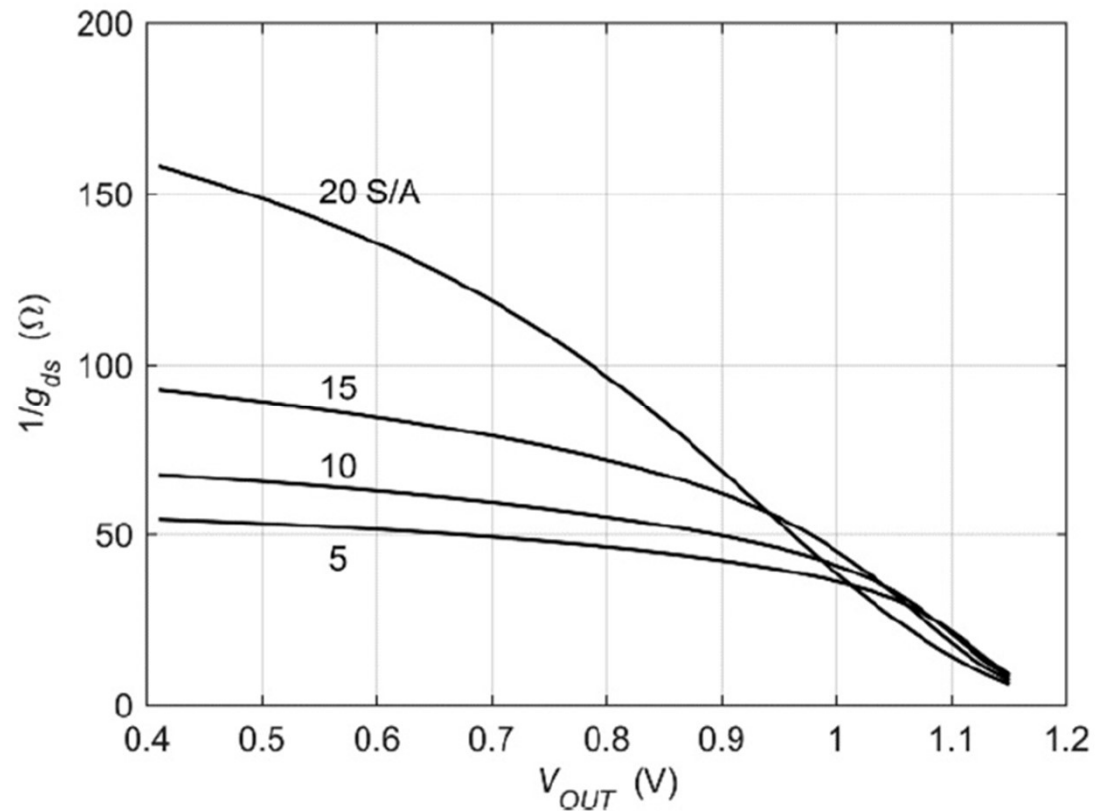
- Za malu razliku ulaznog promenljivog napona i regulisanog izlaznog napona koristi se stepen u spoju sa zajedničkim sorsom (PMOS)
- Može se koristiti i stepen sa zajedničkim drejnom (NMOS), ali je potrebno obezbediti da napon na gejtju bude veći od ulaznog napona

- Na slici je prikazana zavisnost potrebne širine kanala serijskog PMOS tranzistora kada je $V_{DD}=1.2V$, $I_{OUT}=10mA$ i $L=60nm$.



- Još jedna važna karakteristika LDO-a je potiskivanje impulsnog šuma koji potiče od napajanja (V_{DD}), a koji je posledica impulsnih struja u digitalnim blokovima
- Serijski tranzistor i izlazno opterećenje LDO formiraju razdelnik napona

- Na sledećoj slici je prikazana otpornost tranzistora ($1/g_{ds}$) za male signale u funkciji izlaznog konstantnog napona



