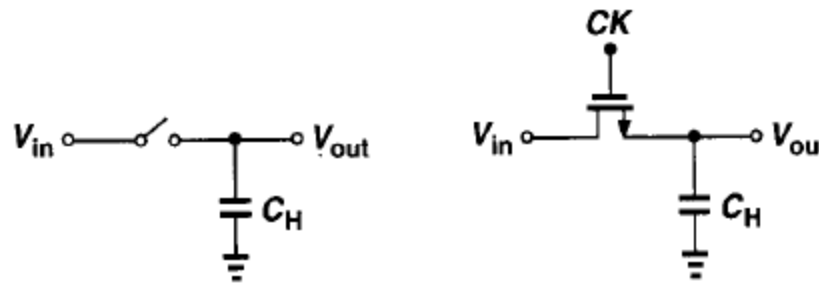


Elektroničke sklopke

Napredni postupci u projektiranju
analognih integriranih sklopova

Sklop za uzorkovanje signala – MOSFET kao sklopka



Kad je sklopka zatvorena, kondenzator se nabija na U_{ul}

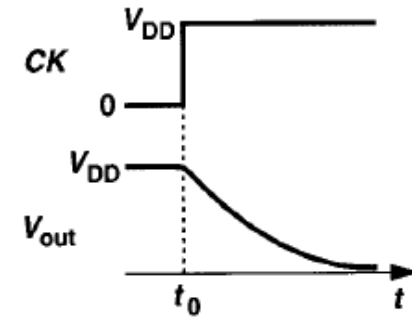
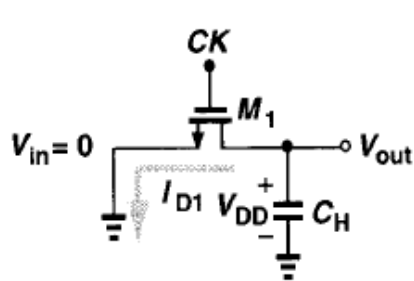
MOSFET se može koristiti kao sklopka

Može biti uključen i kada je struja jednaka nuli (duboko triodno područje)

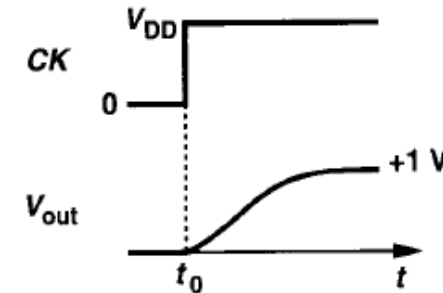
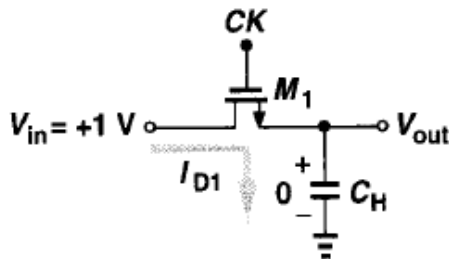
Napon na uvodu i odvodu nisu vezani za napon na upravljačkoj elektrodi. Ako se mijenja napon U_G , onda U_S i U_D ne moraju slijediti te promjene.

To nije slučaj npr. kod bipolarnih tranzistora gdje je je puno teže napraviti sklop za uzorkovanje ($U_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$)

Sklop za uzorkovanje signala



(a)



(b)

Pretpostavimo $U_{ul}=0$ te da je napon na kondenzatoru u trenutku promjene na CK iz niske u visoku razinu $U_{iz}=U_{DD}$

Kada CK ode visoko, $U_{GS}=U_{DD}=U_{DS}$ i tranzistor ulazi u zasićenje. Kapacitet se prazni konstantnom strujom zasićenja tranzistora, a napon na njemu pada. Kada $U_{iz}=U_{DS} < U_{DD}-U_{GS0}$ tranzistor ulazi u triodno područje. Napon $U_{iz}=U_{DS}$ teži prema nuli, a tranzistor odlazi duboko u triodno područje gdje je $U_{DS}=0$

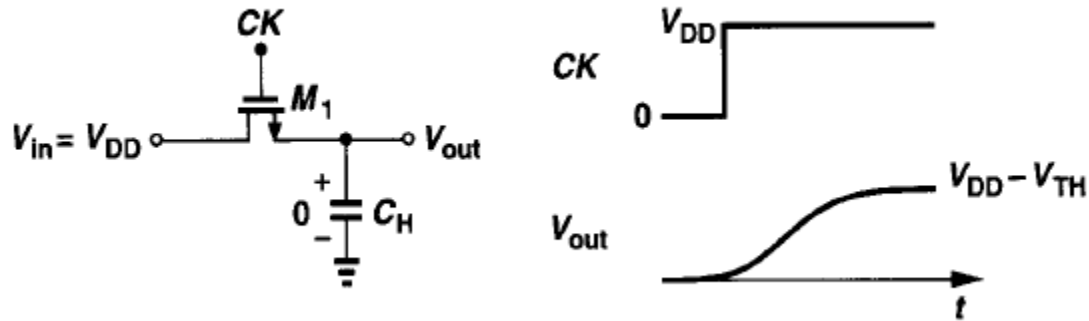
Ako pretpostavimo u trenutku promjene na CK iz niske u visoku razinu $U_{iz}=0$, a na ulaz je spojen $U_{ul}=1\text{ V}$

Kada CK ode visoko u U_{DD} , tranzistor se uključuje i nabija kondenzator. Napon na U_{iz} raste dok se U_{iz} i U_{ul} ne izjednače i tranzistor završi duboko u triodnom području – $U_{DS}=0$

Otpor u vođenju

$$R_{on} = \left[\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0}) \right]^{-1}$$

