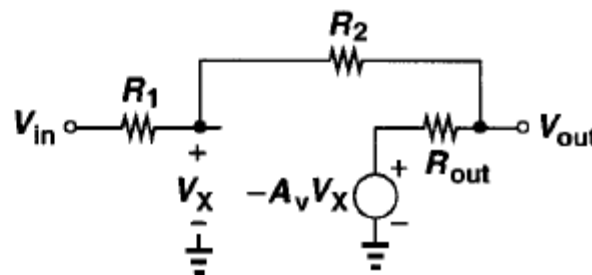
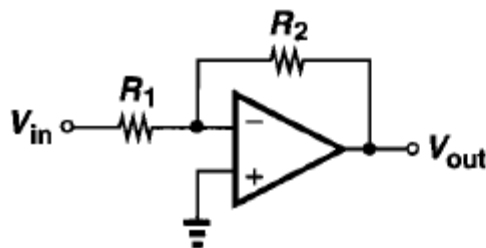


Sklopovi s preklapajućim kapacitetima

Napredni postupci u projektiranju
analognih integriranih sklopova

Motivacija



Kako bi dobili veliko pojačanje operacijskog pojačala, povećavali smo R_{iz} ($A_v = g_m R_{iz}$).

Tipični iznosi R_{iz} u otvorenoj petlji za OP u CMOS tehnologiji postižu vrijednosti do 100 kΩ.

R_2 će rušiti pojačanje otvorene petlje pojačala.

Za nadomjesni sklop sa slike dobivamo:

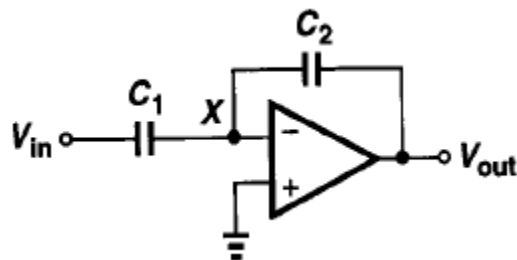
$$-A_v \left(\frac{U_{iz} - U_{ul}}{R_1 + R_2} R_1 + U_{ul} \right) - R_{iz} \frac{U_{iz} - U_{ul}}{R_1 + R_2} = U_{iz}$$

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{A_v - \frac{R_{iz}}{R_2}}{1 + \frac{R_{iz}}{R_1} + A_v + \frac{R_2}{R_1}}$$

Pogreške u brojniku i nazivniku smanjuju pojačanje

R_1 opterećuje prethodni stupanj i doprinosi svojim termičkim šumom

Motivacija

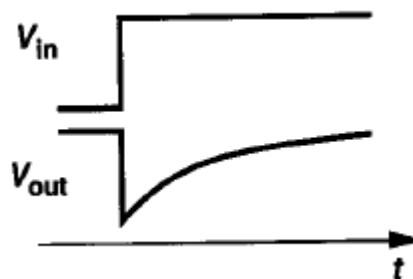
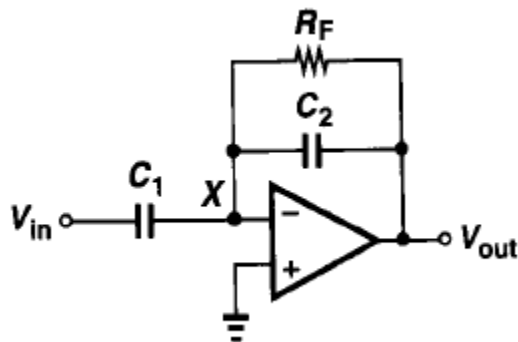


Kako bi eliminirali utjecaj R_1 i R_2 na smanjenje pojačanja, otpornike možemo zamijeniti kapacitetima

Kako postaviti napajanje za čvor X ?

U ovoj konfiguraciji čvor X je u zraku.

Motivacija



Možemo dodati paralelno C_2 otpor R_F velikog iznosa. Uspostavlja se DC povratna veza preko R_F , ali isto tako gubi se naboj sa C_2 koji se izbija preko R_F .

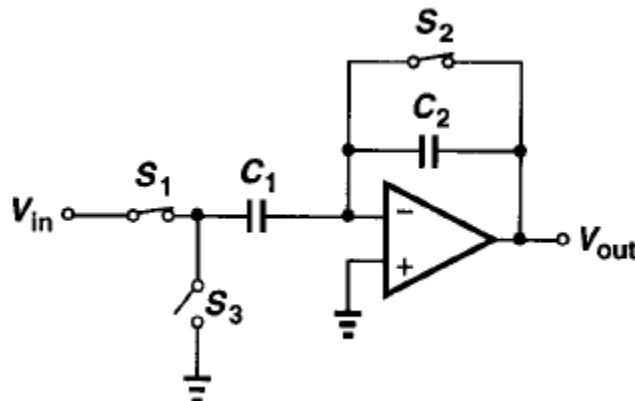
Odziv na skokovitu pobudu daje inicijalno pojačanje ovisno o C_1 i C_2 , nakon čega se napon eksponencijalno mijenja zbog prežnjenja kapaciteta C_2 preko R_F

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}}(s) \approx - \frac{R_F \frac{1}{C_2 s}}{R_F + \frac{1}{C_2 s}} = - \frac{R_F C_1 s}{1 + R_F C_2 s}$$

Visokopropusna karakteristika – nije dobro rješenje za širokopojasna pojačala

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} \approx - \frac{C_1}{C_2} \quad \text{uz} \quad \omega \gg (R_F C_2)^{-1}$$

Motivacija



Za korištenje kapacitivne povratne veze, potrebno je naći druge metode koje će omogućiti ispravno napajanje (postavljanje napona na invertirajućem ulazu OP) → **sklopovi s preklapajućim kapacitetima**

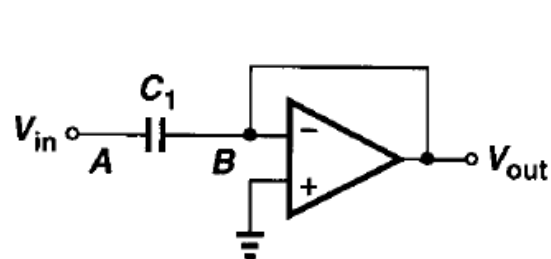
Koristimo 3 sklopke koje kontroliraju rad sklopa

Sklop radi diskretno u vremenu – u dvije faze rada

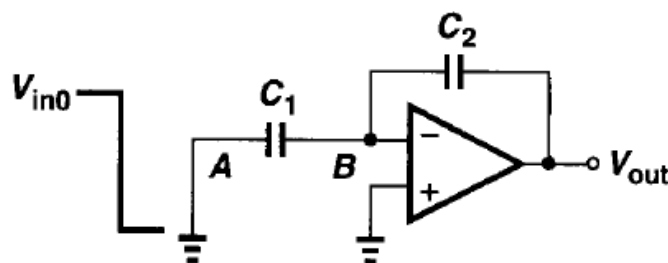
S_1 i S_3 preklapaju lijevu ploču od C_1 na U_{in} i na masu ovisno o fazi rada

S_2 spaja OP u spoj sljedila i definira DC napon na invertirajućem ulazu OP (“-” stezaljka)

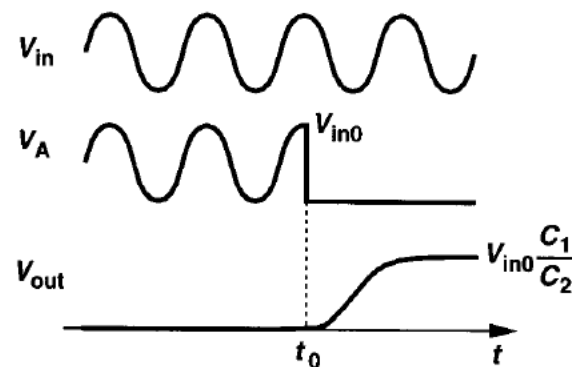
Motivacija



Faza uzorkovanja



Faza pojačanja



Pretpostavljamo da je pojačanje OP jako veliko – ulazne stezaljke OP-a su na istom potencijalu

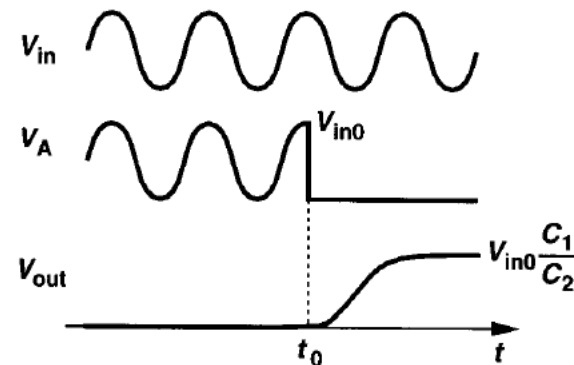
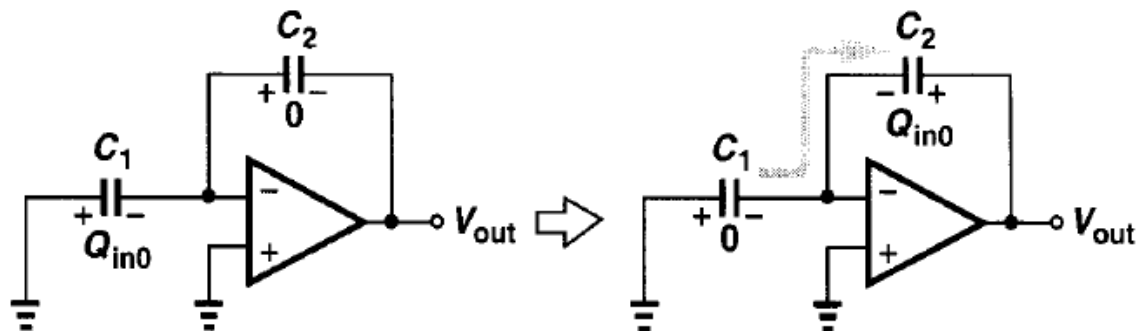
Faza uzorkovanja

- S_1 i S_2 su zatvorene, a S_3 je otvorena (lijeva slika)
- Napon na C_1 prati ulazni napon – naboj lijeve ploče osigurava U_{ul} , a naboj desne ploče osigurava izlaz OP-a. Bez jedinične povratne veze naboj desne ploče nema otkuda doći jer je ulaz OP visokoimpedantan (tu se nalazi upravljačka elektroda MOSFET)

Faza pojačanja

- S_1 i S_2 je otvorene, a S_3 je zatvorena (slika u sredini)
- Ulaz se spaja na masu (točka A), a OP tjera ulazne stezaljke na isti potencijal te je napon u točki B nula \rightarrow napon na C_1 pada na nulu – naboj pohranjen u prethodnoj fazi odlazi sa C_1
- Lijeva ploča C_1 se prazni na masu, a naboj desne ploče se premjesti na lijevu ploču od C_2 ($R_{ulOP} = \infty$)

Motivacija



Kod prebacivanja iz faze uzorkovanja (t_0) napon na C_1 iznosi U_{ul0} .