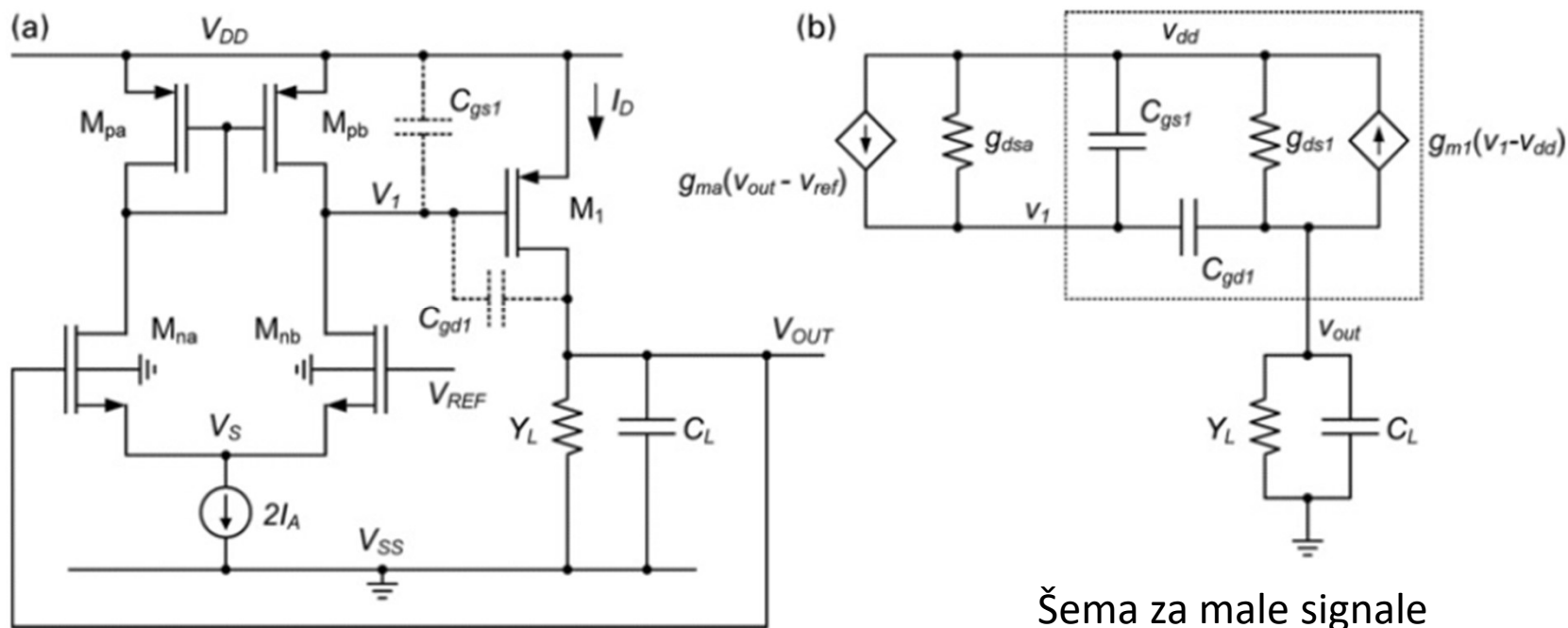
- Pri $V_{OUT}=0.9V$, otpornost se, u zavisnosti od efikasnosti transkonduktanse, menja u opsegu od 40Ω do 70Ω
- Da bi se kvantifikovao uticaj šuma koji potiče od napona napajanje definiše se PSR (Power Supply Rejection)

$$PSR_{OL} = \frac{v_{dd}}{v_{out}} = \frac{Y_L + g_{ds}}{g_{ds}}$$

- U otvorenoj sprezi (open-loop), prema prethodnoj slici opseg PSR je

$$2 \leq PSR_{OL} \leq 3$$

- Da bi se smanjio uticaj napona napajanja na izlazni napon, mora se uvesti negativna reakcija
- Najčešće korišćena konfiguracija LDO sa povratnom spregom i pojačavačem greške je prikazana na sledećoj slici



$$Y_L \approx G_L$$

Šema za male signale

LDO na niskim učestanostima

- Pojačanje u zatvorenoj sprezi

$$\left. \frac{v_{out}}{v_{ref}} \right|_{LF} = \frac{A_1 A_{dif}}{1 + A_1 A_{dif}}$$

- PSR u zatvorenoj sprezi

$$PSR_{LF} = \frac{G_L + g_{ds1} + g_{m1} A_{dif}}{g_{ds1}} = PSR_{OL} + \left(\frac{g_m}{g_{ds}} \right)_1 A_{dif} \approx \left(\frac{g_m}{g_{ds}} \right)_1 A_{dif}$$

- Izlazna otpornost u zatvorenoj sprezi

$$R_{out} = \frac{v_{out}}{i_{load}} \cong \frac{1}{g_{m1} A_{dif}}$$

Primer: Odrediti dimenzije svih tranzistora u kolu LDO tako da bude: VDD=1.2V, VOUT=0.9V, IOU=10mA. Dizajn uraditi tako da se maksimizira kružno pojačanje.

