

### 3 LINEARNA ELEKTRONSKA VEZJA

#### 3.1 OSNOVNE ZNAČILNOSTI IN RAZVRSTITEV

Za linearna ali analogna vezja je značilno, da se izhodni signal spreminja po linearni ali katerikoli drugačni zvezni funkciji, sorazmerno glede na spremembo (napetosti, toka, frekvence, oblike,...) vhodnega signala. Pri linearnih vezjih se napetosti oz. signali povsod spreminjajo zvezno in lahko zavzamejo katerokoli vrednost v okviru pričakovanih omejitev (npr. glede na napajalno napetost od  $+U_{cc}$  do  $-U_{cc}$ ). Največkrat so osnovni gradniki linearnih vezij operacijski ojačevalniki, ki v najrazličnejših funkcijah in medsebojnih povezavah omogočajo željeno obdelavo vhodnih analognih signalov. V sodobnih analognih integriranih vezjih je zaradi kompleksnosti funkcij, pogostokrat zaslediti tudi komponente digitalnih vezij (vrata, flip-flopi,...), vendar ostaja osnovna funkcija zvezna-linearna. Glede na tehnologijo izdelave lahko ločimo tri skupine analognih vezij.

Monolitna analogna integrirana vezja so najpogosteje izdelana na podlagi iz čistega silicija (*substrat*) s pomočjo fotolitografije, mask, naprevanja in drugih postopkov po katerih so izdelane in povezane tudi posamezne komponente. Le nekatere komponente, ki jih ni možno izdelati na tako malem prostoru (npr. kondenzatorji večjih kapacitivnosti, tuljave, keramični filtri, močnostne komponente ..) je potrebno preko predvidenih priključkov povezati na integrirano vezje.

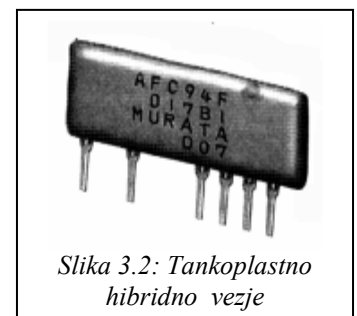


Slika 3.1: Monolitna integrirana vezja

Tehnološki postopki kot so difuzija (dotiranje 3 oz. 5-valentnih primesi), epitaksija (istočasna izdelava kristala Si in dodajanje primesi), metalizacija (naprevanje Al blazinic za priključke), oksidacija (izdelava izolacijskih plasti iz  $SiO_2$ ) in drugi postopki, omogočajo zelo visoko stopnjo integracije, kjer je na izredno koncentriranem prostoru -čip, nameščenih potrebno število komponent. Visoka integracija omogoča monolitnim integriranim vezjem izjemno zmanjšanje prostorskih dimenzij in optimiranje lastnosti (male parazitne kapacitivnosti oz. induktivnosti, nizka poraba, enotno napajanje, malo število zunanjih komponent, veliko število notranjih funkcij,...)

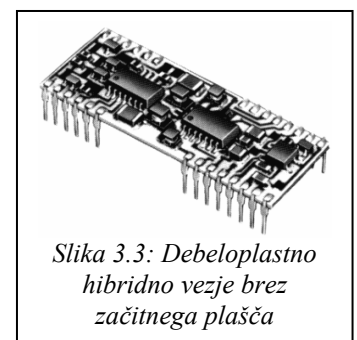
Glede na tehnologijo osnovnih gradnikov (transistorjev), razlikujemo bipolarna in MOS vezja. Za bipolarna integrirana vezja je značilna velika hitrost in večja osnovna poraba (*supply current*), za MOS vezja pa majhna poraba, vendar pa je hitrost običajno nižja. MOS vezja so seveda izjemno občutljiva na elektrostatično napetost in zato imajo na občutljivih vseh večinoma tudi »zasilno« zaščito. Velja omeniti, da je dokazano, da se MOS gradniki po elektrostatičnem šoku, čeprav še delujejo, že deloma okvarijo kar kasneje posledično privede do napačnega delovanja ali uničenja.

Tankoplastna integrirana vezja, predstavljajo bistveno manjšo stopnjo integracije, vendar je potrebna tehnologija izdelave sorazmerno dostopnejša. Na keramično osnovo se s pomočjo naprevanja nanesejo povezave in uporovne strukture, polprevodniške komponente pa se že v obliki čipa (brez ohišja) ali v SMD ohišju namestijo na pripravljena mesta. Po montaži, nastavitvah (justiranju) se struktura prevleče še z zaščitno oblogo. Kot tankoplastna vezja so pogosto narejena vezja za senzorje, merilne pretvornike ali pa namenska vezja v manjših serijah.



Slika 3.2: Tankoplastno hibridno vezje

Debeloplastna integrirana vezja (hibridna vezja), so podobna tankoplastnim, le z razliko, da so povezave, upori in blazinice izdelane z nanašanjem raznih past in s pomočjo ustreznih mask. Ostale komponente (transistorji, kondenzatorji,...) so v diskretni obliki, prilepljene na pripadajoče blazinice in s pomočjo spajkanja (*reflow*) povezane na ostalo vezje. Vezje je ponavadi zalito s primerno zalivno maso (npr. araldit, silikon,..) v primerno ohišje (npr. elektronski modul vrtalnega stroja, regulator napetosti pri avtomobilu,...). Debeloplastna in tankoplastna vezja zaradi močnega prodora SMD tehnologije in velikega števila razpoložljivih SMD komponent izgubljajo svoj pomen.