Naboj koji je pohranjen na kondenzatoru je:

$$Q_{ul0} = C_1 U_{ul0}$$

Pozitivni naboj jedne ploče C_1 inducira istu količinu naboja na suprotnoj ploči

Nakon prelaska u fazu pojačanja naboj desne ploče C_1 premješta se na lijevu ploču C_2

Izlaz OP osigurava naboj desne ploče koji mora biti iste količine i suprotnog polariteta od naboja lijeve ploče te je naboj pohranjen na C_2 jednak Q_{ul0}

Izlazni napon onda raste od nula prema:

$$U_{iz} = \frac{Q_{ul0}}{C_2} = \frac{C_1}{C_2} U_{ul0}$$

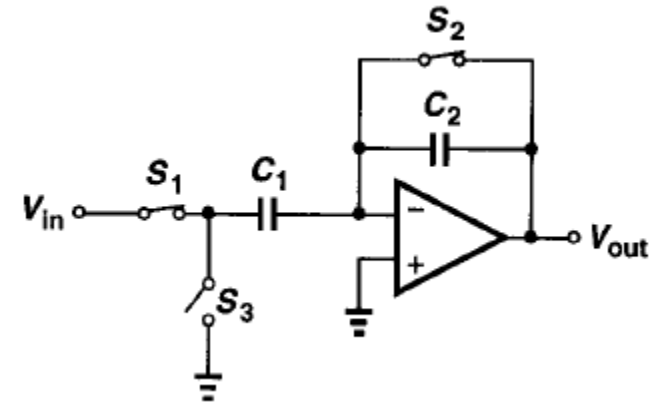
Neinvertirajuće pojačalo

Motivacija

Pojačalo koje radi diskretno u vremenu

Razlika u odnosu na pojačala kontinuiranog signala:

- Dio vremena dodjeljen je uzimanju uzorka pri čemu je izlaz na nuli
- Nakon uzimanja uzorka u fazi pojačanja ignorira se napon na ulazu u pojačalo i pojačava se uzorak
- Konfiguracija sklopa se znatno mijenja kod izmjena faza rada



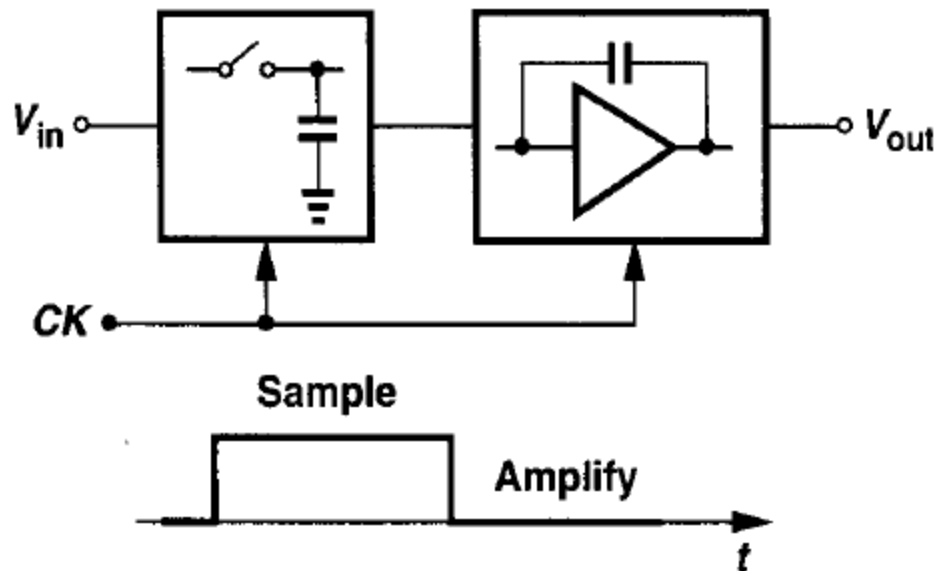
Prednosti:

Uzimanje uzoraka

Nakon smirivanja odziva (U_{iz}), struja nabijanja C_2 teži u nulu te C_2 ne opterećuje pojačalo i ne smanjuje pojačanje OP-a

Najpogodnija tehnologija za izvedbu je CMOS – dobre sklopke, veliki ulazni otpor OP (upravljačka elektroda izolirana je od tijela tranzistora) → uzorkovani naboj se ne gubi i postiže se velika preciznost

Motivacija

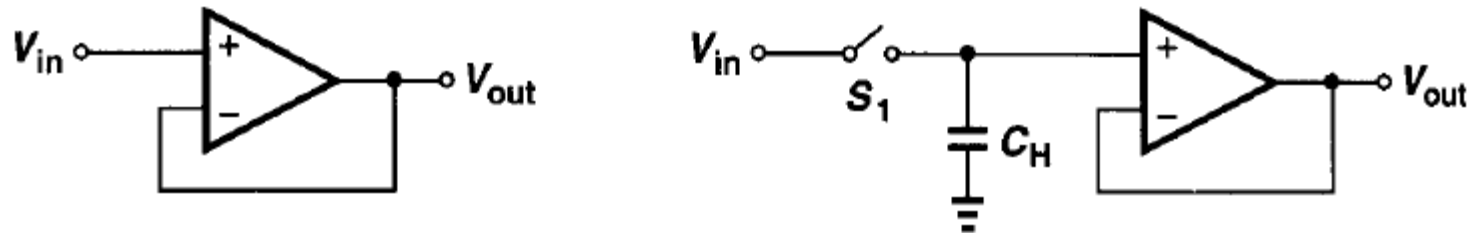


Pojačalo koje radi diskretno u vremenu u dvije faze

Potreban je upravljački napon – napon takta

Sklopovi mješovitog signala

Sklop za uzorkovanje

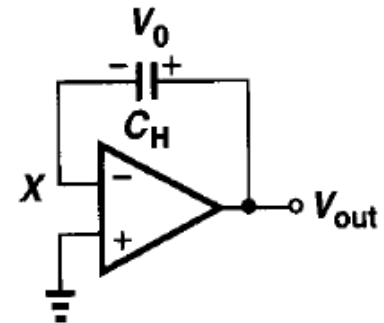
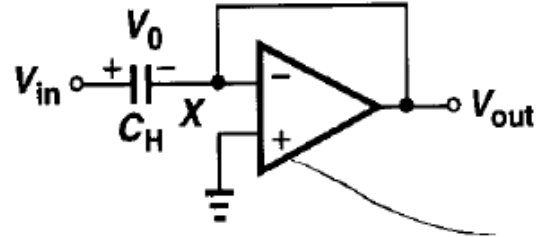
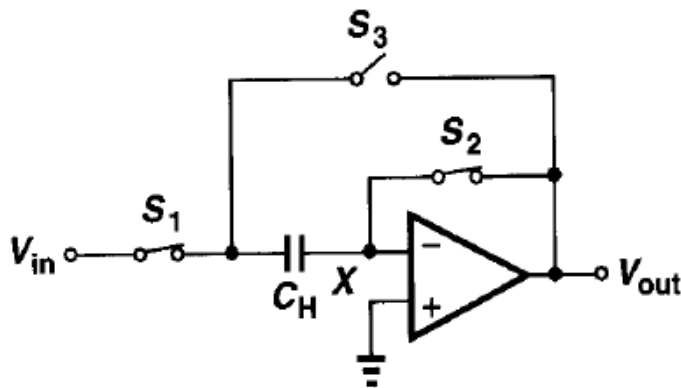


Nije potreban otpornik ili kondenzator za izvedbu

Izvedba za diskretni rad zahtijeva kapacitet za uzimanje uzorka i sklopke koje kontroliraju rad → dobiva se sklop za uzorkovanje signala (pojačanje je jedinično)

Problem kod gornje izvedbe je injekcija naboja kod isključivanja S_1 koji unosi pogrešku u uzorku spremljenom na C_H

Sklop za uzorkovanje



Izvedba s tri sklopke

U fazi uzorkovanja S_1 i S_2 su zatvorene, a S_3 je otvorena (slika u sredini)

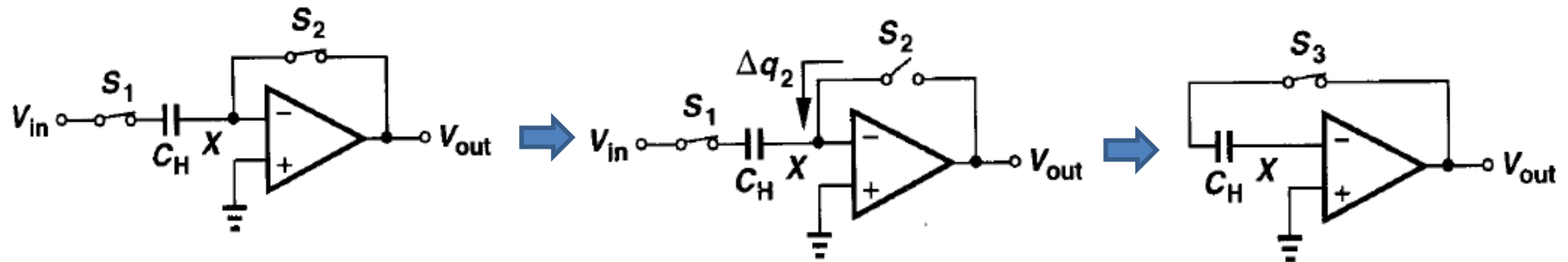
Napon na C_H prati U_{ul}

U fazi zadržavanja S_1 i S_2 su otvorene, a S_3 spaja C_H u povratnu vezu oko OP (slika desno)

Naboj u točki X je sačuvan i ne može se dovesti ili odvesti – U_{iz} poprima vrijednost U_0 , a OP svodi ulazne stezaljke na isti potencijal

Pravilnim upravljanjem sklopkama u vremenu može se minimizirati utjecaj injekcije naboja

Sklop za uzorkovanje – sinkronizacija sklopki



Kod prelaska iz faze uzorkovanja u fazu zadržavanja , S_2 se mora isključiti malo prije nego S_1

