

# Strujni pojačavači

**U analognoj elektronici naponski pojačavači su dominantni**

- uticaj nasleda: pojačavači sa elektronskim cevima su pojačavali napon
- uticaj tehnologije izrade integrisanih kola
- priključivanje naponskog pojačavača je jednostavnije od priključivanja strujnog pojačavača (koje zahteva raskidanje grane čija struja se pojačava)
- ulazni diferencijalni stepen naponskih pojačavača ima dobro potiskivanje signala srednje vrednosti
- pojačavači sa naponskim izlazom ne zahtevaju diferencijalni izlaz za primenu (naponske) povratne spregе

**Mane prisutne kod naponskih operacionih pojačavača u kolima sa povratnom spregom:**

- konstantan proizvod pojačanja i propusnog opsega, ako se radi o naponskom pojačavaču sa povratnom spregom
- ograničena maksimalna brzina promene izlaznog napona, određena strujom strujnog izvora ulaznog diferencijalnog stepena

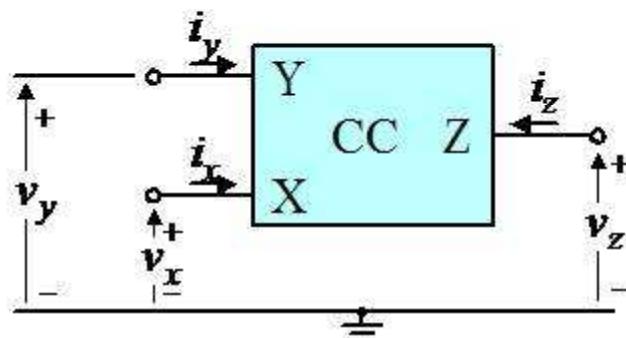
**Razvoj tehnologije izrade integrisanih kola omogućio je izradu drugačijih tipova pojačavača. Jedan od tih tipova su strujni pojačavači. Strujni pojačavači imaju bolje karakteristike u pogledu brzine rada, naročito kada se realizuju u bipolarnoj tehnologiji (sa vertikalnim tranzistorima oba tipa).**

# Strujni prenosnici (current conveyors - CC)

**Strujni pojačavači bez povratne sprege, sa malim i konstantnim strujnim pojačanjem koje je određeno geometrijom tranzistora ili vrednostima impedansi na ulazu i izlazu.**

**Imaju četiri priključka →**

**U poređenju sa OP imaju veći AB proizvod i obezbeđuju veći CMRR u instrumentacionim pojačavačima**



# Strujni prenosnici prve vrste - CCI

**Napon na ulazu X jednak je naponu priključenom na ulaz Y i ne zavisi od struje I koja se dovodi na ulaz X**

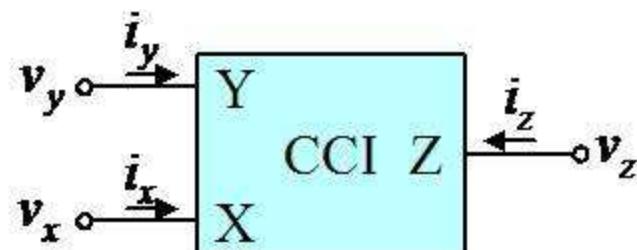
**Struja ulaza Y jednaka je struji I koja se dovodi na ulaz X i ne zavisi od napona priključenog na ulaz Y**

**Struja I prenosi se do izlaznog priključka Z koji ima karakteristike strujnog izvora struje I i velike izlazne impedanse**

**Matrična predstava:**

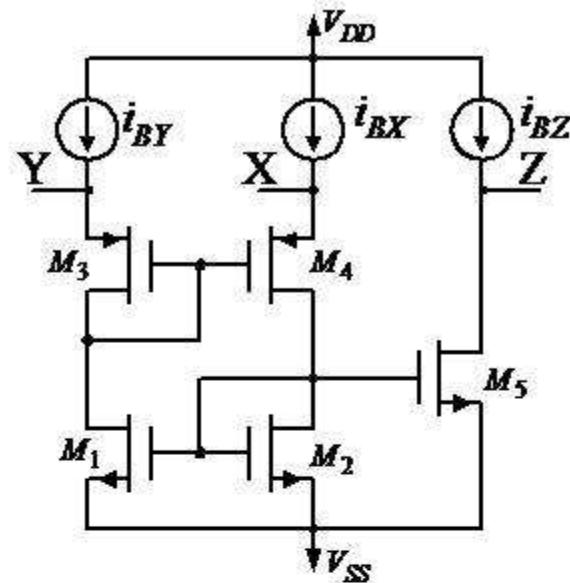
$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} i_x = i_y = i_z \\ v_x = v_y \end{cases}$$



## CMOS realizacija:

NMOS tranzistori M1 i M2 čine strujno ogledalo koje obezbeđuje jednakost struja drenova PMOS tranzistora M3 i M4 a stoga i jednakost napona na priključcima X i Y

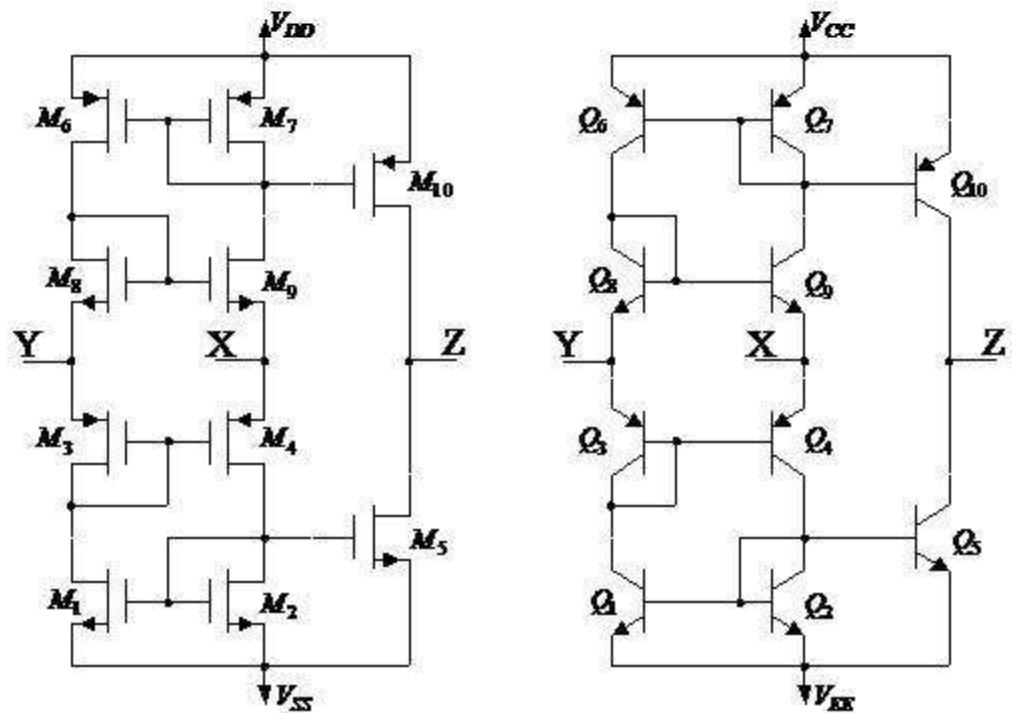


## Puš-pul realizacija:

Kolo u klasi AB može da radi sa strujama oba polariteta.