- Pojačanje izlaznog tranzistora:

$$A_1 = \frac{g_{m1}}{G_L + g_{ds1}} = \frac{(g_m / I_D)_1}{\frac{G_L}{I_D} + \left(\frac{g_{ds}}{I_D} \right)_1} = \frac{(g_m / I_D)_1}{\frac{1}{V_{OUT}} + \left(\frac{g_{ds}}{I_D} \right)_1}$$

- g_m/ID i g_{ds}/ID ćemo odrediti pomoću lookup tabela
 $g_{ds_ID} = \text{lookup}(\text{pch}, 'GDS_ID', 'GM_ID', g_m_ID, 'VDS', 'VDD-V', 'L', L);$
- $(g_m/ID)_1$ mora biti veće od 6.6 S/A da bi $V_{DsatPMOS}$ bilo manje od 0.3V
- Širina W_1 se dobija kada se struja podeli sa gustinom struje J_{D1}
 $J_D = \text{lookup}(\text{pch}, 'ID_W', 'GM_ID', g_m_ID, 'VDS', 'VDD-V', 'L', L);$

U sledećoj tabeli su date vrednosti pojačanja, širine kanala tranzistora, napona gejtsors i parazitnih kapacitivnosti C_{gs} i C_{gd} , kada se g_m/I_D menja u opsegu od 7 do 12.

$(g_m/ID)_1$ (S/A)		7	8	9	10	11	12
A_1	L=100nm	3,37	3.86	4.33	4.78	5.20	5.61
	L=200nm	3.75	4.31	4.84	5.36	5.88	6.39
W_1 (μm)	L=100nm	419	544	700	890	1122	1402
	L=200nm	721	943	1216	1543	1934	2396
V_{GS1} (mV)	L=100nm	726.6	691.6	662	636.6	614.6	595.2
	L=200nm	697.8	661.9	632	606.9	585.3	566.7
C_{gs1} (pF)	L=100nm	0.393	0.497	0.622	0.770	0.942	1.143
	L=200nm	1.190	1.514	1.896	2.337	2.841	3.411
C_{gd1} (pF)	L=100nm	0.170	0.213	0.267	0.334	0.415	0.513
	L=200nm	0.330	0.408	0.506	0.625	0.768	0.938

- Pri većim efikasnostima transkonduktanse ($g_m/I_D > 12$) dobijaju se nepraktične vrednosti širine kanala
- Dužina kanala vrlo malo utiče na pojačanje, ali značajno povećava širinu kanala tranzistora
- Pojačanje diferencijalnog pojačavača

$$A_{diff} = \frac{g_{mn}}{g_{dsn} + g_{dsp}} = \frac{(g_m / I_D)_n}{(g_{ds} / I_D)_n + (g_{ds} / I_D)_p}$$

- Izlazni tranzistor M_1 određuje napon drejn-sors, odnosno gejt-sors PMOS tranzistora u diferencijalnom stepenu, pa je dužina kanala jedini stepen slobode za njihovo dimenzionisanje
- Dužina kanala se bira kompromisno, između zahteva za velikim DC pojačanjem i velikim propusnim opsegom.
- Daćemo prioritet DC pojačanju i usvojiti dužinu kanala $L=500\text{nm}$
- Na osnovu lookup tabele se dobija $(g_{ds}/I_D)_p$

`gds_IDp = diag(lookup(pch,'GDS_ID','VGS',VGS,'VDS',VGS,'L',Lp));`

Zbog malog napona napajanje i velikog napona V_{GS1} , napon drejn-sors tranzistora $M_{1,2}$ je relativno mali (između 0.1V i 0.3V)

Zbog povratne sprege napon na sorsu je

$$V_S = V_{OUT} - V_{GSn}$$

Uzmimo da je napon V_S nezavisna promenljiva i posmatrajmo $(g_m/I_D)_n$ i $(g_{ds}/I_D)_n$

```
VS = .2: .02: .5;
```

```
for k = 1: length(VS),
```

```
US = VS(k);
```

```
gm_IDn(:,k) = lookup(nch,'GM_ID','VGS',V-US,'VDS',VD-US,'VSB',US,'L',Ln);
```

```
gds_IDn(:,k) = lookup(nch,'GDS_ID','VGS',V-US,'VDS',VD-US,'VSB',US,'L',Ln);
```