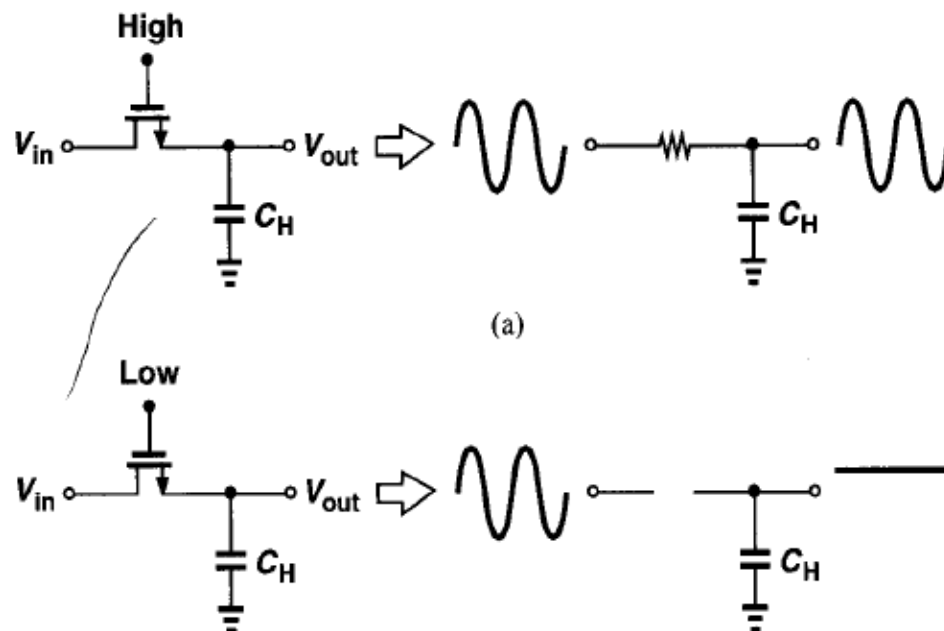
Sklop za uzorkovanje signala



Ako na ulaz spojimo U_{DD} , C_H se nabija do $U_{DD} - U_{GS0}$ gdje postaje $U_{GS} < U_{GS0}$

Maksimalni napon koji možemo uzorkovati određen je s $U_{DD} - U_{GS0}$

Sklop za uzorkovanje signala



Kada je upravljački signal visoko tranzistor je uključen i U_{iz} slijedi U_{ul} . Praktički nema pomaka napona jer je tranzistor duboko u triodnom području gdje je $U_{DS}=0$. Osnovni razlog zašto možemo napraviti precizne sklopove za uzorkovanje analognih signala

Kada je upravljački napon nisko tranzistor je isključen i U_{iz} se ne mijenja (zadržava se)

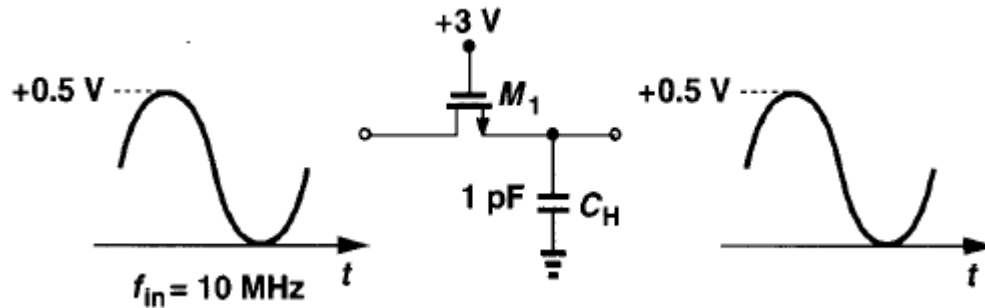
Otpor sklopke u vođenju mijenja se ovisno o U_{ul}

Sklop za uzorkovanje signala

Primjer:

Izračunati maksimalni i minimalni otpor u vođenju za tranzistor M1 sa slike.

Pretpostaviti $\mu_n C_{OX} = 50 \mu\text{A/V}^2$, $W/L = 10/1$, $U_{GS0} = 0.7 \text{ V}$, $U_{DD} = 3 \text{ V}$, $\gamma = 0$.



Uz pretpostavku da je tranzistor duboko u triodnom području te da U_{iz} slijedi U_{ul} , za otpor u vođenju vrijedi:

$$R_{on} = \left[\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0}) \right]^{-1}$$

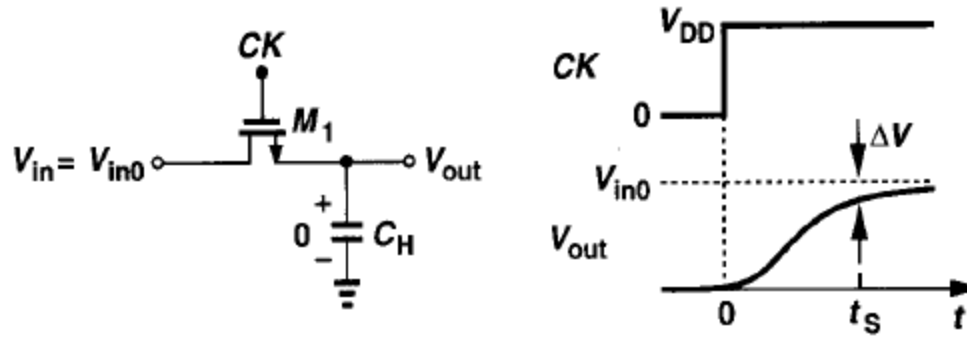
$$\underline{U_{ul}=0}$$

$$R_{on} = \left[0.05 \frac{10}{1} (3 - 0 - 0.7) \right]^{-1} = 870 \Omega$$

$$\underline{U_{ul}=0.5 \text{ V}}$$

$$R_{on} = \left[0.05 \frac{10}{1} (3 - 0.5 - 0.7) \right]^{-1} = 1.11 \text{ k}\Omega$$

Sklop za uzorkovanje signala - brzina



Vrijeme potrebno da U_{iz} poraste od 0 do maksimalne razine ulaznog napona nakon što se sklopka zatvori.

Kako je potrebno beskonačno vrijeme da U_{iz} dostigne U_{iz0} uzimamo vrijeme potrebno da se postigne vrijednost napona unutar neke pogreške.