## Dva komplementarna prenosnika

Za realizaciju sa bipolarnim tranzistorima potrebno je da i pnp tranzistori budu dobrih karakteristika (vertikalni)

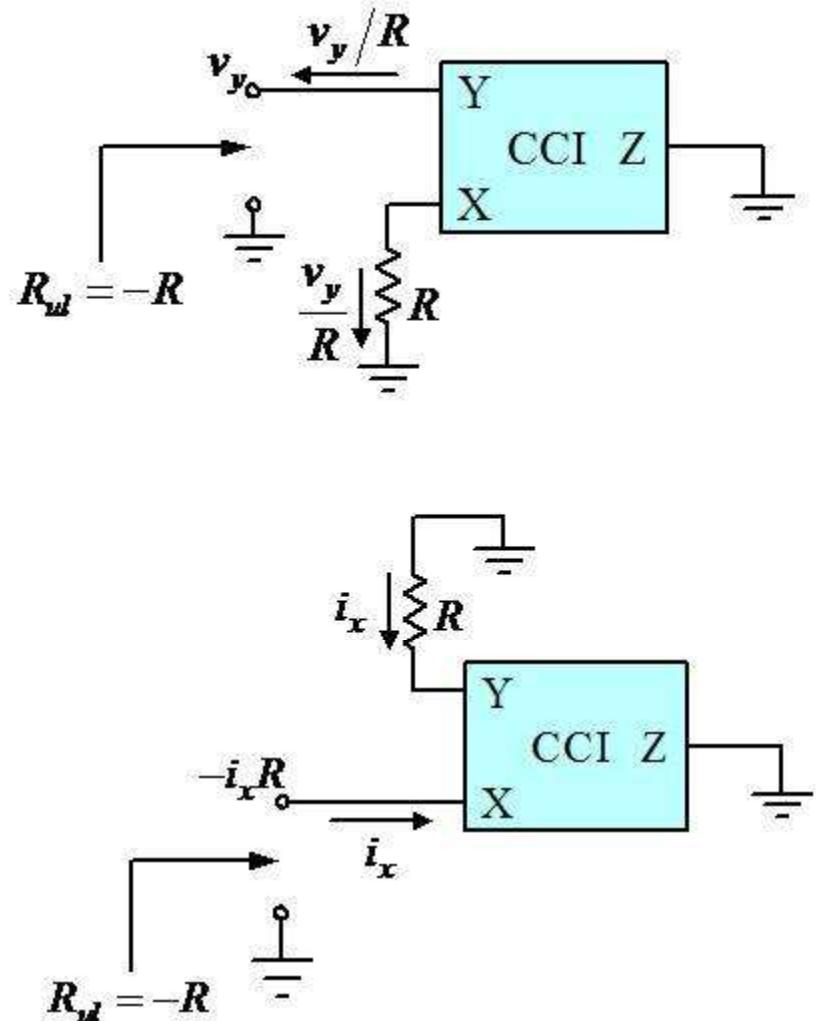


**Primena:**

### **Negativni konvertor impedanse**

**Ako se od ulaza X do mase priključi otpornik R, ulazna impedansa između priključka Y i mase je negativna otpornost  $-R$  na koju se dovodi napon  $v_Y$**

**Ako se od ulaza Y do mase priključi otpornik R, ulazna impedansa između priključka X i mase je negativna otpornost  $-R$  kroz koju teče struja  $i_X$**



**Može da se koristi u oscilatorima**

# Strujni prenosnici druge vrste - CCII

**Napon na ulazu X jednak je naponu priključenom na ulaz Y i ne zavisi od struje I koja se dovodi na ulaz X**

**Struja ulaza Y jednaka je nuli, a njegova ulazna impedansa je beskonačna**

**Struja I prenosi se do izlaznog priključka Z koji ima karakteristike strujnog izvora struje I i velike izlazne impedanse**

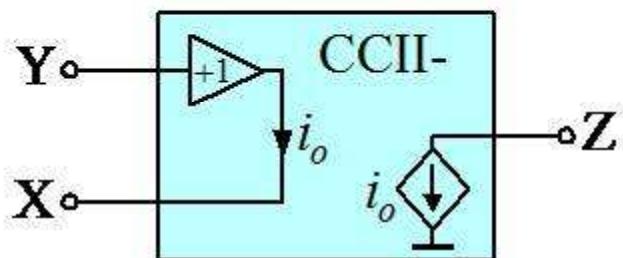
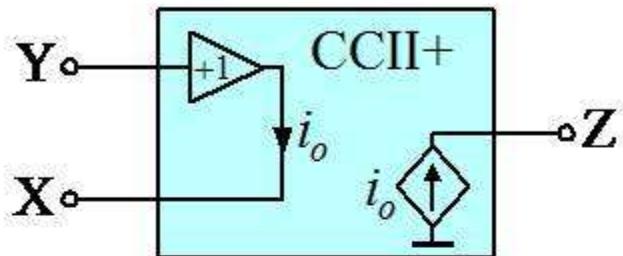
**Matrična predstava:**

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} i_y = 0 \\ v_x = v_y \\ i_z = \pm i_x \end{cases}$$

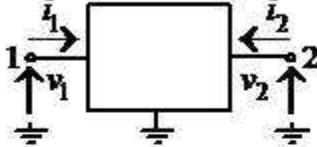
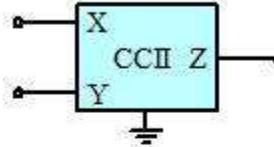
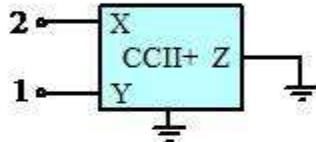
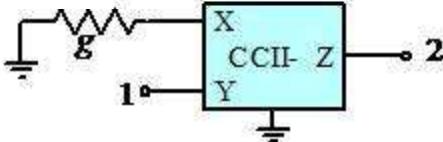
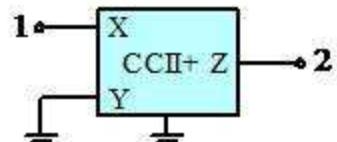
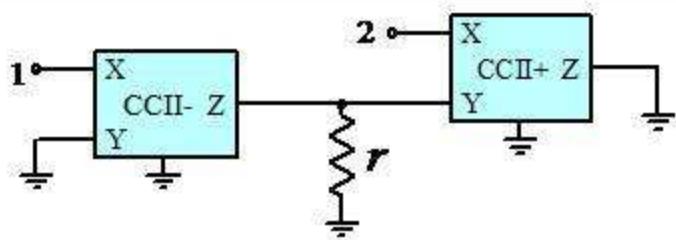


**CCII- se ponekad naziva idealnim MOS tranzistorom, kod kojeg je priključak Y gejt, X je sors, a Z drejn**



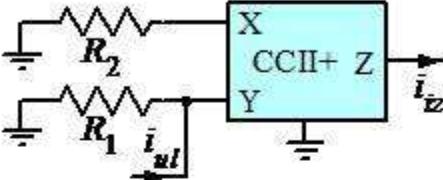
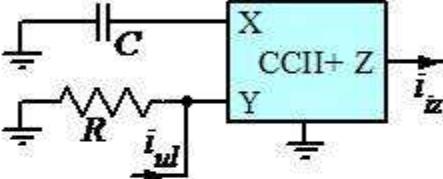
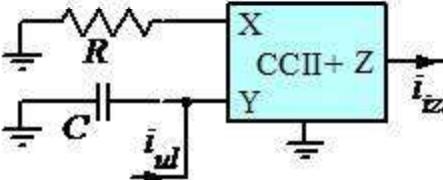
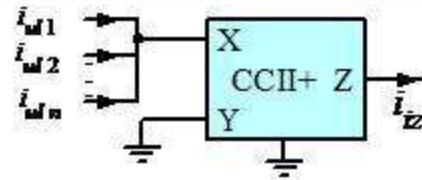
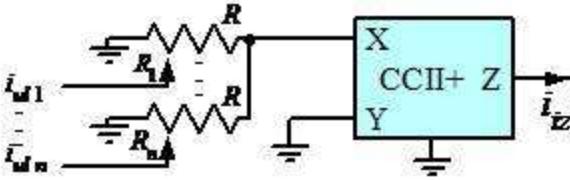
# Primene strujnih prenosnika u sintezi mreža

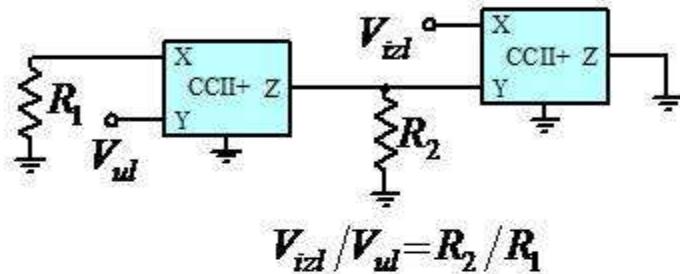
## Kontrolisani izvori, konvertori impedanse, invertori impedanse, žiratori