Pojačanje diferencijalnog stepena je ($A_a = A_{diff}$)

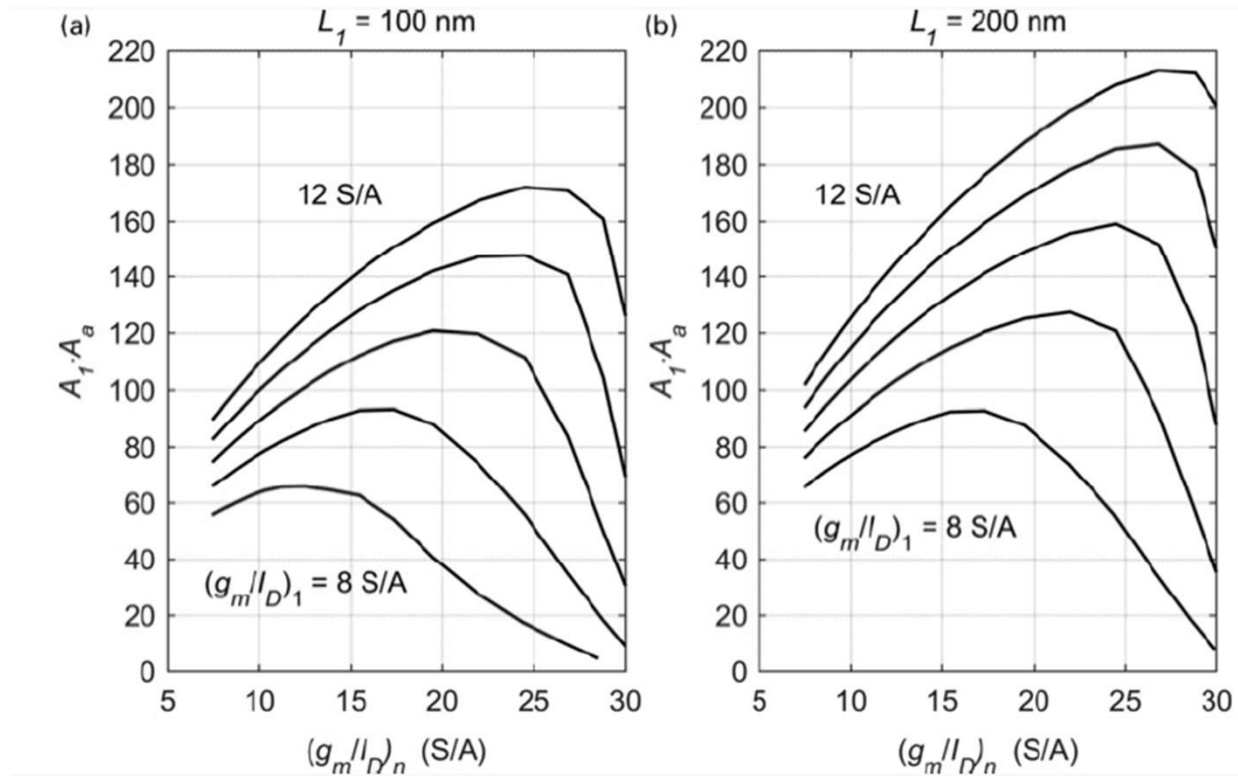
```
Aa = gm_IDn./(gds_IDn + gds_IDp(:,ones(1,length(VS))))
```

- Pojačanje je dato u obliku matrice čije su kolone definisane naponom na drejnu $V_D = V_{DD} - V_{SG1}$ (funkcija $(g_m/I_D)_1$), dok su vrste definisane naponom na sorsu V_S (funkcija $(g_m/I_D)_n$)

- Kružno pojačanje je

```
gain = Aa.*A1(:,ones(1,length(gm_ID)));
```

- Na sledećoj slici je prikazana zavisnost kružnog pojačanja u funkciji $(g_m/I_D)_n$. Pri manjim vrednostima, sa povećanjem efikasnosti transkonduktanse, raste kružno pojačanje, ali pri većim vrednostima dolazi do njegovog opadanja. Pri većim $(g_m/I_D)_n$ dolazi do smanjivanja napona drejn-sors, što dovodi do smanjivanja pojačanja diferencijalnog para tranzistora
- Sa slike je očividno da postoji optimalna vrednost $(g_m/I_D)_n$ za svaku vrednost parametra $(g_m/I_D)_1$