Kažemo da se izlaz smiri uz npr. 0.1% točnosti (preciznosti) za vrijeme t_s na slici. Znači da je:

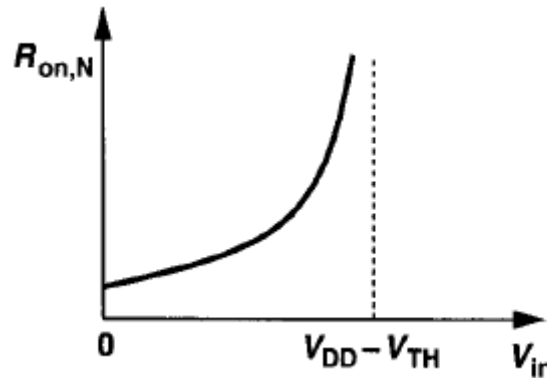
$$\frac{\Delta U}{U_{ul0}} = 0.1 \%$$

Dakle uz mjeru brzine, mora biti specificirana i preciznost !

U sklopu sa slike brzina ovisi o otporu sklopke u vođenju i iznosu kapaciteta za uzorkovanje.

Veća brzina se postiže za širi i kraći kanal tranzistora i manji kapacitet za uzorkovanje.

Sklop za uzorkovanje signala – otpor sklopke



Otpor sklopke u vođenju ovisi o U_{ul} . Za veći U_{ul} otpor sklopke je veći.

Otpor naglo raste kako se približavamo vrijednosti $U_{ul} \rightarrow U_{DD} - U_{GS0}$

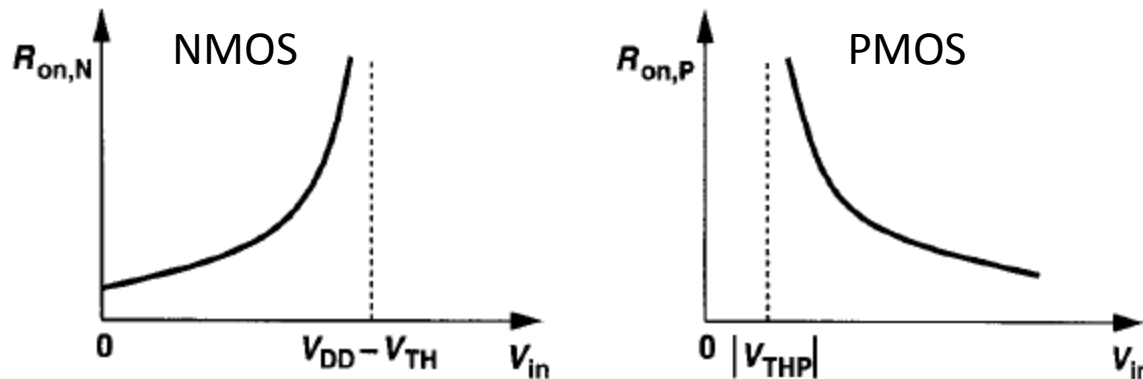
Primjer: Ako ograničimo porast otpora na faktor 4x za maksimalni U_{ul} dobivamo

$$4 \cdot \left[\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (U_{DD} - 0 - U_{GS0}) \right]^{-1} = \left[\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (U_{DD} - U_{ulmax} - U_{GS0}) \right]^{-1}$$
$$U_{ulmax} = \frac{3}{4} (U_{DD} - U_{GS0})$$

Ta vrijednost je negdje oko $U_{DD}/2$ što dovodi do velikih ograničenja hoda.

Hod je strogo ograničen s U_{GS0}

Sklop za uzorkovanje signala – otpor sklopke

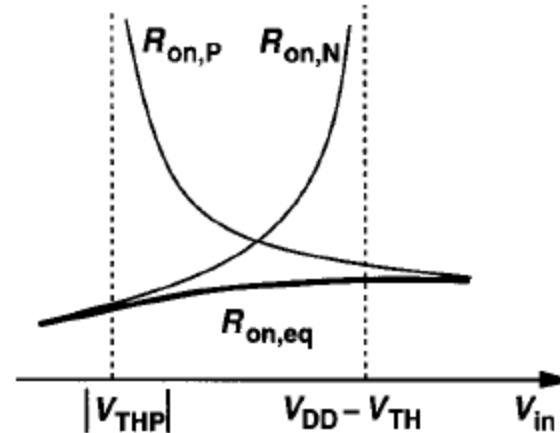
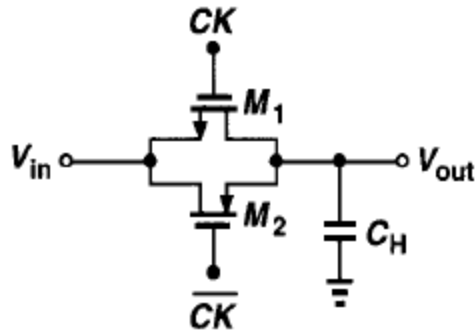


Na slici je prikazana usporedba otpora u vođenju za NMOS i PMOS.

Za PMOS otpor je velik za male razine U_{ul} i strogo je ograničen s U_{GS0} s donje strane. Otpor opada za visoke razine U_{ul}

Može se koristiti komplementarne sklopke kako bi se postigao puni hod napona (eng. rail-to-rail)

Komplementarne sklopke



Otpor komplementarne sklopke:

$$\begin{aligned}
 R_{on,eq} &= R_{onN} \parallel R_{onP} = \frac{1}{\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)_N (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0n})} \parallel \frac{1}{\mu_p C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)_P (U_{ul} - |U_{GS0p}|)} = \\
 &= \left[\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)_N (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0n}) + \mu_p C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)_P (U_{ul} - |U_{GS0p}|) \right]^{-1} = \\
 &= \left[\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)_N (U_{DD} - U_{GS0n}) + U_{ul} \left\{ \mu_p C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)_P - \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)_N \right\} - \mu_p C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)_P |U_{GS0p}| \right]^{-1}
 \end{aligned}$$

Komplementarne sklopke

Uz:

$$\mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_p = \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_n$$

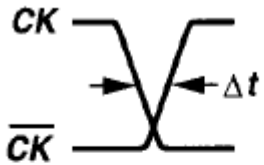
$R_{on,eq}$ ne ovisi o U_{ul} .