	Karakterizacija	Realizacija primenom strujnih prenosnika
Realizovana mreža sa dva pristupa		
Naponom kontrolisani naponski izvor	$\begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{G} \times \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	
Naponom kontrolisani strujni izvor	$\begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \times \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ g & 0 \end{bmatrix}$	
Strujom kontrolisani strujni izvor	$\begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \times \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	
Strujom kontrolisani naponski izvor	$\begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \times \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ r & 0 \end{bmatrix}$	

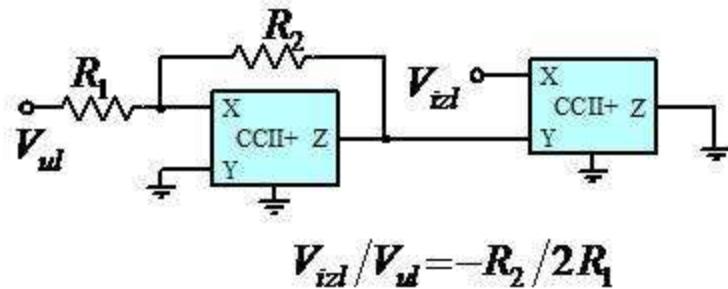
Realizovana mreža sa dva pristupa	Karakterizacija	Realizacija primenom strujnih prenosnika
NIC (Negativni konvertor impedanse)	$\begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = G \times \begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	
NIV (Negativni invertor impedanse)	$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = Y \times \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} 0 & g_1 \\ g_2 & 0 \end{bmatrix}$	
Žirator (Pozitivni invertor impedanse)	$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = Y \times \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} 0 & -g \\ g & 0 \end{bmatrix}$	

# Primene strujnih prenosnika u analognoj računskoj tehnici

Funkcionalni element	Funkcija	Realizacija primenom strujnih prenosnika
Strujni pojacavac	$i_{zsl} = \frac{R_1}{R_2} i_{ul}$	
Strujni diferencijator	$i_{zsl} = RC \frac{di_{ul}}{dt}$	
Strujni integrator	$i_{zsl} = \frac{1}{RC} \int i_{ul} dt$	
Strujni sabirac	$i_{zsl} = -\sum_j^n i_{ulj}$	
Strujni sabirac sa težinskim faktorima	$i_{zsl} = -\sum_j^n i_{ulj} \frac{R_j}{R}$	



**Pojačavač napona napravljen primenom strujnih prenosnika**



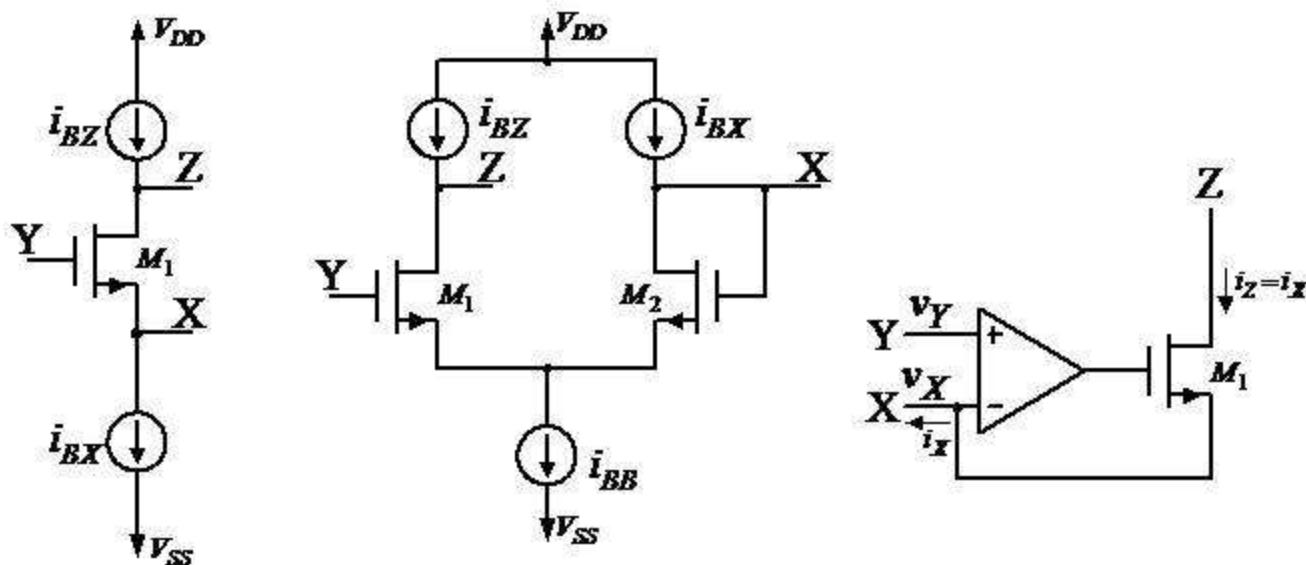
**Pojačavač napona sa povratnom spregom napravljen primenom strujnih prenosnika**

# MOS realizacije CCII

**Negativni strujni prenosnik druge vrste (CCII-):**

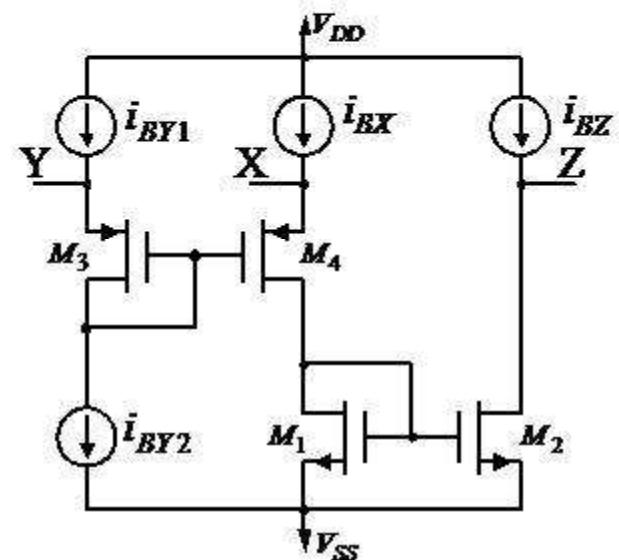
**Najjednostavnija realizacija – jedan NMOS tranzistor polarisan strujnim izvorom ← naponi priključaka X i Y razlikuju se za  $V_{GS1}$ , što se može otkloniti dodavanjem jednog tranzistora za pomeranje nivoa**

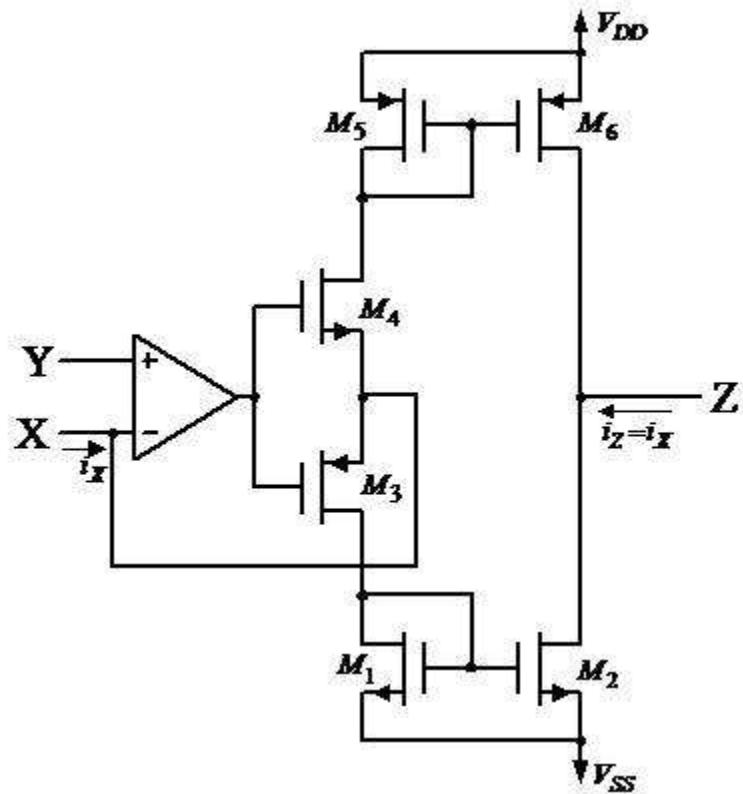
**Druga realizacija – NMOS tranzistor u petlji povratne sprege operacionog pojačavača**