Injekcija naboja S_2 - Sklopka injektira naboj Δq_2 i stvara pogrešku u uzorkovanom naponu:

$$\Delta U = \frac{\Delta q_2}{C_H}$$

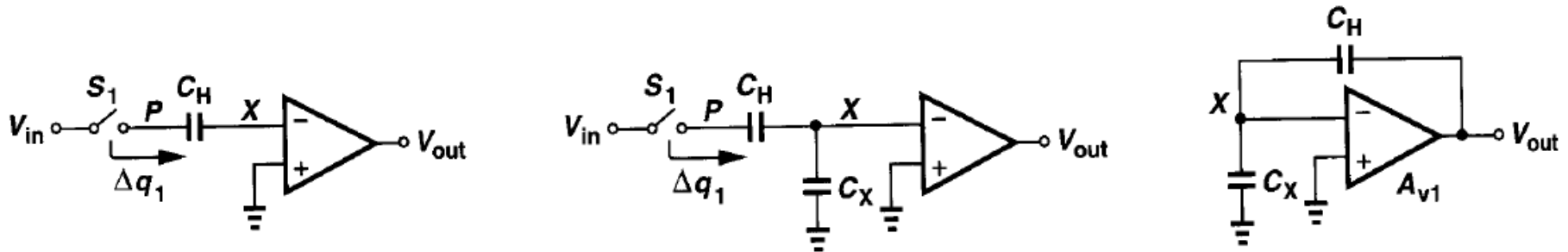
Kako je čvor X na virtualnoj masi (konstantni potencijal) **injektirani naboj ne ovisi o U_{ul}**

$$\Delta q_2 = WLC_{ox}(U_{CK} - U_{GS0} - U_X)$$

U_{GS0} ovisi o U_X (body effect) ali je relativno konstantan jer ne ovisi o U_{ul}

Pogreška je sistematska i predstavlja napon pomaka koji se lako eliminira diferencijskom izvedbom

Sklop za uzorkovanje – sinkronizacija sklopki



Injekcija od S1

Točka X je izolirana te se naboj ne može dovesti na desnu ploču – napon na C_H se ne može promijeniti nakon što se S_2 otvori

U stvarnosti postoji parazitni kapacitet (ili ulazni kapacitet OP-a) – C_X

Kada se dovede Δq_1 na lijevu ploču C_H , na desnoj se inducira isti naboj različitog predznaka

Kako se ukupni naboj u točki X ne može promijeniti, naboj gornje ploče C_X se mora primiti naboj iste količine i suprotnog polariteta

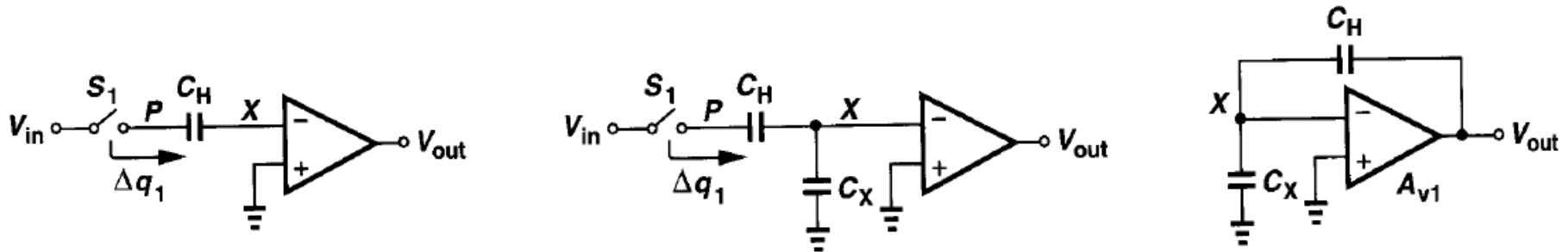
Kada se C_H preklopi u povratnu vezu imamo:

$$\Delta q_1 = C_X U_X = (U_{iz} - U_X) C_H$$

Gdje je

$$U_X = \frac{-U_{iz}}{A_{v1}}$$

Sklop za uzorkovanje – sinkronizacija sklopki



Injekcija od S_1

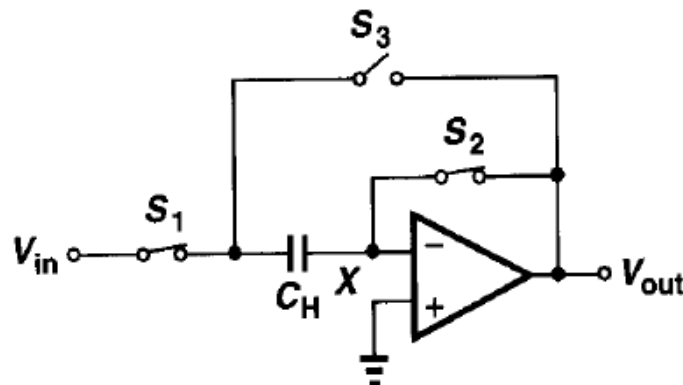
$$(C_X + C_H) \frac{U_{iz}}{A_{V1}} = -U_{iz} C_H \Rightarrow \boxed{U_{iz} = 0}$$

Nema doprinosa od injektiranog naboja iz S_1

Rezultat ne ovisi o Δq_1 , iznosima kapaciteta C_H i C_X te pojačanju OP A_{V1}

S_1 ne unosi pogrešku ako se S_2 prije isključi !!!

Sklop za uzorkovanje – sinkronizacija sklopki



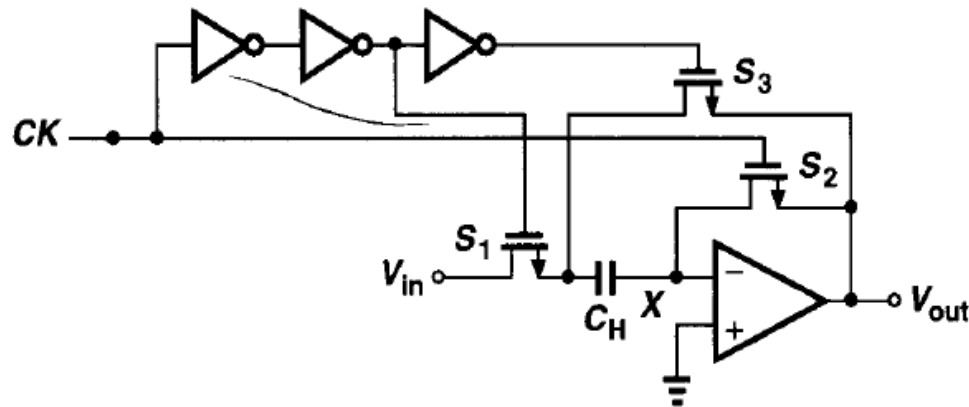
Injekcija od S_3

Kada se S_3 zatvara, potrebno je osigurati naboj za formiranje kanala – otkuda naboj dolazi ?
Kako se naboj u točki X ne može promijeniti, naboj na C_H ostaje sačuvan i kada se postavi u povratnu vezu naboj na njemu je:

$$Q_{CH} = C_H U_0$$

Prema tome naboj za formiranje kanala S_3 u potpunosti se osigurava sa izlaza OP

Sklop za uzorkovanje – sinkronizacija sklopki



Izvedba s pravilnom sinkronizacijom sklopki

Prvo se otvara S_2 i injektira naboj u čvor X – pogreška je sistamatska jer je $U_X = konst.$ i ne ovisi o U_{ul} – jednostavno se eliminira diferencijskom izvedbom

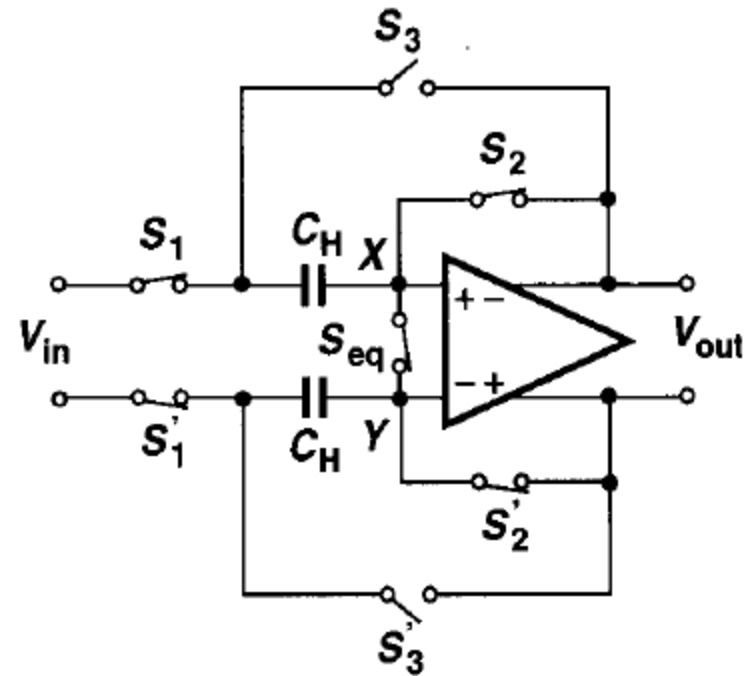
Nakon toga otvara se S_1 i na kraju zatvara se S_3 čija injekcija naboja ne može promijeniti naboj u čvoru X te ne utječe na napon na C_H

Sklop za uzorkovanje – diferencijska izvedba

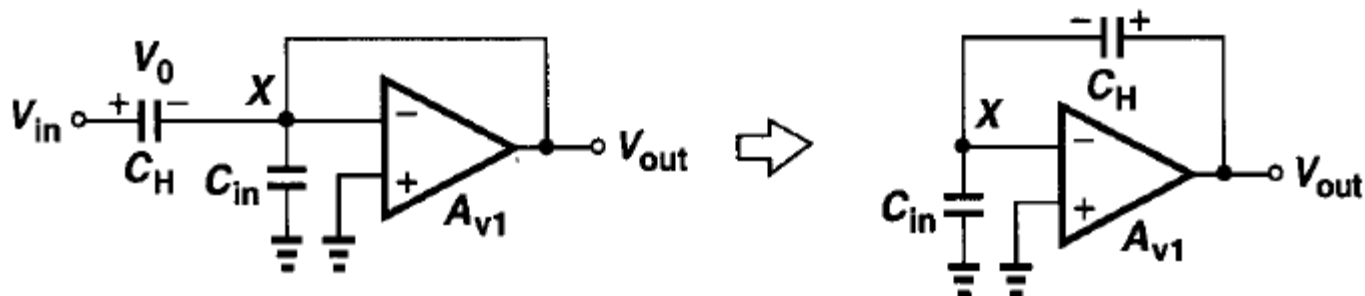
Naboj injektiran iz S_2 i S_2' predstavlja zajednički signal jer ne ovisi o U_{ul}

U stvarnosti S_2 i S_2' nisu savršeno uparene te postoji mala razlika u injektiranom naboju.