U realnosti U_{GS0n} i U_{GS0p} se mijenjaju s U_{ul} zbog efekta podloge (eng. body effect)

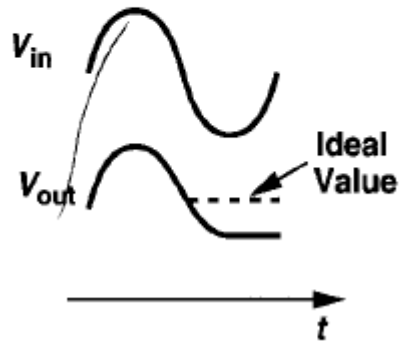
U svakom slučaju varijacija otpora u vođenju je puno manja u slučaju komplementarnih sklopki.

Zahtijeva komplementarne upravljačke signale.

Komplementarne sklopke – usklađenost kontrolnih napona

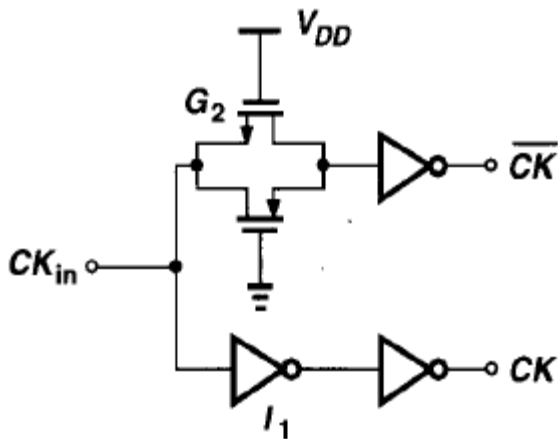


U sklopovima velike brzine rada, bitno je da se sklopke istovremeno uključuju i isključuju kako bi uzorkovanje bilo precizno.



Ako se npr NMOS isključi za Δt prije nego PMOS, izlaz prati ulazni napon preko PMOS sklopke uz povećanu vremensku konstantu (veći otpor sklopke) koja ovisi o ulaznom naponu.

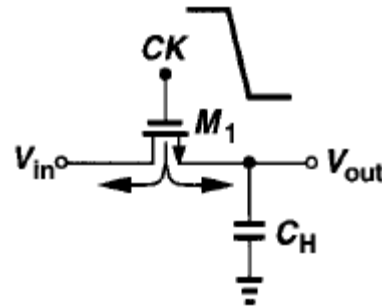
To povećava izobličenja u vrijednosti uzorkovanog napona (slika).



Jednostavna izvedba sklopa koji generira komplementarne upravljačke signale .

Prijenosna vrata $G2$ moraju imati isto kašnjenje kao inverter $I1$

Sklop za uzorkovanje signala – preciznost, injekcija naboja



Injekcija naboja iz kanala

Kod isključivanja sklopke, naboj koji je bio u kanalu kada je tranzistor bio u triodnom području, mora se odvesti prilikom isključivanja sklopke.

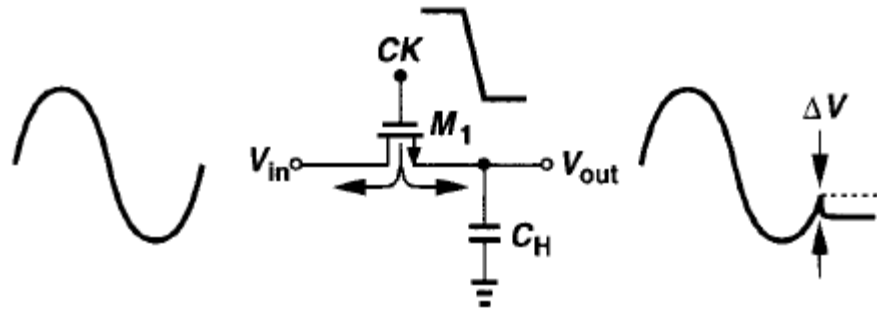
$$Q_{ch} = W \cdot L \cdot C_{OX} (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0})$$

Kod isključenja, dio Q_{ch} odlazi prema ulaznom čvoru a dio se pohrani na kapacitetu za uzorkovanje te uzrokuje pogrešku u uzorkovanom naponu.

Uz pretpostavku da polovica Q_{ch} završi na C_H pogreška napona je:

$$\Delta U = \frac{Q_{ch}/2}{C_H} = \frac{W \cdot L \cdot C_{OX} (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0})}{2 \cdot C_H}$$

Sklop za uzorkovanje signala – preciznost, injekcija naboja



Zbog toga jer je naboj u kanalu NMOS-a negativan (elektroni), pogreška se javlja kao negativna stepenica u uzorkovanom naponu.

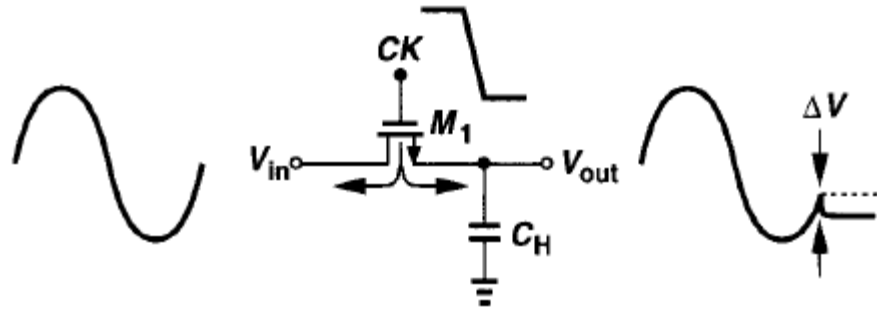
Pogreška je proporcionalna s $W \cdot L \cdot C_{ox}$ i obrnuto proporcionalna s C_H

Veći C_H i manji tranzistor daju manju pogrešku zbog injekcije naboja – **suprotno od zahtijeva za brzinu**