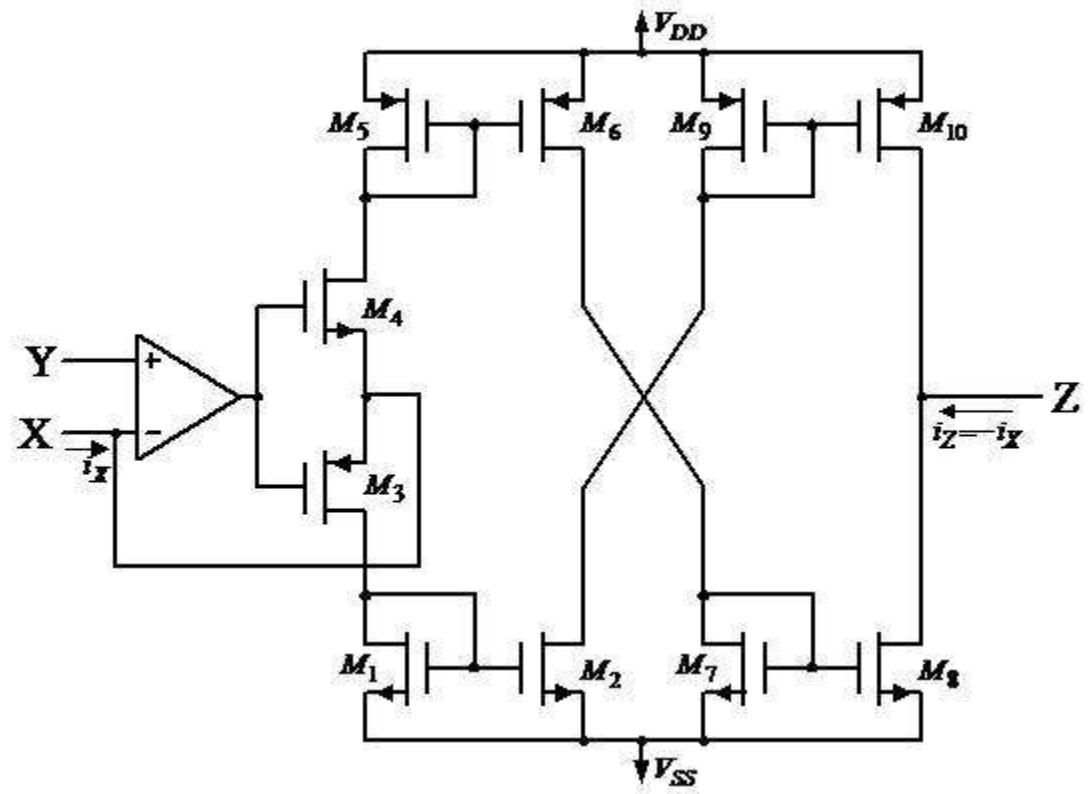
**Pozitivni strujni prenosnik druge vrste (CCII+):**

**Približno kao CCI samo sa  $i_y = 0$  ( $i_{BY1} = i_{BY2} = i_{BX} = i_{BZ}$ )**



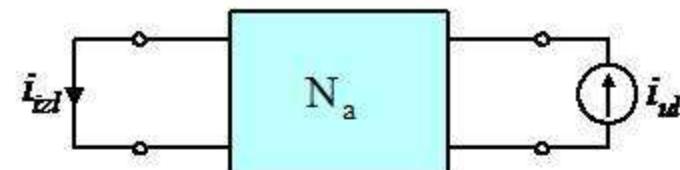
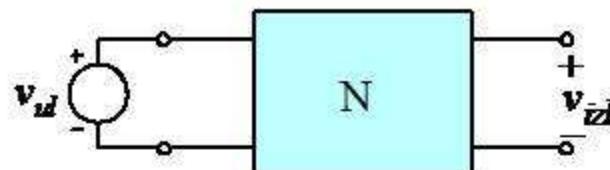


**Simetrični CCII+ u CMOS tehnologiji**



**Simetrični CCII- u CMOS tehnologiji**

## Pridružene mreže



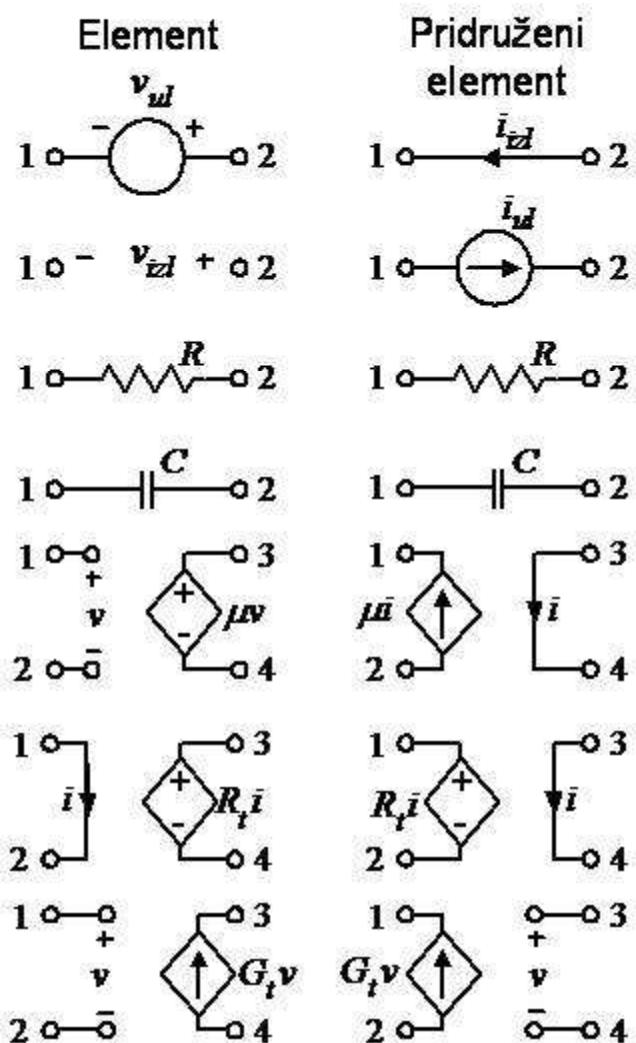
**Mreže  $N$  i  $N_a$  su međusobno  
recipročne ako je zadovoljen uslov  $\uparrow$**

$$v_{zL}/v_u = i_{zL}/i_u$$

**Pridružena mreža  $N_a$  može da se napravi ako se svaki element mreže  $N$  zameni odgovarajućim pridruženim elementom  $\rightarrow$**

**Polazeći od poznatih standardnih aktivnih RC – mreža, generisanjem pridruženih mreža mogu da se realizuju mreže sa strujnim prenosnicima koje realizuju iste prenosne funkcije kao standardna kola**

**Naponski pojačavač sa beskonačnom ulaznom impedansom i nultom izlaznom impedansom transformiše se u strujni pojačavač sa nultom ulaznom impedansom i beskonačnom izlaznom impedansom.**