U sledećoj tabeli su date vrednosti $(g_m/I_D)_n$ pri kojima se dobija maksimalno kružno pojačanje, kao i njegova vrednost pri $L_1=100\text{nm}$

$(g_m/I_D)_1$ (S/A)	8	9	10	11	12
$(g_m/I_D)_n$ (S/A)	12	16	20	22	25
A_1A_a	65	90	120	145	170

Na osnovu prethodnog razmatranja usvojeni su sledeći parametri tranzistora

- $L_1 = 100 \text{ nm}$, $(g_m/I_D)_1 = 10 \text{ S/A}$
- $L_p = L_n = 500 \text{ nm}$, $(g_m/I_D)_n = 20 \text{ S/A}$

Kružno pojačanje: $LG=A_1A_a=4.78 \times 25.2=120$

Napon na sorsu diferencijalnog para tranzistora: $V_S=404\text{mV}$, dok je $V_{DS}=159.4\text{mV}$

PSR:

$$PSR_{CL} = PSR_{OL} + \left(\frac{g_m}{g_{ds}} \right)_1 A_a = 259$$

Izlazna otpornost:

$$R_{OUT} = \frac{v_{out}}{i_{load}} \cong \frac{1}{\left(\frac{g_m}{I_D} \right)_1 I_{LOAD} A_a} = 0.4 \Omega$$

Struja potrošnje diferencijalnog para se usvaja

$$I_{SS} = 2I_{Dn} = 2\%I_{LOAD} = 0.2 \text{ mA}$$

Pomoću lookup tabela se dobija

$JDp = \text{lookup}(\text{pch}, 'ID_W', 'VGS', 'VGS', 'VDS', 'VGS', 'L', Lp);$

$Wp = IDn/JDp;$

$JDn = \text{lookup}(\text{nch}, 'ID_W', 'VGS', 'V-VS', 'VDS', 'VD-VS', 'VSB', 'VS', 'L', Ln);$