U stvarnosti ne znamo koliki dio naboja završi na C_H – ovisi o puno parametara (impedancijama koje se vide sa uvida i odvoda, o upravljačkim impulsima itd.). Nema nekog pravila kojim bi mogli procijeniti injektirani naboj

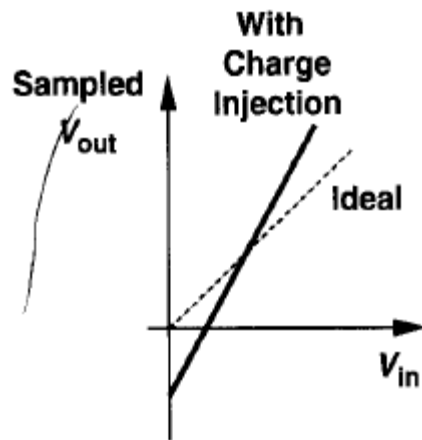
Simulacijski programi loše modeliraju injekciju naboja

Sklop za uzorkovanje signala – preciznost, injekcija naboja



Najbolje je u analizi koristiti najgori slučaj tj. pretpostaviti da se sav naboj injektira na kapacitet za uzorkovanje

$$U_{iz} = U_{ul} - \frac{W \cdot L \cdot C_{OX} (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0})}{C_H} = U_{ul} \left(1 + \frac{W \cdot L \cdot C_{OX}}{C_H} \right) - \frac{W \cdot L \cdot C_{OX}}{C_H} (U_{DD} - U_{GS0})$$



Pogreška pojačanja

Napon pomaka

Sklop za uzorkovanje signala – preciznost, injekcija naboja

U prethodnoj analizi zanemaren je efekt podloge. Ako efekt podloge uzmemo u obzir:

$$U_{GS0} = U_{GS00} - \gamma \sqrt{2\Phi_B + U_{BS}} + \gamma \sqrt{2\Phi_B}$$

Gdje je $U_{BS} \approx U_{ul}$

Slijedi:

$$\begin{aligned} U_{iz} &= U_{ul} - \frac{W \cdot L \cdot C_{OX}}{C_H} \left(U_{DD} - U_{ul} - U_{GS00} - \gamma \sqrt{2\Phi_B + U_{ul}} + \gamma \sqrt{2\Phi_B} \right) = \\ &= U_{ul} \underbrace{\left(1 + \frac{W \cdot L \cdot C_{OX}}{C_H} \right)}_{\text{Pogreška pojačanja}} - \underbrace{\frac{W \cdot L \cdot C_{OX}}{C_H} \left(U_{DD} - U_{GS00} + \gamma \sqrt{2\Phi_B} \right)}_{\text{Napon pomaka}} - \underbrace{\gamma \frac{W \cdot L \cdot C_{OX}}{C_H} \sqrt{2\Phi_B + U_{ul}}}_{\text{Nelinearnost}} \end{aligned}$$

Pogreška pojačanja i napon pomaka su sistematične pogreške i mogu se ispraviti, što nije slučaj s nelinearnosti.

Sklop za uzorkovanje signala – brzina vs. preciznost

Ako promatramo kompromis između brzine i preciznosti vezane uz injekciju naboja, možemo izvesti jednostavnu mjeru kvalitete

Ako brzinu predstavimo vremenskom konstantom τ , a preciznost pogreškom ΔU , onda za mjeru kvalitete dobivamo:

$$F = \frac{1}{\tau \cdot \Delta U}$$

Gdje je

$$\tau = R_{on} \cdot C_H = \frac{C_H}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0})}$$

$$\Delta U = \frac{Q_{ch}}{C_H} = \frac{W \cdot L \cdot C_{OX} (U_{DD} - U_{ul} - U_{GS0})}{C_H}$$

Slijedi:

$$F = \frac{\mu_n}{L^2}$$

U prvoj aproksimaciji kompromis ne ovisi o širini sklopke i kapacitetu za uzorkovanje

Sklop za uzorkovanje signala – preslušavanje takta

Promjene signala takta prenose se na kapacitet za uzorkovanje usljed kapacitivne sprege preko parazitnih kapaciteta zbog preklapanja upravljačke elektrode te uvoda i odvoda

Efekt unosi pogrešku uzorkovanog napona:

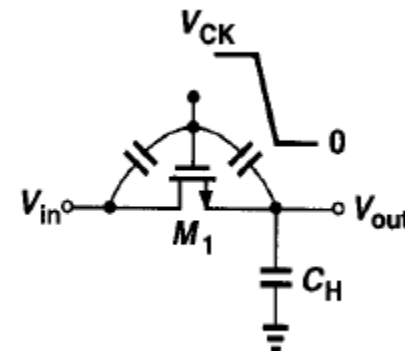
$$\Delta U = U_{CK} \frac{W C_{OV}}{W C_{OV} + C_H}$$

Gdje je C_{OV} kapacitet preklapanja po jedinici duljine

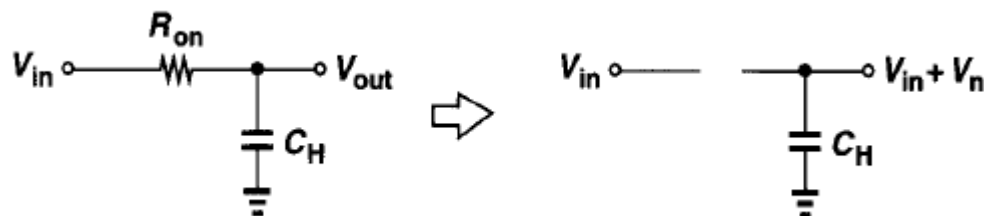
Pogreška ne ovisi o U_{ul}

Rezultira konstantnim naponom pomaka

U kompromisu su brzina i preciznost (za manji ΔU trebamo veći C_H)



Sklop za uzorkovanje signala – kT/C šum



Nastaje zbog termičkog šuma otpora u vođenju sklopke koja se koristi u sklopu za uzorkovanje