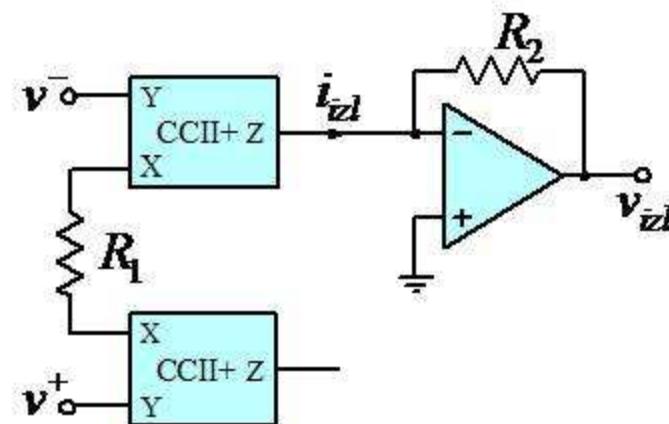
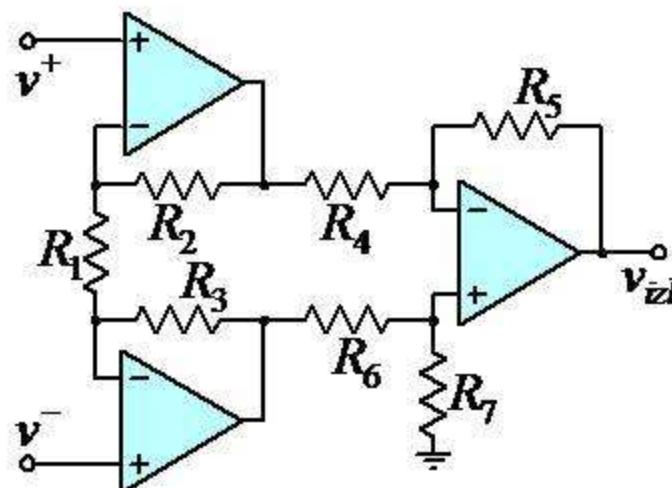
# Instrumentacioni pojačavač

**Instrumentacioni pojačavač napravljen od tri OP zahteva nekoliko uparenih otpornika da bi imao veliki CMRR**

**OP sa velikim pojačanjem imaju ograničeni AB proizvod, pa je propusni opseg CMRR relativno mali**

**Diferencijalni pojačavač sa velikim CMRR može takođe da se realizuje od dva strujna prenosnika i dva otpornika (i 1 OP), bez uparenih komponenata**

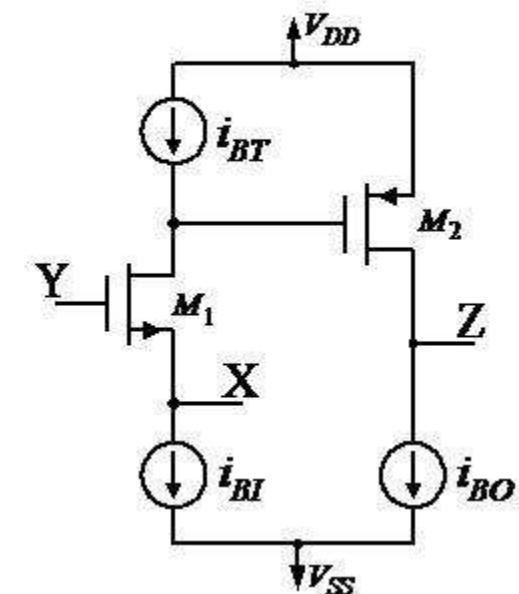
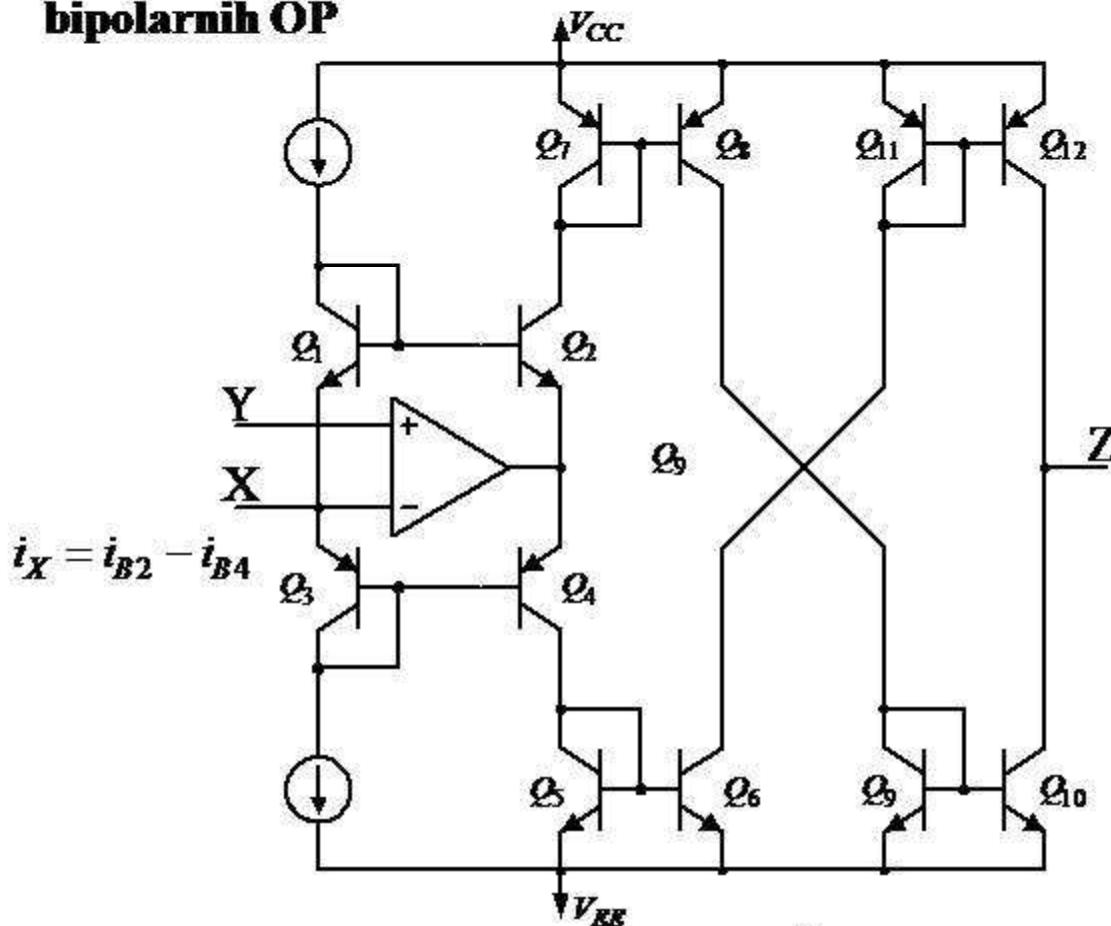
**Propusni opseg pojačavača na bazi strujnih prenosnika je veliki i pri velikom pojačanju, pošto strujni prenosnici rade bez povratne sprege, bez ograničenja AB proizvoda**