Može se dodati sklopka S_{eq} koja se otvara malo poslije S_2 i S_2' te malo prije nego S_1 i S_1' i koja izjednačava naboj u čvorovima X i Y



Sklop za uzorkovanje – preciznost



Na ulazu u OP postoji parazitni ulazni kapacitet – C_{ul}

OP ima konačno pojačanje

U fazi uzorkovanja OP je u spoju sljedila, $U_{iz}=U_X=0$, a C_H se nabija na U_0

Kod prelaska u fazu pojačanja (zadržavanja), zbog konačnog pojačanja OP imamo napon U_X

Naboj na C_{ul} je onda $C_{ul}U_X$

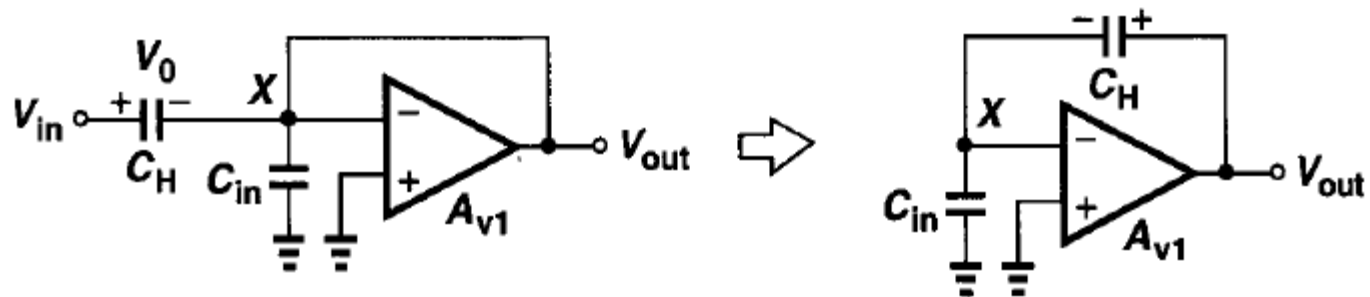
Taj naboj dolazi sa C_H preraspodjelom pa naboj na C_H raste jer zbroj naboja u čvoru X je nepromijenjen

$$Q_{CH} = U_0 C_H + U_X C_{ul}$$

Prema tome napon na C_H je:

$$U_{CH} = \frac{Q_{CH}}{C_H} = \frac{U_0 C_H + U_X C_{ul}}{C_H}$$

Sklop za uzorkovanje – preciznost



Izlazni napon je onda:

$$U_{iz} = U_{CH} + U_X = \frac{U_0 C_H + U_X C_{ul}}{C_H} + U_X = U_0 + U_X \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right)$$

Uz

$$U_X = \frac{-U_{iz}}{A_{v1}}$$

Dobivamo

$$U_{iz} \left[1 + \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right) \right] = U_0$$

$$U_{iz} = \frac{U_0}{1 + \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right)} \approx U_0 \left[1 - \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right) \right]$$

Sklop za uzorkovanje – preciznost

$$U_{iz} = \frac{U_0}{1 + \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right)} \approx U_0 \left[1 - \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right) \right]$$

$$\text{Uz } C_{ul} \ll C_H \rightarrow U_{iz} = \frac{U_0}{1 + \frac{1}{A_{v1}}}$$

Općenito sklop ima pogrešku pojačanja:

$$\varepsilon \approx -\frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right)$$

Pogreška ovisi o ulaznom kapacitetu !!!

Za veliko pojačanje koristimo male prenapone upravljačke elektrode ($U_{GS} - U_{GS0}$) i velike širine kanala za ulazne tranzistore kako bi povećali strminu \rightarrow dobivamo velik C_{ul}

Kod projektiranja pojačala treba naći optimalno rješenje da se smanji pogreška

Možemo završiti na tome da žrtvujemo pojačanje kako bi dobili manji C_{ul} i time manju pogrešku

Sklop za uzorkovanje – preciznost

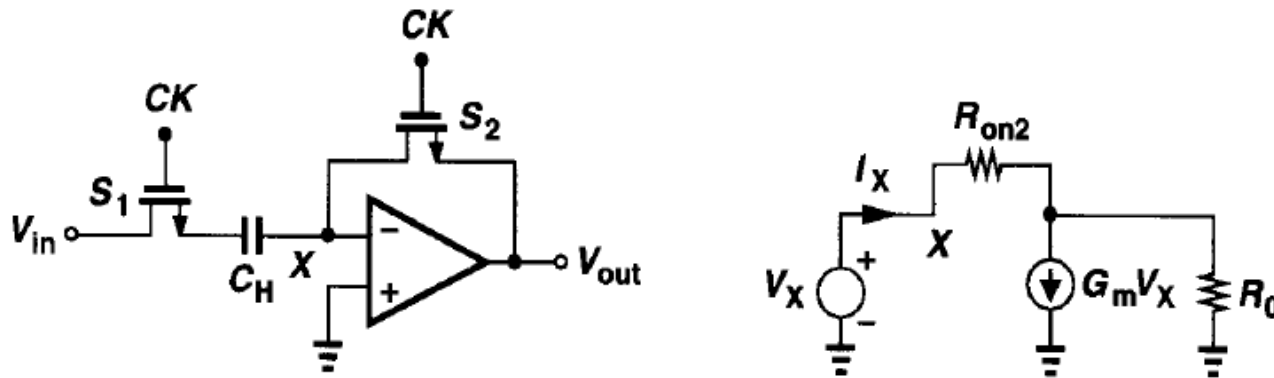
Primjer:

U sklopu za uzorkovanje, $C_{ul}=0.5$ pF i $C_H=2$ pF. Izračunati minimalno pojačanje operacijskog pojačala koje će osigurati pogršku manju od 0.1%

$$|\varepsilon| \approx \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right)$$

$$A_{v1} = \frac{1}{|\varepsilon|} \left(1 + \frac{C_{ul}}{C_H} \right) = \frac{1}{0.001} \left(1 + \frac{0.5}{2} \right) = 1250$$

Sklop za uzorkovanje – brzina



U fazi uzorkovanja

OP je u spoju sljedila, primjenjena je naponska povratna veza koja smanjuje izlazni otpor
Iz nadomjesnog modela imamo:

$$U_X = I_X R_{on2} + (I_X - G_m U_X) R_O \Rightarrow R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{R_{on2} + R_O}{1 + G_m R_O}$$

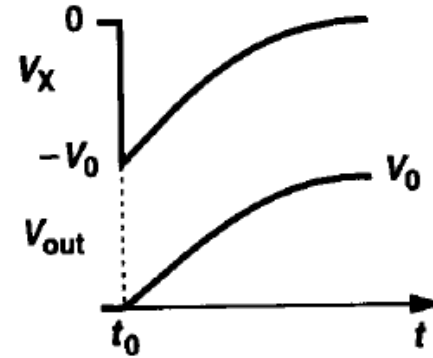
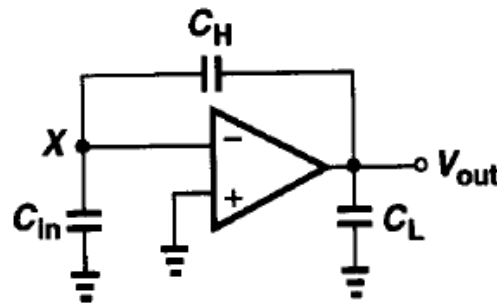
Vrijedi $R_{on2} \ll R_O \rightarrow R_X = 1/G_m$

Zbog naponske negativne povratne veze

Što daje vremensku konstantu u fazi uzorkovanja: $\tau_{smp} = C_H \left(R_{on1} + \frac{1}{G_m} \right)$

Mora biti dovoljno mala da se u određeno vrijeme postigne željena preciznost !!!

Sklop za uzorkovanje – brzina



U fazi zadržavanja (pojačanja)

Pretpostavljamo ulazni i opterećni kapacitet

Nakon što se preklopi C_H u povratnu vezu napon u čvoru X pada za napon U_0 koji se nalazi na C_H zato jer $U_{iz}=0$ u trenutku preklapanja (vrijedi za $C_{ul} \ll C_H$)

Naponu na C_L potrebno je neko vrijeme da poraste zato jer treba dovesti naboj

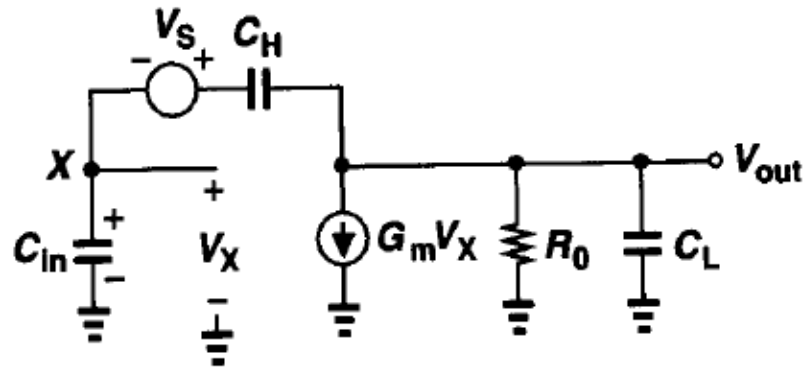
U_X u tom trenutku može doživjeti skok jer iako naboj u čvoru X ostaje konstantan on se može preraspodijeliti između lijeve ploče C_H i gornje ploče C_{ul}

Velik skok U_X može potjerati izlaz pojačala u režim ograničen brzinom porasta (slew-rate)

Pojačalo na izlazu osigurava naboj za $C_L \rightarrow U_{iz}$ raste jer je $U_+ > U_-$

OP tjera U_{iz} na porast sve dok se ne izjednače potencijali ulaznih stezaljki OP-a

Sklop za uzorkovanje – brzina



Uz pretpostavku da OP ostaje u linearnom režimu

Naboj na C_H predstavljamo serijskim naponom U_S koje ima skokovitu promjenu sa 0 na V_0 i C_H koji je prazan (bez naboja)

Želimo dobiti odziv na skokovitu pobudu $U_{iz}(s)/U_S(s)$

$$U_{iz} \left(\frac{1}{R_0} + C_L s \right) + G_m U_X = (U_S + U_X - U_{iz}) C_H s$$

$$U_X \frac{C_{ul}s}{C_H s} + U_X + U_S = U_{iz} \Rightarrow U_X = \frac{U_{iz} - U_S}{1 + \frac{C_{ul}s}{C_H s}}$$

Sklop za uzorkovanje – brzina

$$\frac{U_{iz}(s)}{U_s(s)} = R_O \frac{(G_m + C_{ul}s)C_H}{R_O(C_L C_{ul} + C_{ul}C_H + C_H C_L)s + G_m R_O C_H + C_H + C_{ul}}$$

Uz $G_m R_O C_H \gg C_H + C_{ul} \rightarrow \frac{U_{iz}(s)}{U_s(s)} = \frac{(G_m + C_{ul}s)C_H}{(C_L C_{ul} + C_{ul}C_H + C_H C_L)s + G_m C_H}$