Kada se sklopka otvori, šum ostaje pohranjen na kapacitetu za uzorkovanje

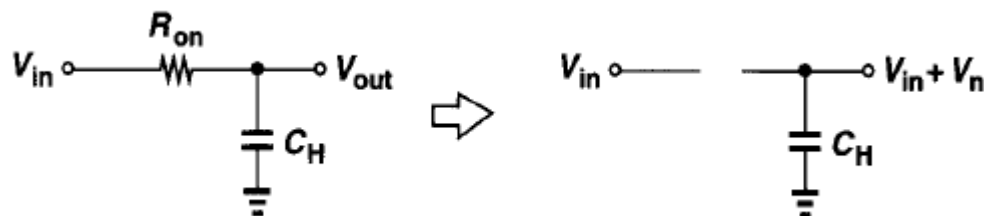
$R_{on}C_H$ mreža predstavlja niskopropusni filter koji oblikuje spektar šuma na kapacitetu.

$$\begin{aligned} v_{n,RMS}^2 &= \int_{f_1}^{f_2} 4kTR |H(j\omega)|^2 df = \int_0^{\infty} 4kTR |H(j2\pi f)|^2 df = 4kTR \int_0^{\infty} \left| \frac{1}{1 + 2\pi jfRC_H} \right|^2 df = \\ &= 4kTR \cdot \frac{1}{2\pi RC_H} \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + (2\pi fRC_H)^2} d(f 2\pi RC_H) = \frac{2kT}{\pi C_H} \tan^{-1}(2\pi RC_H) \Big|_0^{\infty} = \frac{2kT}{\pi C_H} \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right) = \frac{kT}{C_H} \end{aligned}$$

Snaga šuma je:

$$\boxed{v_{n,RMS}^2 = \frac{kT}{C_H}}$$

Sklop za uzorkovanje signala – kT/C šum



RMS vrijednost napona šuma je:

$$v_{n,RMS} = \sqrt{\frac{kT}{C_H}}$$

Šum ne ovisi o otporu sklopke nego o iznosu kapaciteta za uzorkovanje (iako kondenzatori “ne šume”) → veći otpor daje veći šum, ali i nižu graničnu frekvenciju NP-filtra

Važan parametar u aplikacijama gdje se zahtijeva velika preciznost.

Za mali šum treba veliki C_H što opterećuje druge sklopove i smanjuje brzinu

Eliminacija injektiranog naboja neaktivnom sklopkom

Korištenje neaktivnog tranzistora (eng. dummy)

Kada se tranzistor za uzorkovanje M1 isključuje injektira naboj Δq_1 na C_H , nakon toga neaktivni M2 se uključuje i uzima naboj Δq_2 sa C_H da bi uspostavio naboj u kanalu.

Potrebno je osigurati da su naboji $\Delta q_1 = \Delta q_2$

Uz pretpostavku da se polovica naboja M1 pohranjuje na CH:

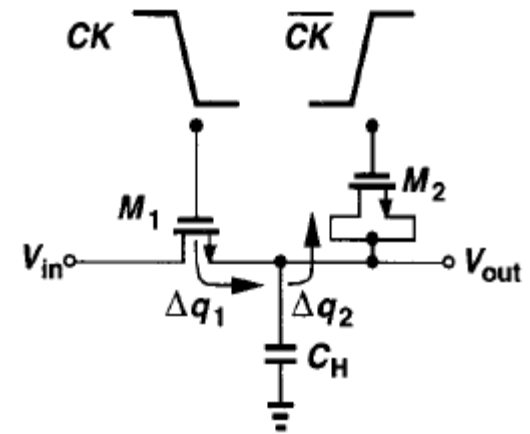
$$\Delta q_1 = \frac{W_1 \cdot L_1 \cdot C_{OX} (U_{CK} - U_{ul} - U_{GS01})}{2}$$

A naboj potreban za M2:

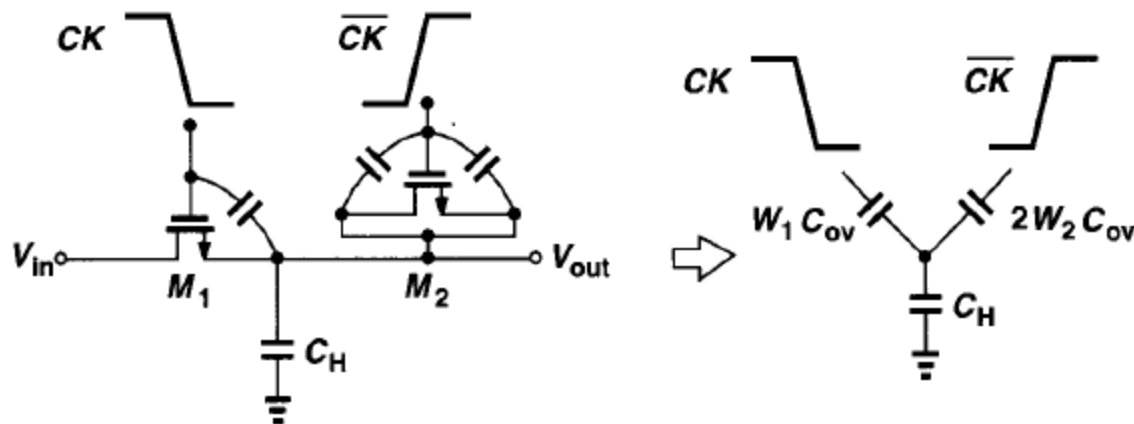
$$\Delta q_2 = W_2 \cdot L_2 \cdot C_{OX} (U_{CK} - U_{ul} - U_{GS02})$$

Moguće je odabrati $L_2 = L_1$ i $W_2 = 0.5 W_1$ kako bi $\Delta q_1 = \Delta q_2$

Raspodjelu naboja iz kanala M1 teško je modelirati i predvidjeti – glavno ograničenje ove tehnike