# Strujni prenosnici druge vrste sa vrlo velikim strujnim pojačanjem - CCII $\infty$

Sastoje se od CCII- i transkonduktansnog izlaznog bafera

Bipolarne realizacije su složenije od konvencionalnih bipolarnih OP



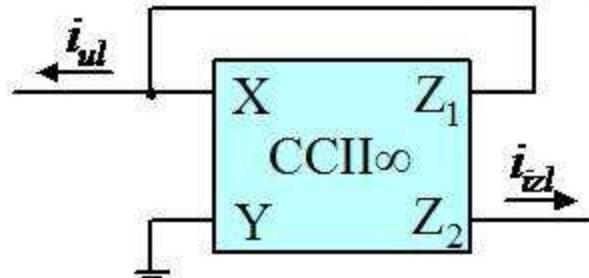
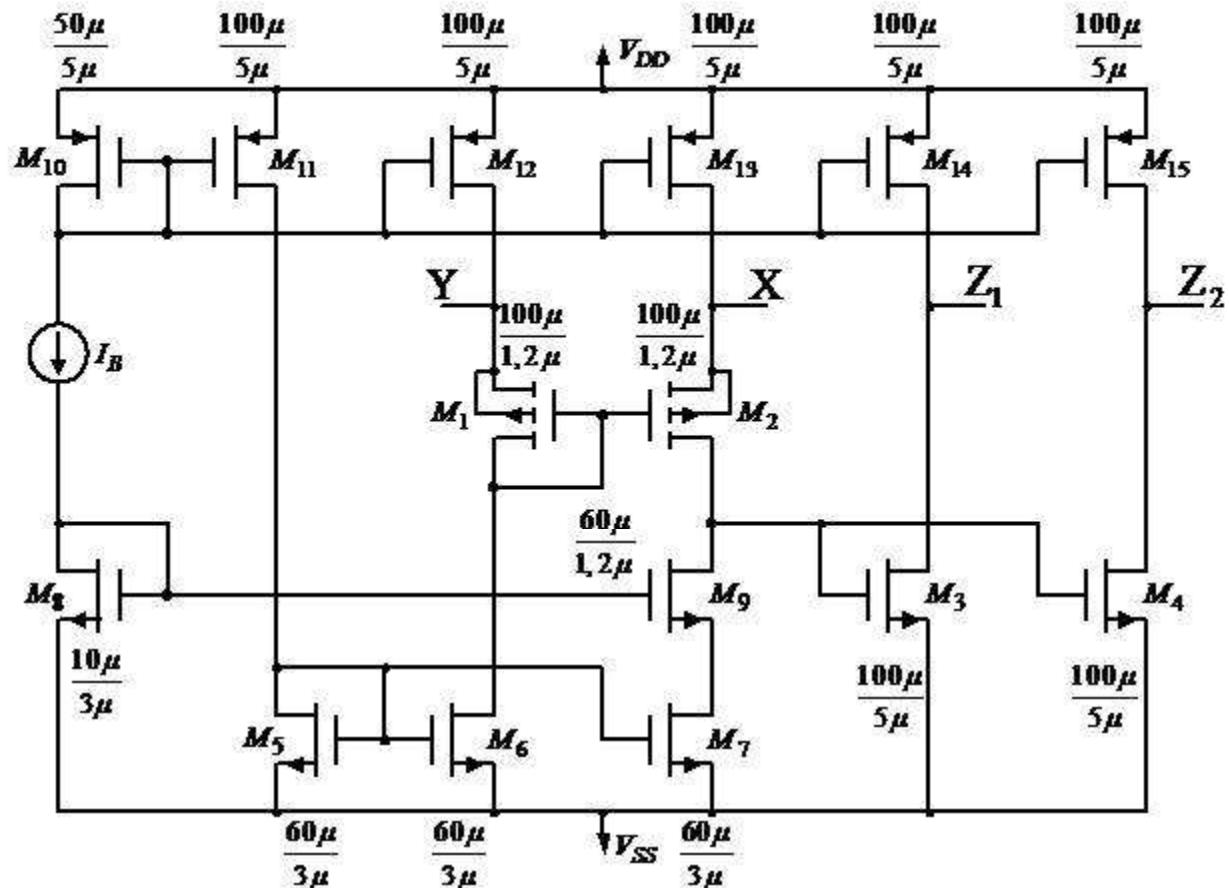
# Primer: CCII $\infty$ u CMOS 1,2 $\mu\text{m}$ tehnologiji

**U nekim primenama može da se koristi kao direktna zamena za OP.**

**Ulagni PMOS naponski bafer ( $M_1, M_2$ ) maksimizira opseg ulaznog napona, ali nije dobar za visoke učestanosti – veće su parazitne kapacitivnosti zbog lebdeće nwell oblasti**

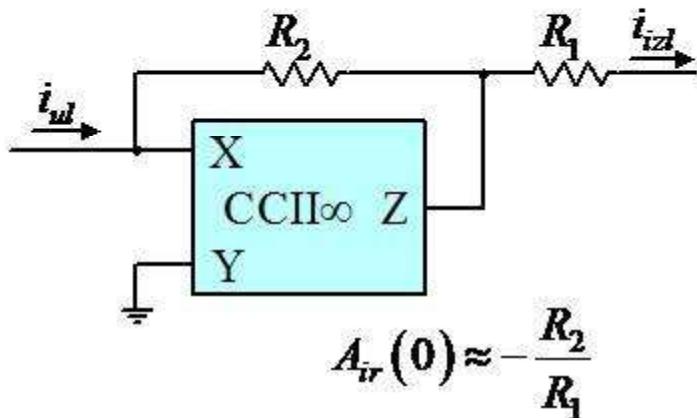
**Dva identična izlaza omogućavaju primenu sa jediničnim strujnim pojačanjem:**

**CCII $\infty$  sa zatvorenom petljom = CCII+**



## Strujni pojačavač sa povratnom spregom

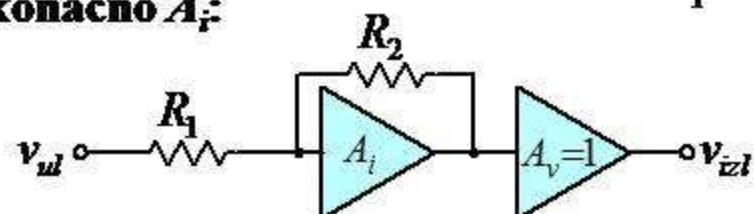
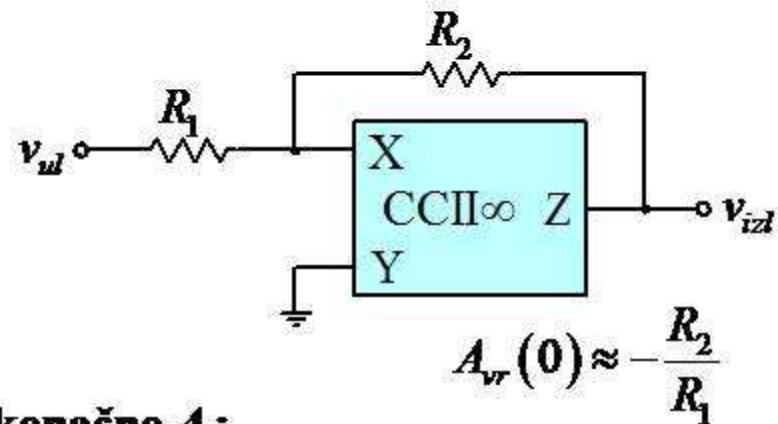
Izlazi Z1 i Z2 su kratkospojeni



## Naponski pojačavač sa povratnom spregom

Izlazi Z1 i Z2 su kratkospojeni

Kompenzacioni kondenzator 5pF na gejtvovima M3 i M4



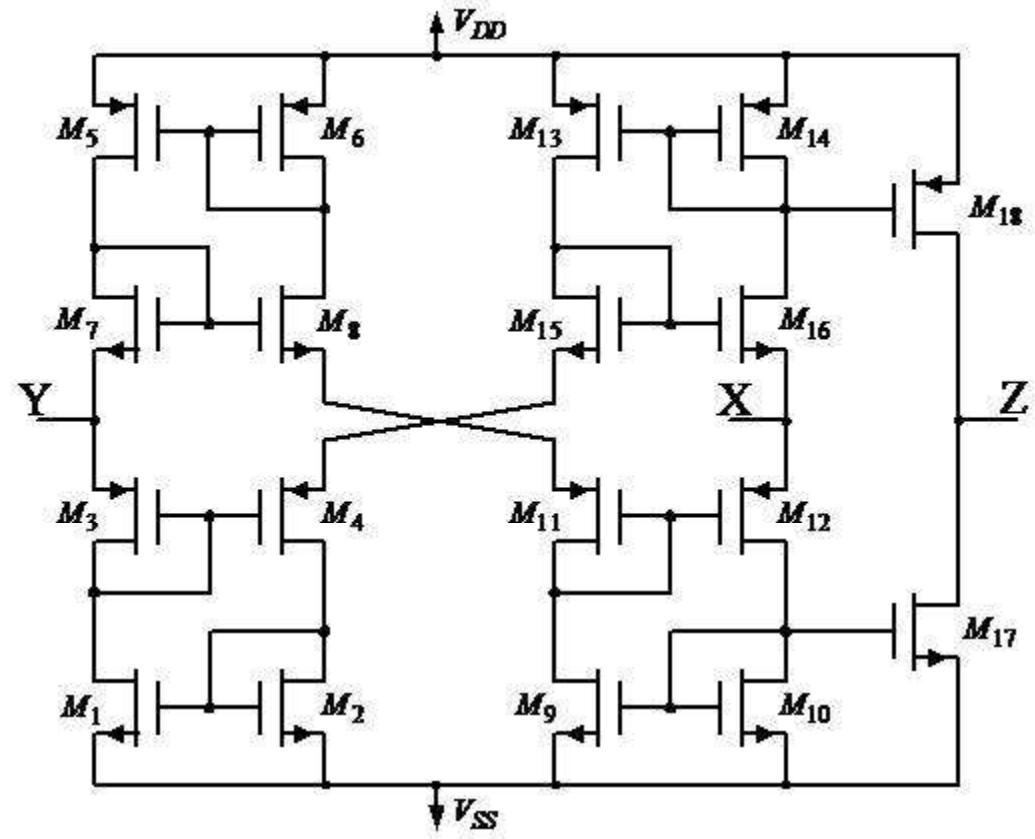
$$\frac{v_{izl}}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{A_i}{A_i + 1}$$