$Wn = IDn/JDn;$

$$W_p = 20.43 \mu\text{m}, W_n = 127.1 \mu\text{m}$$

Transkonduktansa g_{ma} i provodnost g_{dsa} se određuju na sledeći način

$$g_{ma} = g_{m_ID_n} \cdot I_{dn}$$

$$g_{dsa} = (g_{ds_IDp} + g_{ds_IDn}) \cdot I_{Dn}$$

$$g_{ma} = 2 \text{ mS}, g_{dsa} = 79.2 \text{ } \mu\text{S}$$

LDO na visokim učestanostima

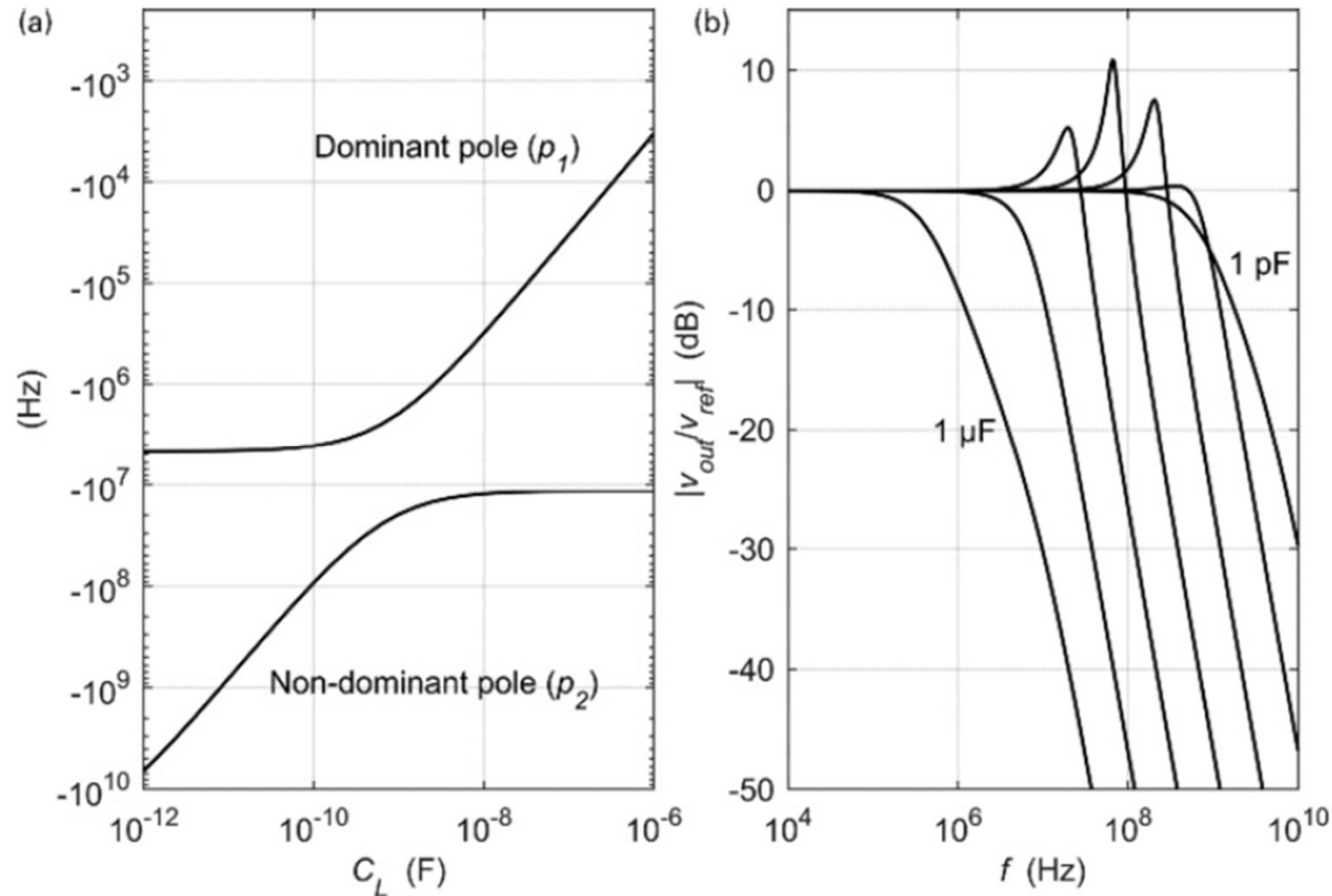
- Funkcija prenosa u otvorenoj sprezi ima dva CS pojačavača u kojima je izražen Milerov efekat
- U funkciji prenosa postoji jedan dominantni pol, jedan nedominantni pol i nula u desnoj poluravni

$$\omega_{p1} = -p_1 \cong \frac{1}{R_1(C_{gs1} + C_{gd1}(1 + A_1)) + R_2(C_{gd1} + C_L)} \quad R_1 = \frac{1}{g_{dsa}}, R_2 = \frac{1}{G_L + g_{ds1}}$$

$$\omega_{p1} \ll \omega_{p2} = -p_2 \cong \frac{R_1(C_{gs1} + C_{gd1}(1 + A_1)) + R_2(C_{gd1} + C_L)}{R_1 R_2 (C_{gs1} C_{gd1} + C_L (C_{gs1} + C_{gd1}))}$$

$$\omega_z = -z \cong \frac{g_{m1}}{C_{gd1}}$$

- Dominantan pol je posledica Milerovog efekta, ali i uticaja kapacitivnosti potrošača C_L
- Na sledećoj slici je prikazana zavisnost položaja dominantnog i nedominantnog pola sa promenom kapacitivnosti C_L , kada se menja u opsegu od 1pF do 1uF



- Ispod $C_L=10$ nF učestanost dominantnog pola je malo zavisna od kapacitivnosti C_L , ali se učestanost nedominantnog pola smanjuje sa porastom ove kapacitivnosti

- Drugim rečima, nedominanti pol je sve uticajniji na propusni opseg kako se C_L povećava ka graničnoj vrednosti od približno 10nF
- Kada je $C_L > 10\text{nF}$, nedominantni pol se vrlo malo menja, dok je, u ovom opsegu, veliki uticaj kapacitivnosti C_L na učestanost dominantnog pola
- Pri malim i pri velikim kapacitivnostima potrošača C_L funkcija spregnutog prenosa je jednopolna.
- U graničnom slučaju polovi postaju bliski, funkcija prenosa je drugog reda i ima malu faznu marginu

Funkcija prenosa PSR

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{dd}(s)} = \frac{N_2 s^2 + N_1 s + N_0}{D_2 s^2 + D_1 s + D_0}$$