Vremenska konstanta koja određuje pol je:

$$\tau_{amp} = \frac{C_L C_{ul} + C_{ul}C_H + C_H C_L}{G_m C_H}$$

Ne ovisi o izlaznom otporu pojačala

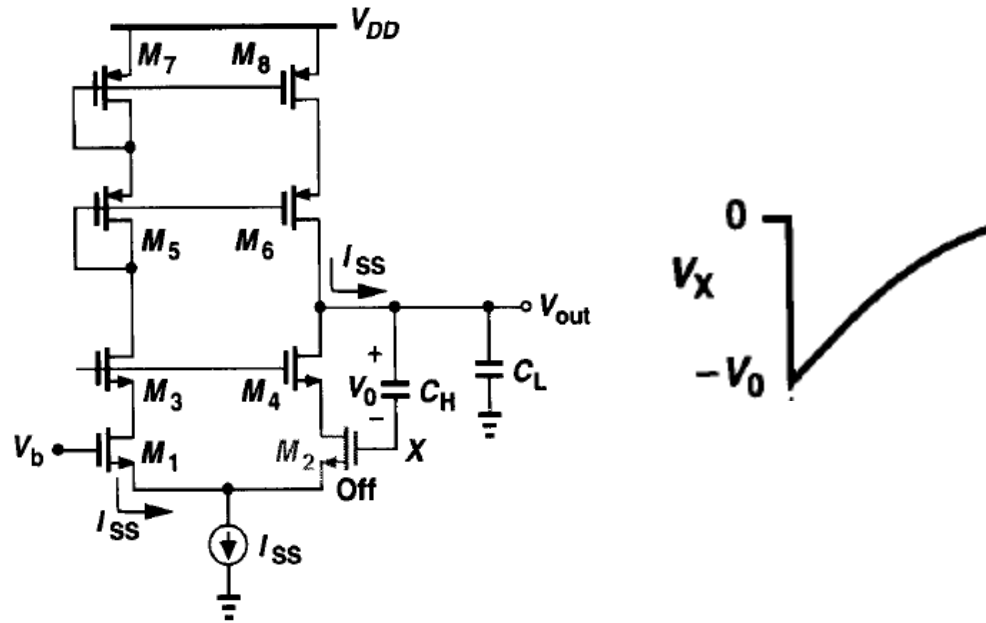
Veći R_O daje veće pojačanje otvorene petlje i konstantnu brzinu uz zatvorenu petlju (konstantan izlazni otpor uz zatvorenu petlju)

Uz $C_{ul} \ll C_L, C_H$:

$$\tau_{amp} = \frac{C_L}{G_m}$$

Očekivano jer izlazni otpor sljedila je $1/G_m$ (uz $C_{ul} \ll$)

Sklop za uzorkovanje – odziv ograničen brzinom porasta



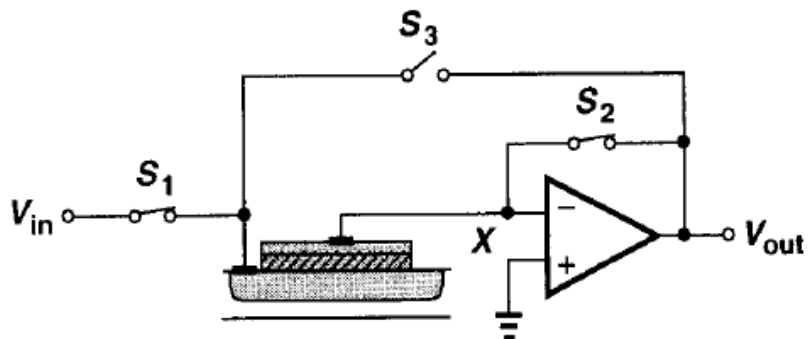
Kod prelaska u fazu zadržavanja (pojačanja) skok napona u čvoru U_x isključi M_2 .

C_L se nabija konstantnom strujom $I_{SS} \rightarrow$ linearni porast napona U_{iz} brzinom I_{SS}/C_L

Kako U_x raste M_2 se uključuje i pojačalo ulazi u linearni režim, napon raste s vremenskom konstantom:

$$\tau_{amp} = \frac{C_L C_{ul} + C_{ul} C_H + C_H C_L}{G_m C_H}$$

Uzorkovanje donjom pločom



Ulazni kapacitet OP utječe i na brzinu i na preciznost

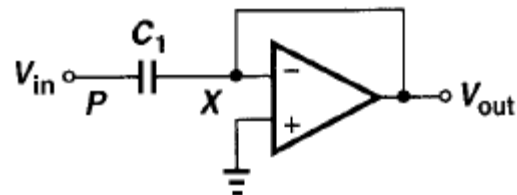
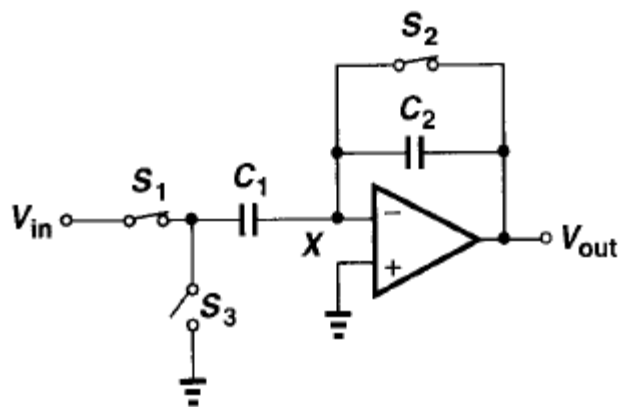
Donja ploča kondenzatora (npr. poly-poly) koja ima veći parazitni kapacitet spaja se tako da je nabija ulazni napon

Gornja ploča s manjim parazitnim kapacitetom se spaja na čvor X

Na taj način izjegava se injektiranje šuma podloge u čvor X

Tzv. “uzorkovanje donjom pločom” (bottom plate sampling)

Ne-invertirajuće pojačalo



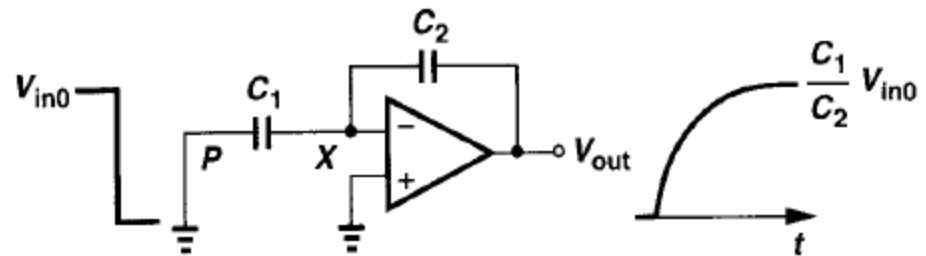
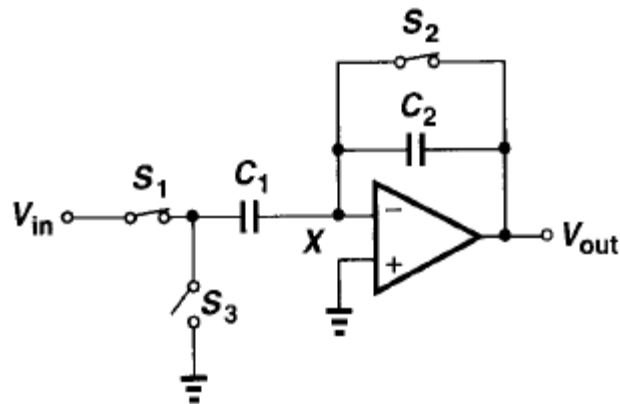
Radi u dvije faze

U fazi uzorkovanja :

S_1 i S_2 su zatvorene, OP je u spoju sljedila

Čvor X predstavlja virtualnu masu, a napon na C_1 prati ulazni napon

Ne-invertirajuće pojačalo



U fazi pojačanja:

Prvo se otvara S_2 i injektira naboj u čvor X

Kako su U_{iz} i U_X na masi, sklopka injektira uvijek isti naboj koji ne ovisi o U_{ul}

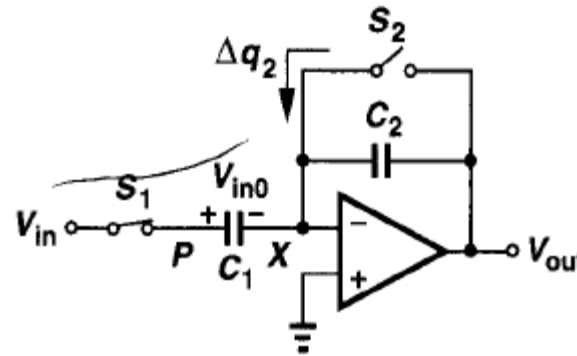
Nakon otvaranja S_2 čvor X je plivajući i ukupan naboj u tom čvoru ostaje sačuvan

Nakon toga otvara se S_1 i zatvara S_3

Napon na C_1 se mijenja sa U_{ul0} na 0, odnosno naboj desne ploče C_1 se premješta na lijevu ploču C_2 te izlazni napon teži prema :

$$U_{iz} = \frac{C_1}{C_2} U_{ul0}$$

Ne-invertirajuće pojačalo – injekcija naboja S2

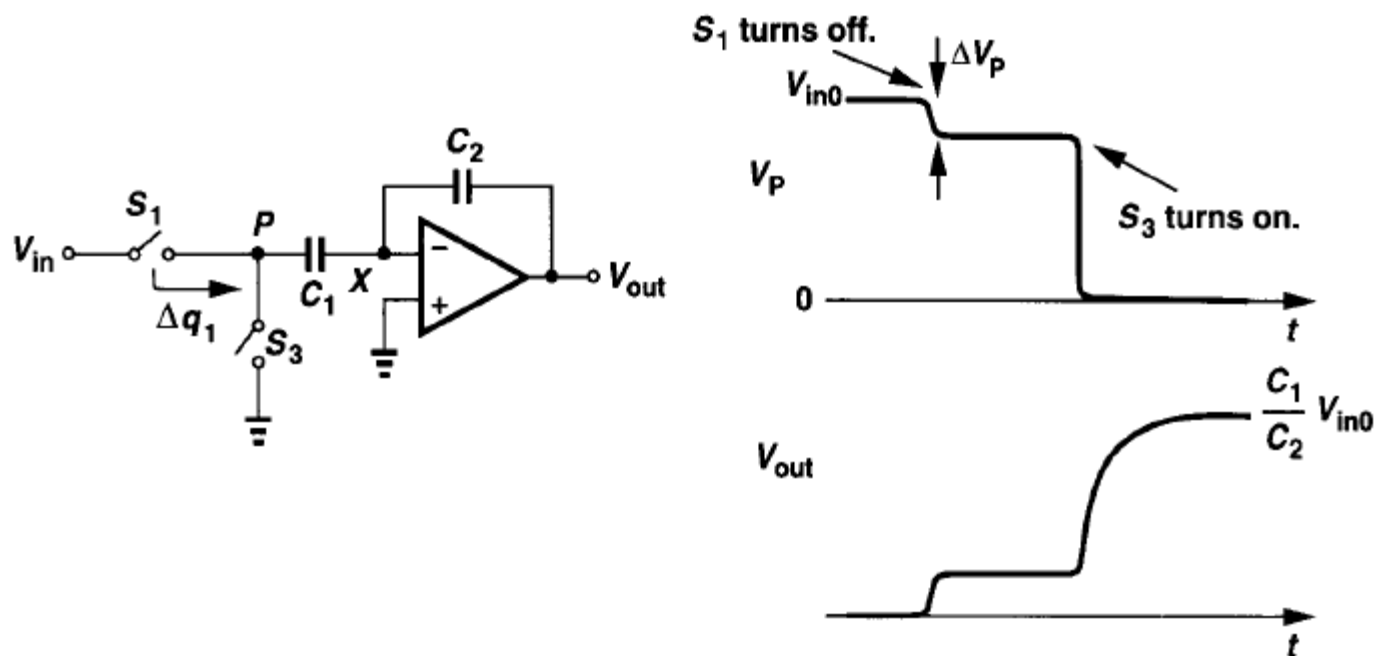


Prvo se otvara S_2 i injektira naboj u čvor X

Kako su U_{iz} i U_X na masi, sklopka injektira uvijek isti naboj koji ne ovisi o U_{ul}