# Strujni prenosnici treće vrste - CCIII

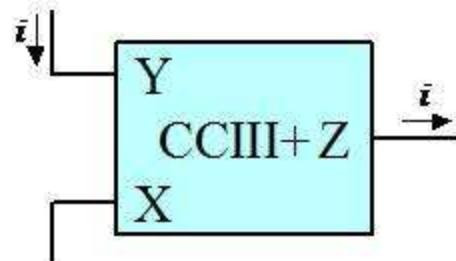
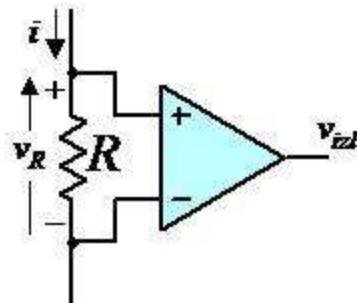
Slični su CCI, sem što struje ulaznih priključaka X i Y teku u suprotnim smerovima

Puš – pul topologija realizovana sa 4 obična CCI prenosnika

Glavna primena u merenjima struje, umesto šanta i operacionog pojačavača

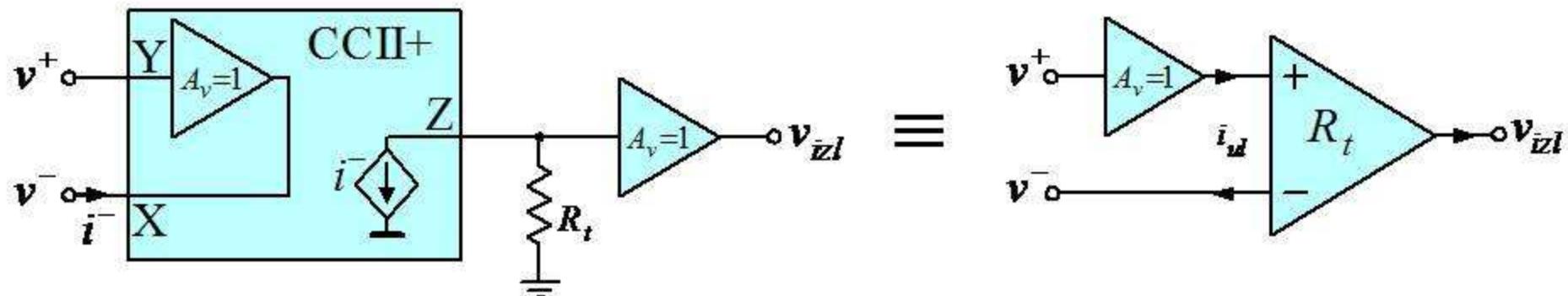


$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix}$$

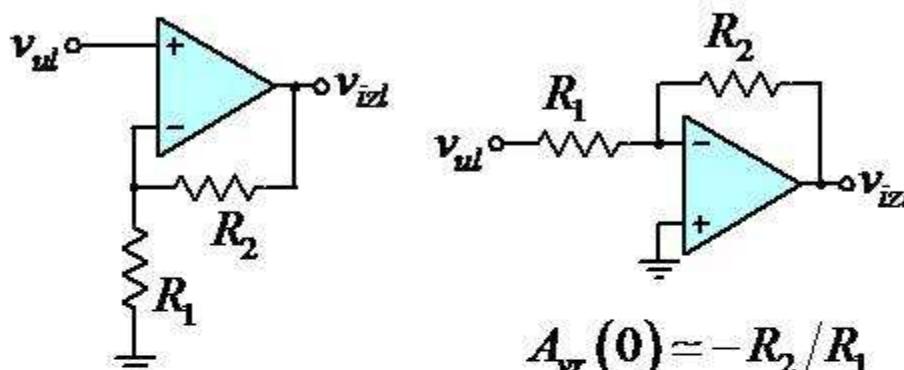


# “Current feedback” operacioni pojačavači

“Current feedback” operacioni pojačavač predstavlja alternativu naponskom operacionom pojačavaču, pogodnu za realizaciju pojačavača sa velikim propusnim opsegom. Sastoji se od transrezistansnog operacionog pojačavača i jediničnog naponskog pojačavača na neinvertujućem ulazu. Karakteriše ga velika ulazna otpornost neinvertujućeg ulaza, mala ulazna otpornost invertujućeg ulaza i velika transrezistansa  $R_t = v_{izl}/i^-$ .



**Topologija osnovnih pojačavačkih kola sa “current feedback” operacionim pojačavačima je ista kao sa standardnim naponskim operacionim pojačavačima:**



**Zbog veoma male ulazne otpornosti invertujućeg priključka, kružno pojačanje ne zavisi od otpornosti  $R_1$  i jednako je  $R_t/R_2$ , gde je  $R_t$  transrezistansa “current feedback” operacionog pojačavača ( $v_{izl}/i$ ). Maksimalan propusni opseg se dobija ako se pojačanje sa povratnom spregom podešava promenom  $R_1$ , a  $R_2$  ima minimalnu vrednost koja obezbeđuje dovoljnu faznu marginu.**

$$R_2 = \text{const} \Rightarrow \text{kružno pojačanje} \neq f(A_{vr}(0)) \Rightarrow \omega_g = \text{const} \neq f(A_{vr}(0))$$