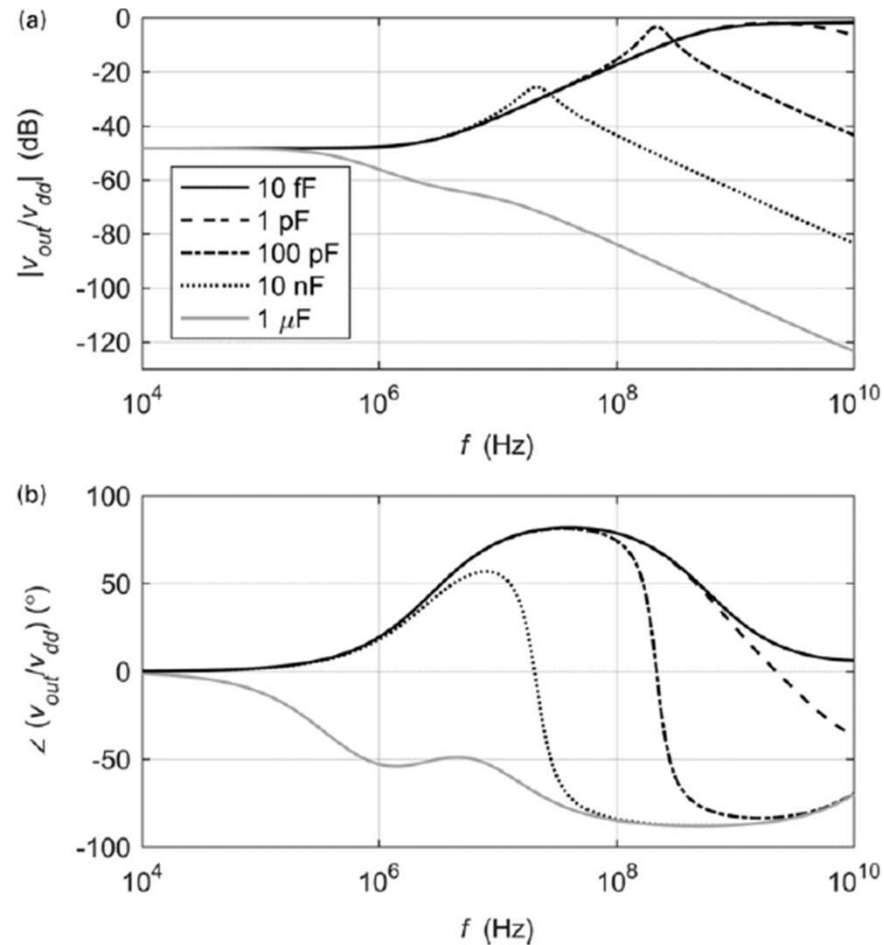
$$N_2 = C_{gs1} C_{gd1}, N_1 = C_{gs1} C_{gd1} + C_{gd1} (g_{m1} + g_{ds1} + g_{dsa})$$

$$N_0 = g_{ds1} g_{dsa}, D_2 = C_L (C_{gs1} + C_{gd1}) + C_{gs1} C_{gd1}$$

$$D_1 = C_L g_{dsa} + (G_L + g_{ds1}) (C_{gs1} + C_{gd1}) + C_{gd1} (g_{m1} + g_{dsa} - g_{ma})$$

$$D_0 = (G_L + g_{ds1}) g_{dsa} + g_{m1} g_{ma}$$

- Na sledećoj slici prikazana je amplitudska i fazna karakteristika funkcije prenosa PSR kada je C_L parametar



- Pri niskim učestanostima potiskivanje signala od napajanja V_{DD} je 48dB
- Za male kapacitivnosti potrošača (parazitne kapacitivnosti izlaznog čvora do mase) $C_L=10\text{fF}$ funkcija prenosa ima aproksimativnu jednu nulu i jedan pol
- Pri velikim vrednostima C_L funkcija prenosa je praktično jednopolna
- Između ove dve vrednosti funkcija prenosa, u opštem slučaju, ima konjugovano-kompleksni pik
- Atraktivna vrednost kapacitivnosti C_L je kada je amplitudska karakteristika maksimalno ravna, odnosno kada nema pikova

- Da bi odredili optimalnu vrednost kapacitivnosti C_L posmatrajmo položaj polova i nula u funkciji C_L
- Sa povećanjem C_L polovi od realnih postaju konjugovano-kompleksni