Preslušavanja takta uz korištenje neaktivne sklopke

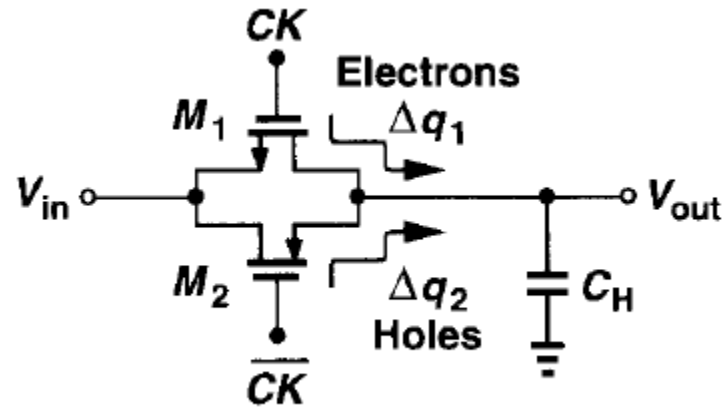


Kod neaktivnog tranzistora paralelna kombinacija kapaciteta preklapanja C_{GD} i C_{GS} sudjeluju u kapacitivnom djelilu

$$\Delta U = -U_{CK} \frac{W_1 C_{ov}}{W_1 C_{ov} + C_H + 2W_2 C_{ov}} + U_{CK} \frac{2W_2 C_{ov}}{W_1 C_{ov} + C_H + 2W_2 C_{ov}} = 0$$

Ova tehnika eliminira preslušavanje takta uz $L_2=L_1$ i $W_2=0.5W_1$

Eliminacija injektiranog naboja – komplementarna sklopka



$$\Delta q_1 = W_1 \cdot L_1 \cdot C_{OX} (U_{CK} - U_{ul} - U_{GS01})$$

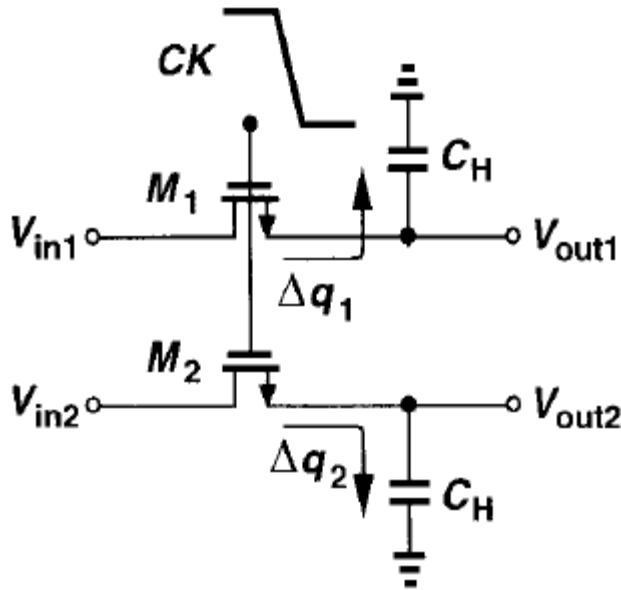
$$\Delta q_2 = W_2 \cdot L_2 \cdot C_{OX} (U_{ul} - |U_{GS02}|)$$

Poništenje naboja postiže se samo za jedan U_{ul}

Kod preslušavanja napona takta ne postiže se poništenje zato jer kapaciteti preklapanja upravljačke elektrode i odvoda i uvida nije jednako za NMOS i PMOS tranzistor

Zbog manje pokretljivosti šupljina, PMOS tranzistori su veći za isti R_{on}

Eliminacija injektiranog naboja – diferencijski način rada



Injekcija naboja javlja se kao zajednički signal

$$\Delta q_1 = W \cdot L \cdot C_{OX} (U_{CK} - U_{ul1} - U_{GS01})$$

$$\Delta q_2 = W \cdot L \cdot C_{OX} (U_{CK} - U_{ul2} - U_{GS02})$$

Za $\Delta q_1 = \Delta q_2$ mora biti $U_{ul1} = U_{ul2}$

Tehnika ne eliminira pogrešku u potpunosti

Tehnika smanjuje konstantni napon pomaka i smanjuje nelinearnost:

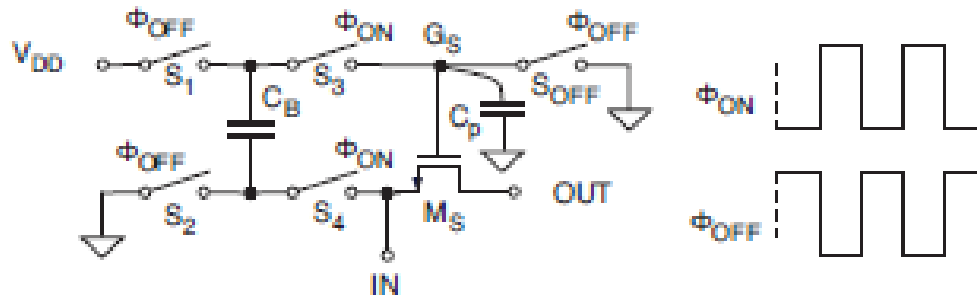
$$\begin{aligned} \Delta q_1 - \Delta q_2 &= W \cdot L \cdot C_{OX} [(U_{ul2} - U_{ul1}) + (U_{GS02} - U_{GS01})] = \\ &= W \cdot L \cdot C_{OX} [(U_{ul2} - U_{ul1}) + \gamma (\sqrt{2\Phi + U_{ul2}} - \sqrt{2\Phi + U_{ul1}})] \end{aligned}$$

Uz $U_{ul1} = U_{ul2} \rightarrow \Delta q_1 = \Delta q_2$ nema pogreške usljed napona pomaka

Nelinearnost usljed efekta podloge pod oba korijena pa se oduzima

Diferencijski sklopovi uklanjaju nelinearnosti parnog reda

Sklopka s Bootstrap tehnikom - princip



Sklopka je izvedena s tranzistorom M_S . Upravljački signali ϕ_{ON} i ϕ_{OFF} ne preklapaju se.