Injekcija naboja može se eliminirati potpuno diferencijskom izvedbom

Ne-invertirajuće pojačalo – injekcija naboja S1 i S3

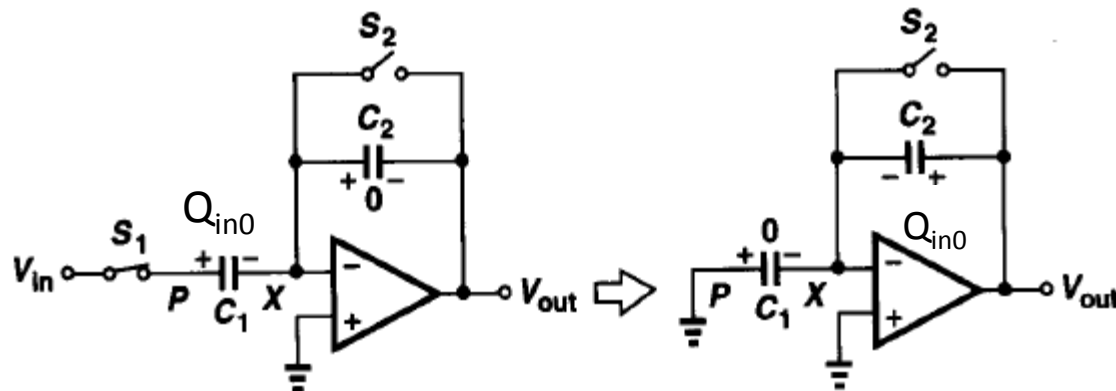


Kako se nakon isključivanja S_2 naboj u čvoru X ne može promijeniti, injekcija naboja iz S_1 i S_3 ne unosi pogrešku

Prvo se otvara S_1 i injektira naboj Δq_1 te unosi pogrešku $\Delta U_P = \Delta q_1 / C_1$ te $\Delta u_{iz} = -\Delta q_1 / C_2$

Kada se zatvori S_3 U_P pada na nulu te U_P ima ukupnu promjenu od U_{ul0} do 0, a izlaz ukupno mora imati promjenu od 0 do $U_{ul0} * C_1 / C_2$

Ne-invertirajuće pojačalo – injekcija naboja S1 i S3



Ključna stvar je da U_p ide s jednog fiksnog napona (U_{ul0}) na drugi (0)

Injekcija naboja iz S1 promijeni napon na C_1 u međukoraku

Međutim U_{iz} se uzima nakon što se P spoji na masu te konačna vrijednost ne ovisi o međukoraku

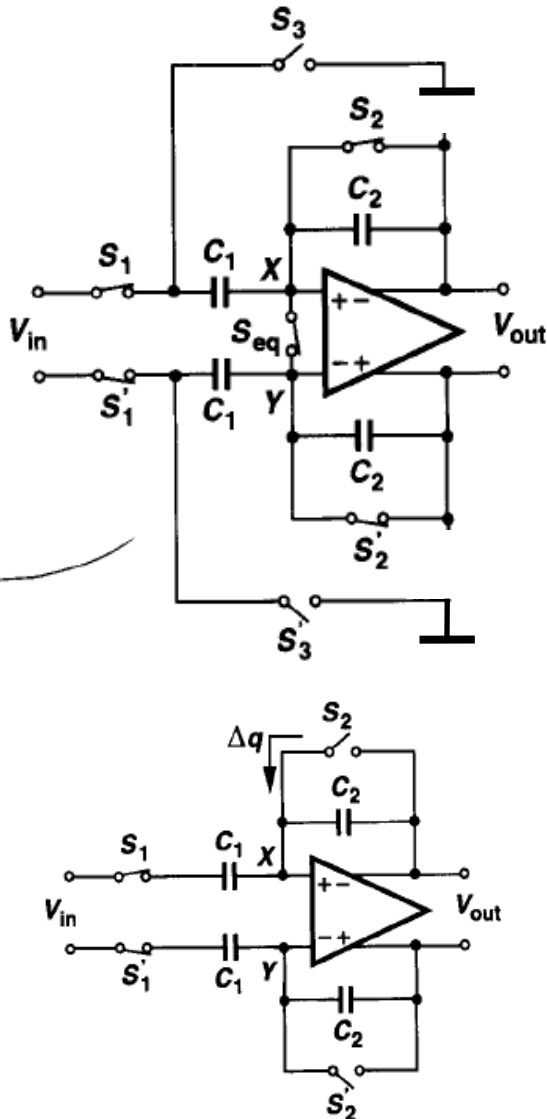
Kako naboj u čvoru X ostaje sačuvan nakon otvaranja S2, konačani U_{iz} ne ovisi o injekciji iz S1 i S3 nego samo o početnoj i konačnoj vrijednosti U_p

Napon u međukoraku može promijeniti napon na C_1 zbog redistribucije naboja između desne ploče C_1 i lijeve ploče C_2

Naboj u čvoru X ostaje sačuvan

U fazi pojačanja OP svodi ulazne stezaljke na isti potencijal te dolazi do redistribucije naboja koji se premješta s desne ploče C_1 na lijevu ploču C_2 . Izlaz OP osigurava naboj desne ploče C_2

Ne-invertirajuće pojačalo – primjer



Primjer:

U diferencijskom sklopu sa slike, sklopke S_2 i S_2' imaju neusklađene napone pragova čija razlika iznosi 10 mV. Pretpostavite da se S_{eq} ne koristi. Ako je $C_1=1$ pF, $C_2=0.5$ pF, $U_{GS0}=0.6$ V i za sve sklopke vrijedi $WLC_{ox}=50$ fF izračunati istosmjerni napon pomaka na izlazu OP uz pretpostavku da se sav naboj iz kanala S_2 i S_2' injektira u čvorove X i Y?

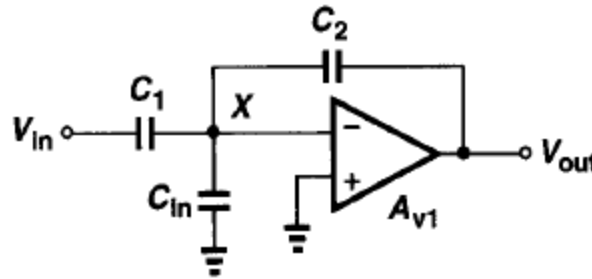
Naboj koji se injektira u čvorove X i Y završi na lijevim pločama kapaciteta C_2 jer su X i Y virtualne mase. Dobiva se:

$$\Delta U_{iz} \approx \frac{\Delta q}{C_2}$$

Gdje je: $\Delta q = WLC_{ox} \Delta U_{GS0}$

$$\text{Slijedi: } \Delta U_{iz} \approx \frac{\Delta q}{C_2} = \frac{WLC_{ox} \Delta U_{GS0}}{C_2} = 1 \text{ mV}$$

Ne-invertirajuće pojačalo – preciznost



Pretpostavljamo konačno pojačanje OP-a A_{v1} te ulazni kapacitet C_{ul} .

Za čvor X pišemo:

$$(U_{iz} - U_X) C_2 s = U_X C_{ul} s + (U_X - U_{ul}) C_1 s, \quad U_X = \frac{-U_{iz}}{A_{v1}}$$

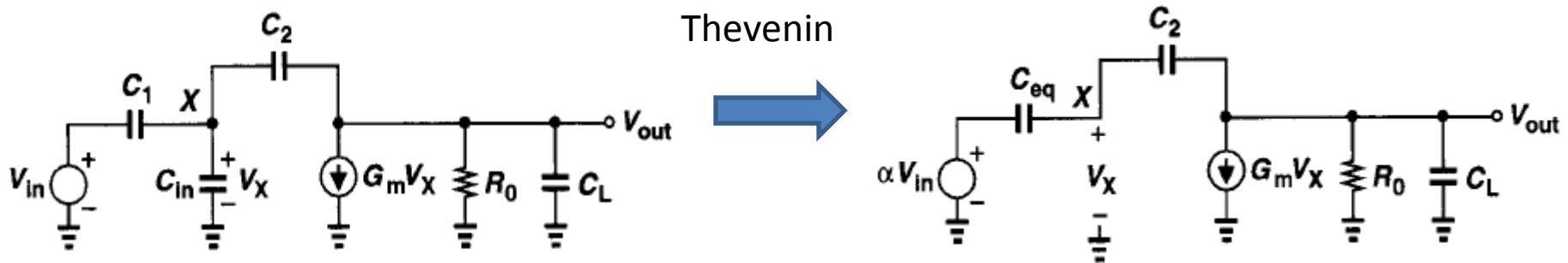
Slijedi:

$$\left| \frac{U_{iz}}{U_{ul}} \right| = \frac{C_1}{C_2 + \frac{1}{A_{v1}}(C_1 + C_2 + C_{ul})} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_{ul}}{C_2} \right)} \approx \frac{C_1}{C_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_{ul}}{C_2} \right) \right]$$

Pogreška pojačanja ovisi o nominalnom pojačanju C_1/C_2

U usporedbi sa sklopom za uzorkovanje pogreška je veća jer je faktor povratne veze $C_2/(C_1 + C_2 + C_{ul})$ u odnosu na $C_H/(C_H + C_{ul})$ kod sklopa za uzorkovanje

Ne-invertirajuće pojačalo – brzina



Veći faktor povratne veze znači da je brzina odziva manja nego kod sklopa za uzorkovanje

Uz pretpostavku modela za izmjenični signal možemo izračunati prijenosnu funkciju. Ulaz se nadomješta po Thevenin-u gdje:

$$\alpha = \frac{C_1}{C_1 + C_{ul}}, \quad C_{eq} = C_1 + C_{ul}$$

Za čvor X možemo napisati

$$U_X = U_{iz} + (\alpha U_{ul} - U_{iz}) \frac{C_{eq} C_2}{C_{eq} + C_2} \frac{1}{C_2}$$