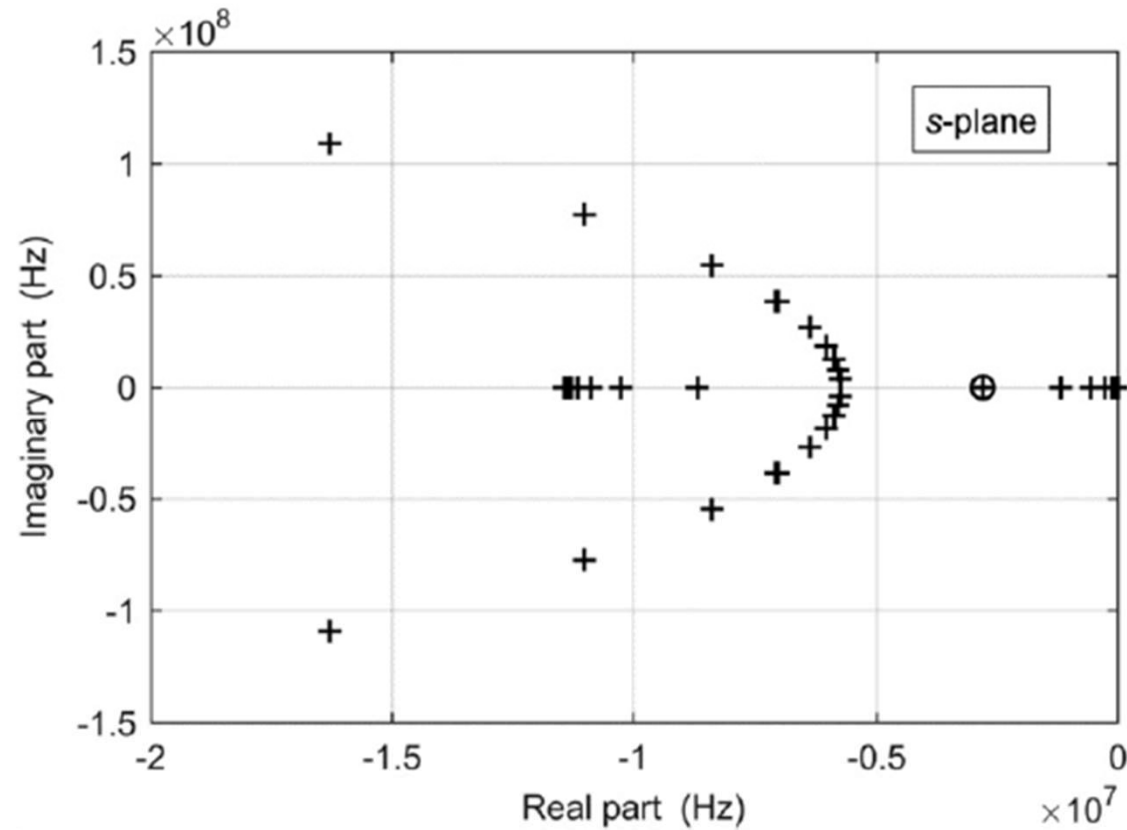
- Nasuprot polovima nule funkcije prenosa PSR ne zavise od kapacitivnosti C_L

$$|z| \cong \frac{g_{da}}{C_{gs1} + C_{gd1} \left(1 + \frac{g_{m1}}{g_{ds1}} \right)}$$

- Pogodna strategija pri dizajnu je da se jedan pol podesi da bude na učestanosti nule, čime će učestanost propusnog opsega biti određena drugim polom

Primer: Odrediti kapacitivnost C_L tako da se poništi uticaj nule u funkciji prenosa PSR

- Na sledećoj slici je prikazan položaj polova i značajne nule u funkciji kapacitivnosti potrošača C_L .
- Tačka gde polovi prestaju biti realni odgovara kapacitivnosti $C_L=140\text{nF}$
- Pri $C_L=191\text{nF}$ jedan od polova se poklapa sa nulom funkcije prenosa PSR, dok preostali pol određuje jediničnu učestanost LDO regulatora, koja iznosi $f_T=9.6\text{MHz}$



- Na sledećoj slici je prikazana amplitudska i fazna karakteristika PSR funkcije prenosa, a na istoj slici su prikazane amplituda i faza kada g_{dsa} odstupa od nominalne vrednosti

$C_L=191\text{nF}$