U fazi kada je sklopka uključena (ϕ_{ON}) U_{iz} prati U_{ul} , a napon upravljačke elektrode određuje napon na C_B

U fazi zadržavanja (ϕ_{OFF}) sklopka je isključena, a upravljačka elektroda je spojena na masu. U toj fazi C_B se nabija na napon U_{DD}

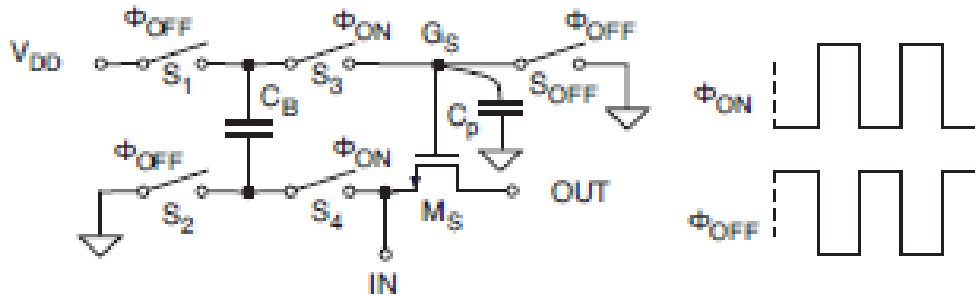
Kada se M_S ponovo uključi napon U_{GS} će biti određen naponom na C_B što u idealnom slučaju iznosi U_{DD} . U toj fazi naboj ploče kondenzatora spojene u čvor GS ne može se promijeniti jer u upravljačku elektrodu ne teče struja.

U realnosti S_{OFF} postavlja napon na parazitnom kapacitetu C_P na nulu tako da dolazi do redistribucije naboja sa C_B .

$$U_G = (U_{ul} + U_{DD}) \frac{C_B}{C_B + C_P}$$

$$U_{GS,MS} = (U_{ul} + U_{DD}) \frac{C_B}{C_B + C_P} - U_{ul} = U_{DD} \frac{C_B}{C_B + C_P} - U_{ul} \frac{C_P}{C_B + C_P}$$

Sklopka s Bootstrap tehnikom - princip



U_{GS} ovisi o ulaznom naponu i manje je od U_{DD} . Utjecaj se može smanjiti korištenjem većeg C_B i smanjivanjem C_P odnosno korištenjem malih dimenzija za tranzistore spojene u točku GS

Otpor u vođenju:

$$R_{ON,MS} = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \left[U_{DD} \frac{C_B}{C_B + C_P} - U_{ul} \frac{C_P}{C_B + C_P} - U_{GS0,MS} \right]$$

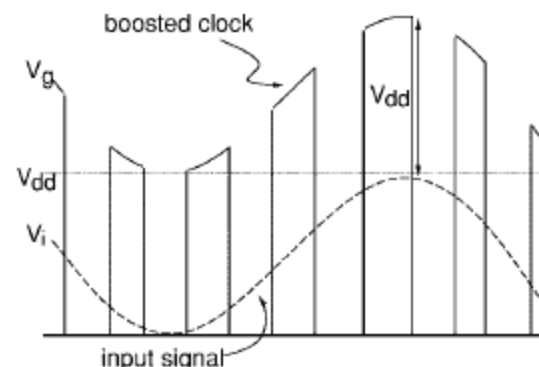
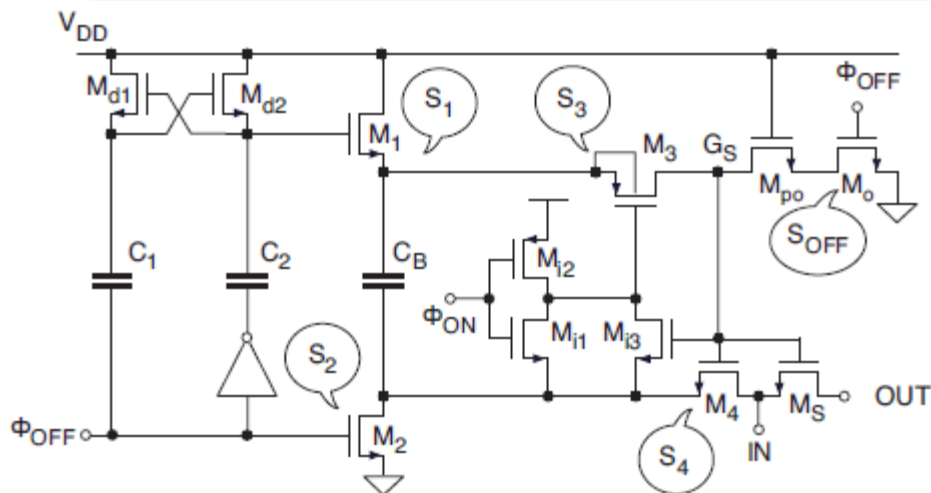
S1 mora biti sposobna uključivati U_{DD}

S3 mora držati povećani (eng. boosted) napon ($U_{DD} + U_{ul}$)

S4 radi u istim uvjetima kao MS (glavna sklopka)

S_{OFF} mora biti sposobna podnijeti hod napona od 0 do povećanog napona ($U_{DD} + U_{ul}$)

Sklopka s Bootstrap tehnikom – sklopovska izvedba



Abo et.al. A 1.5-V, 10-bit, 14.3-MS/s CMOS Pipeline Analog-to-Digital Converter
IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 34, NO. 5, MAY 1999, pp. 599-606

M_{d1} , M_{d2} , C_1 , C_2 – nabojska pumpa kojom se udvostručuje napon – osigurava napon za rad S_1 (V_{DD} do $2V_{DD}$)

S_3 realiziran s PMOS, treba niski napon za uključenje sklopke. Osigurava ga inverter M_{i1} , M_{i2} .

U_{ul} može isključiti inverter M_{i1} , M_{i2} kada je M_4 uključen – dodaje se M_{i3} da osigura ispravan rad

Napon u točki GS može biti velik (do $2U_{DD}$), S_{OFF} (M_O) se dodaje u seriju M_{po} da se taj napon podijeli te da se osigura pouzdan rad