Ne-invertirajuće pojačalo – brzina

Za izlazni čvor možemo napisati:

$$G_m U_X + U_{iz} \left(\frac{1}{R_0} + sC_L \right) = (\alpha U_{ul} - U_{iz}) \frac{C_{eq} C_2}{C_{eq} + C_2} s$$

$$G_m \left(U_{iz} + (\alpha U_{ul} - U_{iz}) \frac{C_{eq}}{C_{eq} + C_2} \right) + U_{iz} \left(\frac{1}{R_0} + C_L s \right) = (\alpha U_{ul} - U_{iz}) \frac{C_{eq} C_2}{C_{eq} + C_2} s$$

Te se za prijenosnu funkciju dobiva:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}}(s) = \frac{-C_{eq} \frac{C_1}{C_{eq} + C_2} (G_m - C_2 s) R_0}{C_2 G_m R_0 + C_{eq} + C_2 + R_0 [C_L C_{eq} + C_L C_2 + C_{eq} C_2] s}$$

Uz $G_m R_0 \gg$

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}}(s) \approx \frac{-C_{eq} \frac{C_1}{C_{eq} + C_2} (G_m - C_2 s) R_0}{C_2 G_m R_0 + R_0 [C_L C_{eq} + C_L C_2 + C_{eq} C_2] s}$$

Odnosno vremenska konstanta

$$\tau_{amp} = \frac{C_L C_{eq} + C_L C_2 + C_{eq} C_2}{C_2 G_m}$$

Dosta veće nego kod sklopa za uzorkovanje jer $C_{eq} = C_{ul} + C_1$

Ne-invertirajuće pojačalo – brzina

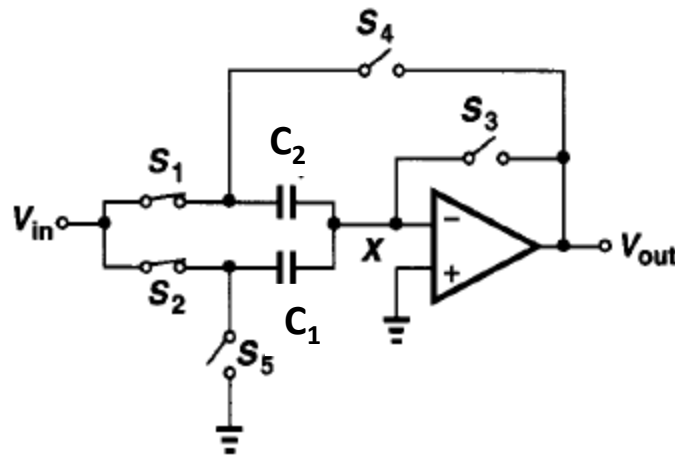
Uz $C_L=0$

$$\tau_{amp} = \frac{C_{eq}}{G_m} = \frac{C_1 + C_{ul}}{G_m}$$

Ne ovisi o C_2 preko kojeg se ostvaruje povratna veza

Veći C_2 predstavlja veće kapacitivno opterećenje ali i osigurava veći faktor povratne veze

Sklop s preciznim množenjem sa 2

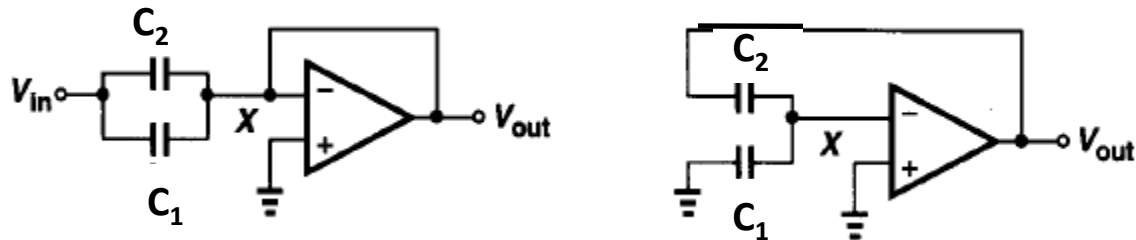


Neinvertirajuće pojačalo može postići relativno veliko pojačanje uz zatvorenu povratnu vezu, ali pri tome pati od smanjenja brzine i preciznosti zbog malog faktora povratne veze.

Ovaj sklop postiže pojačanje 2, ali postiže veću preciznost i brzinu u odnosu na neinvertirajuće pojačalo.

Za pojačanje 2 koristi se $C_1 = C_2 = C$ te sklop radi u dvije faze.

Sklop s preciznim množenjem sa 2



U fazi uzorkovanja S1, S2, S3 su zatvorene. Napon na C_1 i C_2 prati ulazni napon, a OP je postavljeno u spoj sljedila i osigurava virtualnu masu u čvoru X.

Prilikom prelaska u fazu pojačanja, S3 se prva isključuje i injektira naboj u čvor X.

Nakon toga naboj u čvoru X je očuvan i imun na injekciju iz preostalih sklopki.

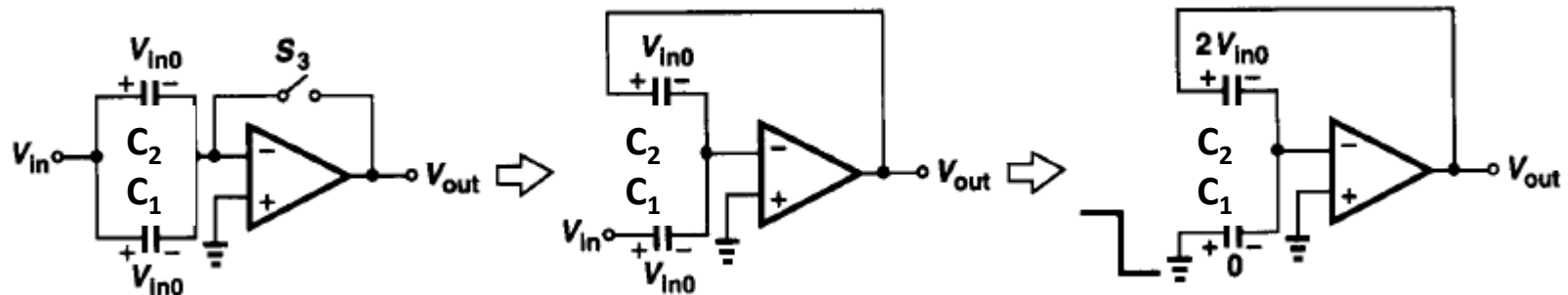
Ukupni naboj na C_1 i C_2 na završetku faze uzorkovanja je $2U_{ul0}C$.

U fazi pojačanja C_2 je spojen u povratnu vezu, a C_1 na masu.

Pojačalo postavlja ulazne stezaljke na isti potencijal, a naboj se transferira na C_2 .

Ukupni napon na C_2 te i izlazni napon postaje $2U_{ul0}$

Sklop s preciznim množenjem sa 2



Transfer naboja kroz pojedine faze prikazan je na slici.

Preciznost i brzina dani su izrazima:

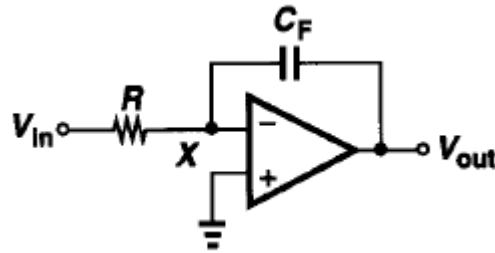
$$\left| \frac{U_{iz}}{U_{ul}} \right| \approx 2 \cdot \left[1 - \frac{1}{A_{v1}} \left(1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_{ul}}{C_2} \right) \right]$$

$$\tau_{amp} = \frac{C_L C_{eq} + C_L C_2 + C_{eq} C_2}{C_2 G_m}$$

U usporedbi s neinvertirajućim pojačalom za isto pojačanje postiže se veći faktor povratne veze jer je $C_1 = C_2$

Kao posljedica dobiva se veća preciznost i veća brzina jer je $C_1/C_2 = 1$ dok je kod neinvertirajućeg pojačala $C_1/C_2 = 2$

Integrator s preklapajućim kapacitetima

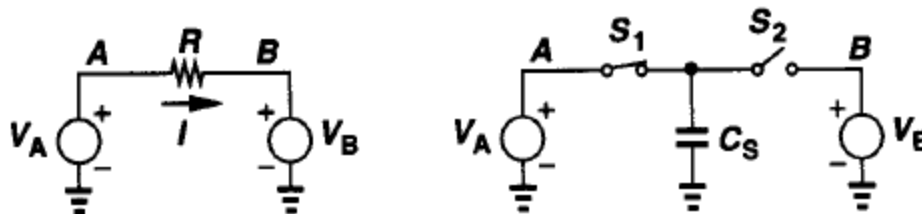


Koriste se u filtrima te pre-uzorkovanim (oversampled) analogno-digitalnim pretvornicima

Izvedba kontinuiranog signala prikazana je na slici, i vrijedi:

$$U_{iz} = -\frac{1}{RC_F} \int U_{ul} dt$$

Izvedba otpornika s preklapajućim kapacitetima



Uloga otpornika je da prenese određenu količinu naboja od točke A do točke B u danom vremenskom intervalu što predstavlja tok struje od A do B.

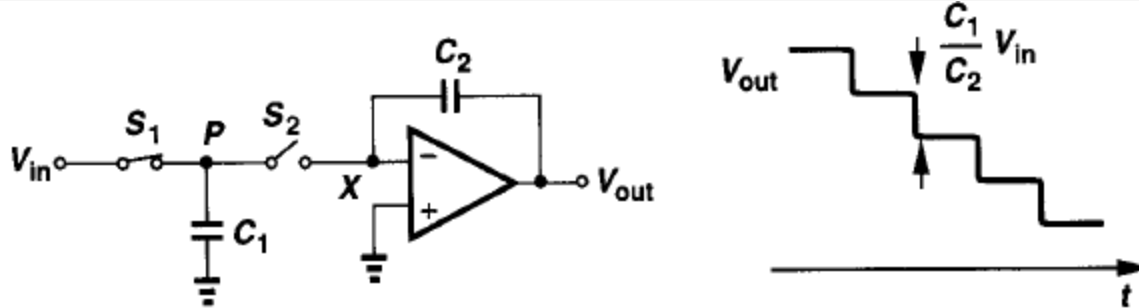
Istu funkciju može odraditi kapacitet C_S .

Ako kapacitet naizmjenice spajamo između točaka A i B frekvencijom f_{CK} , prosječna struja koja teče jednaka je naboju koji se prenese unutar jednog perioda napona takta:

$$I_{AB} = \frac{C_S(U_A - U_B)}{f_{CK}^{-1}} = C_S f_{CK} (U_A - U_B)$$

Prema tome sklop možemo promatrati kao otpornik $R = 1/C_S f_{CK}$

Integrator s preklapajućim kapacitetima



Izvedba je prikazana na slici.