$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 \leftarrow A_v = 1$

$Q_5, Q_6 \leftarrow$  str. ogledalo

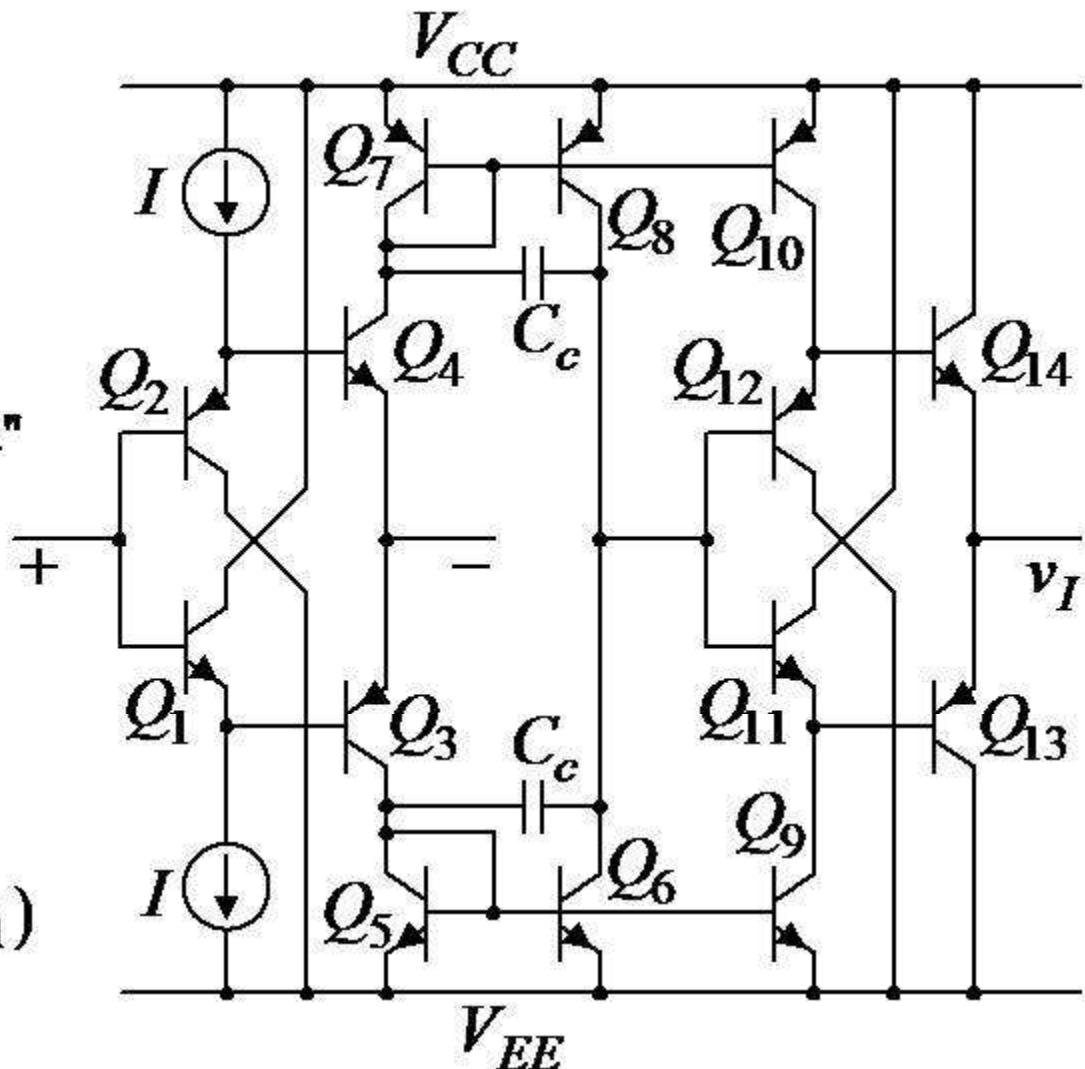
$Q_7, Q_8 \leftarrow$  str. ogledalo

$Q_9, Q_{10} \leftarrow$  "dinam. polarizacija"

$Q_{11}, Q_{12}, Q_{13}, Q_{14} \leftarrow A_v = 1$

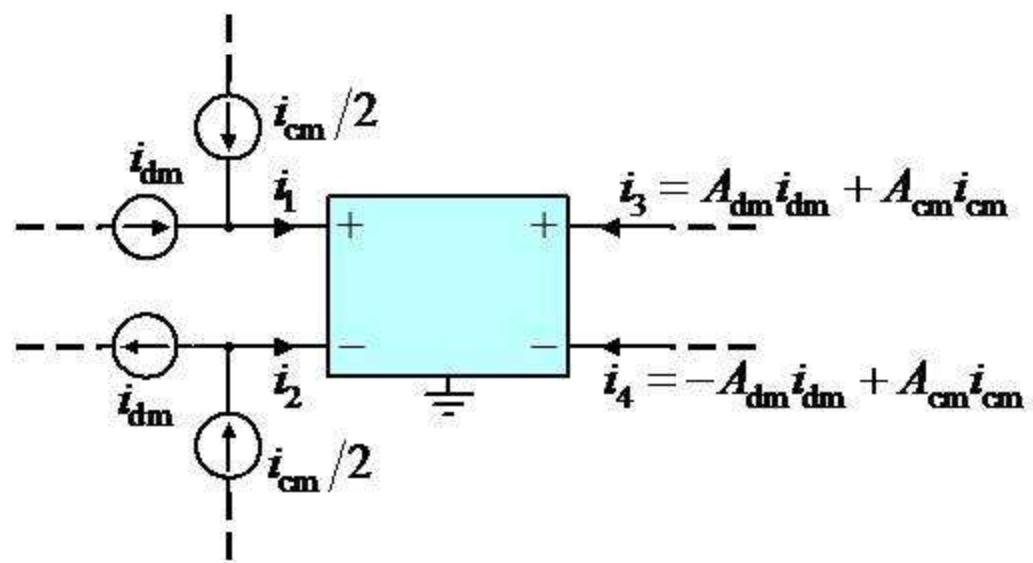
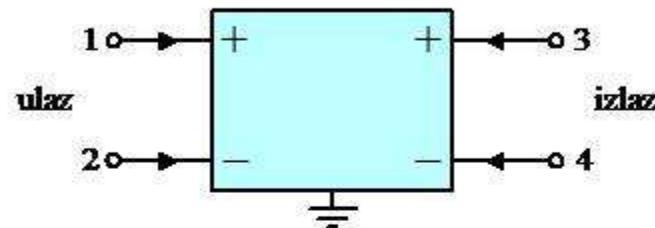
$$\omega_{p\text{dom}} \approx \frac{1}{(r_{ce}/2) \cdot 2C_c} = \frac{1}{R_t C_t}$$

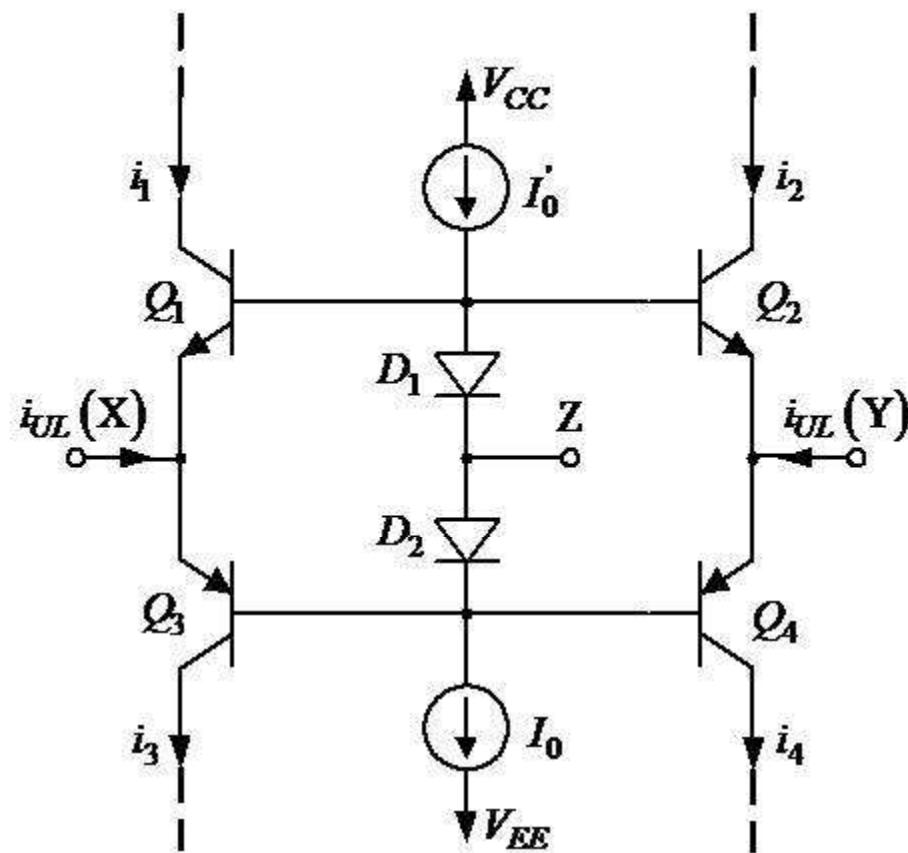
$$\omega_T \approx \omega_{p\text{dom}} \cdot \frac{R_t}{R_2} = \frac{1}{R_2 C_t} \neq f(R_l)$$



**Pošto struja kroz  $C_c$  nije ograničena kao kada je na ulazu OP diferencijalni pojačavač sa strujnim izvorom u emitorima, SR je vrlo veliki (i do 5000 V/μs).**

# Strujni operacioni pojačavači





**Ulagni diferencijalni stepen strujnog pojačavača**

**2 Gilbertove poj.  
ćelije →**

**ulazni diferencijalni stepen →**

**Jedna realizacija strujnog  
operacionog pojačavača**