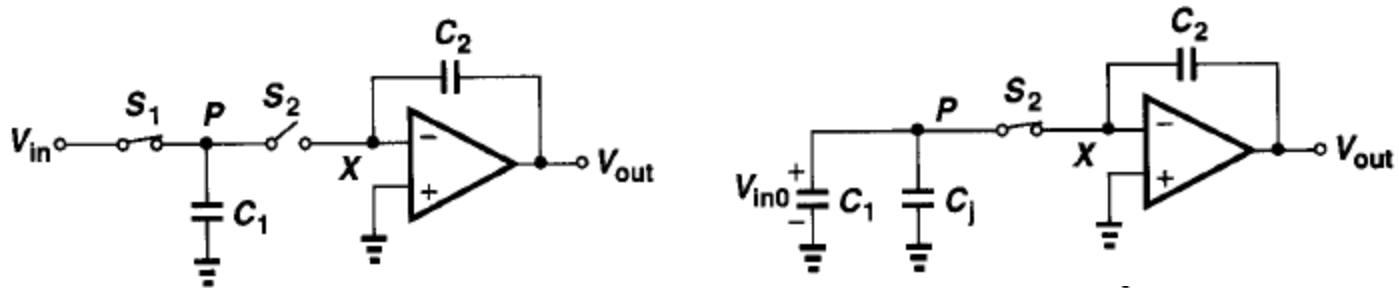
Kada je S1 zatvorena, C_1 se nabija na U_{ul} . Kada se S1 otvori i S2 zatvori, naboj sa C_1 se transferira na C_2 jer OP postavlja ulazne stezaljke u virtualni kratki spoj (X je virtualna masa). Za smirivanje odziva potrebno je vrijeme

$$\tau_{amp} = \frac{C_L C_{ul} + C_{ul} C_H + C_H C_L}{G_m C_H} \quad \text{Izraz za sklop za uzorkovanje}$$

U slučaju konstantnog ulaznog napona, U_{iz} je stepenast sa stepenicom $U_{ul} * C_1 / C_2$. Ako stepenice aproksimiramo pravcem, vidimo da se sklop ponaša kao integrator. Na kraju svakog perioda takta vrijedi:

$$U_{iz}(kT_{CK}) = U_{iz}[(k-1)T_{CK}] - U_{ul}[(k-1)T_{CK}] \frac{C_1}{C_2}$$

Integrator s preklapajućim kapacitetima



Nedostatci:

Injekcija naboja iz S1 ovisi o U_{ul} – nelinearnost naboja na C_1 i posljedično U_{iz}

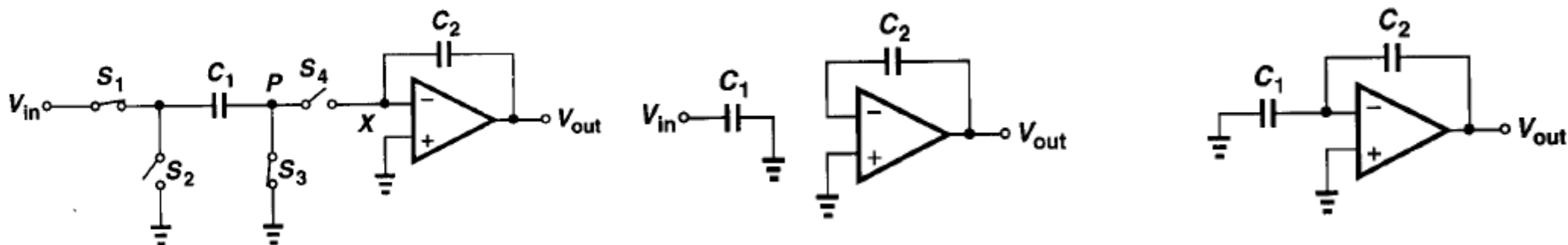
Nelinearni kapacitet u točki P zbog kapaciteta uvida i odvoda tranzistora (C_j) kojima su izvedene S1 i S2 – nelinearna pretvorba naboja u napon kada je C_1 spojen na X

Naboj spremljen na C_j nije $U_{ul0}C_j$ nego:

$$q_{Cj} = \int_0^{U_{ul0}} C_j dU$$

Kako je C_j ovisan o naponu q_{Cj} ima nelinearnu ovisnost o U_{ul0} te uzrokuje nelinearnu ovisnost U_{iz}

Integrator neovisan o parazitima



U fazi uzorkovanja S_1 i S_3 su zatvorene te S_2 i S_4 otvorene – C_1 prati ulazni napon, Dok OP i C_2 zadržavaju prethodnu vrijednost.

Kod prelaska u fazu integracije S_3 se prva otvara i injektira konstantan naboj (neovisan o U_{ul}) na C_1 . Nakon toga otvara se S_1 te se zatvaraju S_2 i S_4 . Naboj sa C_1 transferira se na C_2 preko virtualne mase X .

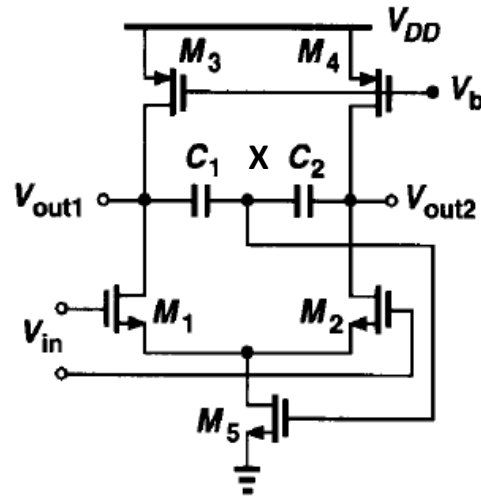
Lijeva ploča C_1 se spaja između dvije točke sa “čvrstim” potencijalom te injekcija naboja S_1 i S_2 ne unosi pogrešku.

Kako X predstavlja virtualnu masu injekcija naboja S_4 je konstantna i ne ovisi o U_{ul} i može se eliminirati diferencijskom izvedbom.

Nelinearnost pn -spojeva S_3 i S_4 ne predstavlja problem jer napon na tim sklopkama se jako malo mijenja (od 0 u fazi uzorkovanja do virtualne mase u fazi integriranja) te rezultira u zanemarivoj nelinearnosti

Povratna veza za zajednički signal s preklapajućim kapacitetima

Jednostavna izvedba:



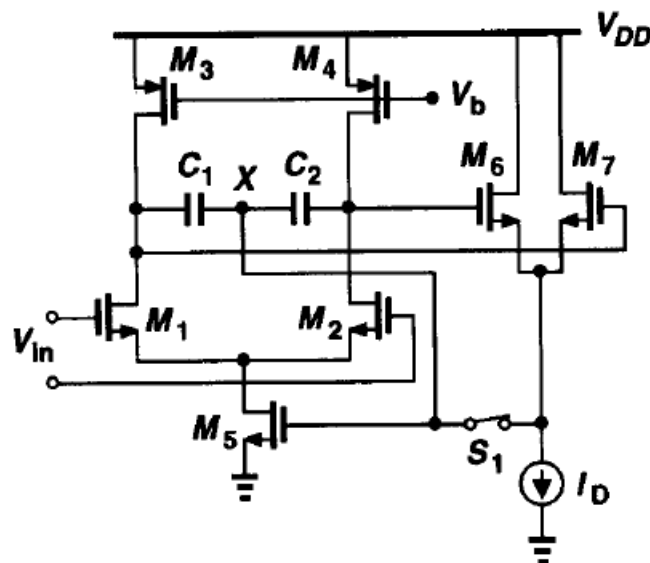
Jednaki kapaciteti C_1 i C_2 u čvoru X mjere promjenu zajedničkog signala (ne mjere razinu zajedničkog signala !) za izlaze U_{iz1} i U_{iz2}

Ako npr. Izlazi odu prema gore i razina zajedničkog signala poraste kao i napon u čvoru X. To povećava struju I_{D5} kao i struje M_1 i M_2 koje tjera prema triodnom području te povlači U_{iz1} i U_{iz2} prema dolje

Izlazni zajednički signal jednak je U_{GS5} plus DC napon koji se postavi na C_1 i C_2

Potrebno je osigurati naboj u X da se postavi napon na C_1 i C_2

Povratna veza za zajednički signal s preklapajućim kapacitetima

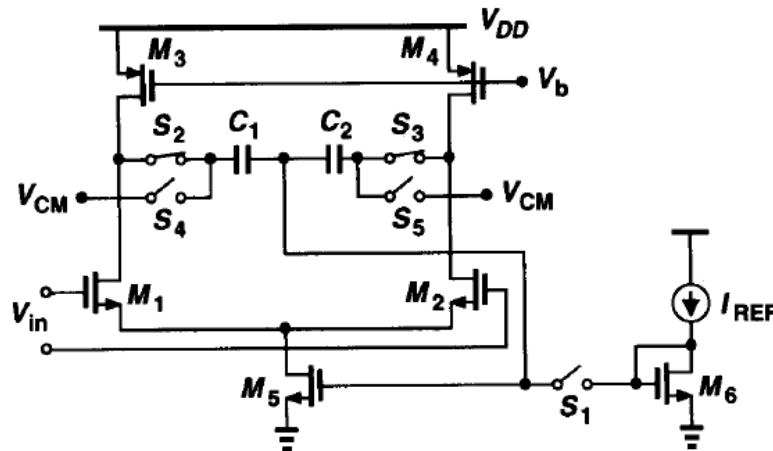


U fazi uzorkovanja (resetiranja OP) postavlja se napon U_X . Pri tome je ulazni diferencijalni napon nula, a S_1 je uključena. M_6 i M_7 rade kao linearni mjerni sklop jer su im upravljačke elektrode na istom potencijalu. Sklop se smiruje tako da se izlazni zajednički signal postavi na $U_{GS6,7} + U_{GS5}$

Prilikom izlaska iz faze uzorkovanja otvara se S_1 , a napon na C_1 i C_2 ostaje $U_{GS6,7}$

U fazi pojačanja M_6 i M_7 trpe velike hodove na upravljačkim elektrodama te i velike nelinearnosti. To ne predstavlja problem jer je S_1 otvorena

Povratna veza za zajednički signal s preklapajućim kapacitetima



U fazi uzorkovanja (resetiranja) jedna ploča C_1 i C_2 je spojena na napon U_{CM} , a druga na upravljačku elektrodu M_6 . Na C_1 i C_2 nalazi se napon $U_{CM} - V_{GS6}$.

U fazi pojačanja S_2 i S_3 se uključuju, a preostale sklopke isključuju te se izlazni zajednički signal postavlja na $U_{CM} - V_{GS6} + V_{GS5}$.

Dobrom usklađenosti struja I_{D3} i I_{D4} sa I_{REF} postiže se $U_{GS5} = U_{GS6}$ te izlazni zajednički signal poprima vrijednost U_{CM} .

Ova topologija daje veću točnost nego prethodna.

Kod velikih hodova izlaznog napona petlja povratne veze za zajednički signal može utjecati na smirivanje odziva. Zbog toga se često M_5 izvodi kao konstantni izvor kojem se paralelno dodaje izvor koji podešava napajanje i preko kojeg se ostvaruje povratna veza.