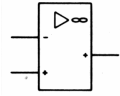


Slika 3.3: Debeloplastno hibridno vezje brez zaščitnega plašča

Eden izmed glavnih gradnikov analognega elektronskega vezja je operacijski ojačevalnik, ki lahko s pomočjo ustreznih povratnih vezav izvaja različne matematične operacije, funkcije in druge zakonitosti, potrebne pri obdelavi signalov. Zato je razumevanje operacijskega ojačevalnika, kot tipičnega predstavnika linearnih vezij, bistvenega pomena za razumevanje ostalih analognih vezij.

### 3.2 OPERACIJSKI OJAČEVALNIK

Operacijski ojačevalniki predstavljajo osnovno linearno vezje, ki je lahko izvedeno v obliki posameznega integriranega vezja ali pa je vključeno v kompleksnejše integrirano obliko, kjer opravlja v naprej določeno funkcijo.



Operacijski ojačevalniki se razlikujejo glede na namen uporabe, vendar pa je vsem skupno, da imajo invertirajoči in neinvertirajoči vhod, ter eden izhod. Napajalni pogoji, kontrolni in pomožni vhodi, frekvenčna kompenzacija, ojačevalni faktor, SR faktor, vhodna in izhodna impedenca in drugi parametri so specifični glede na izvedbo in predviden namen uporabe.

V splošnem pa so za realen operacijski ojačevalnik značilnejše sledeče zahteve:

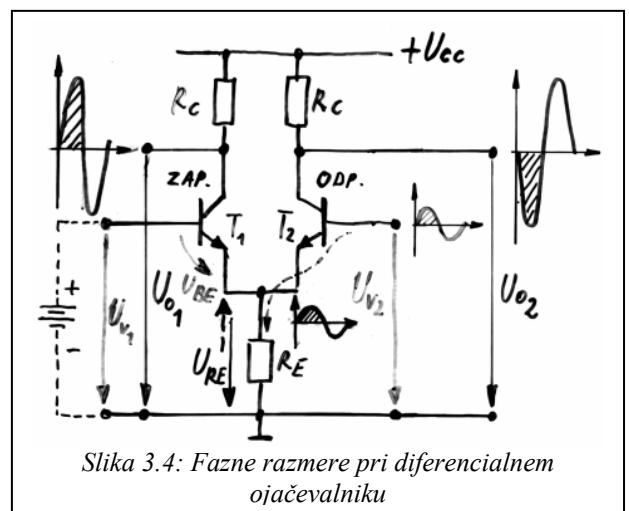
- ✓ Zelo veliko napetostno ojačanje diferencialnega signala ( $A_0 > 100000$ ).
- ✓ Zelo malo ojačanje sofaznega signala.
- ✓ Zelo visoka vhodna upornost. (nekaj  $M\Omega$ )
- ✓ Zelo nizka izhodna upornost. (nekaj  $\Omega$ )
- ✓ Ojačanje enosmernih in izmeničnih signalov.
- ✓ Invertiranje ali neinvertiranje vhodnega signala.
- ✓ Visoka tranzitna frekvenca
- ✓ Visok faktor rejekcije signalov CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*)
- ✓ Visok faktor sledenja izhodne napetosti SR (*Slew Rate*)

$$CMRR = 20 \cdot \log \frac{A_D}{A_S}$$

Za doseganje teh zahtev ima bistveno vlogo na vhodu nameščen diferencialni ojačevalnik, kateri pa določa tudi vrsto vhodov. Glede na vrsto vhodnih tranzistorjev razlikujemo operacijske ojačevalnike z bipolarnimi, J-FET in MOSFET vhodi, kar posledično pomeni različne lastnosti vhodov. Izhodi so lahko v obliki Push-Pull vezja, z odprtim kolektorjem (OC), z vgrajeno pretokovno oz. kratkostično zaščito ali brez nje, lahko delujejo v impulznem režimu (npr. frekvenčni izhod, PWM izhod,...).

#### Diferencialni ojačevalnik

Diferencialni ojačevalnik sestavljata dva vzporedna NPN ali PNP tranzistorska tokokroga, ki sta v emitorskem delu povezana. Na ta način je doseženo, da povečanje toka (odpiranje tranzistorja) v eni veji, povzroči zmanjšanje toka (zapiranje nasprotnega tranzistorja) v nasprotni veji ob pogoju, da ima tranzistor v tej veji naspremenjen bazni tok- ojačanje diferencialnega signala je zelo veliko. V primeru sočasne in enake spremembe baznega toka tranzistorjev v obeh vejah, se za faktor  $\beta$  vendar enako v obeh vejah, spremenita tudi kolektorska tokova. Posledica je, da v tem primeru ni spremembe (realno je minimalna) potencialne razlike med kolektorjema obeh tranzistorjev- ojačanje sofaznega signala je torej minimalno.



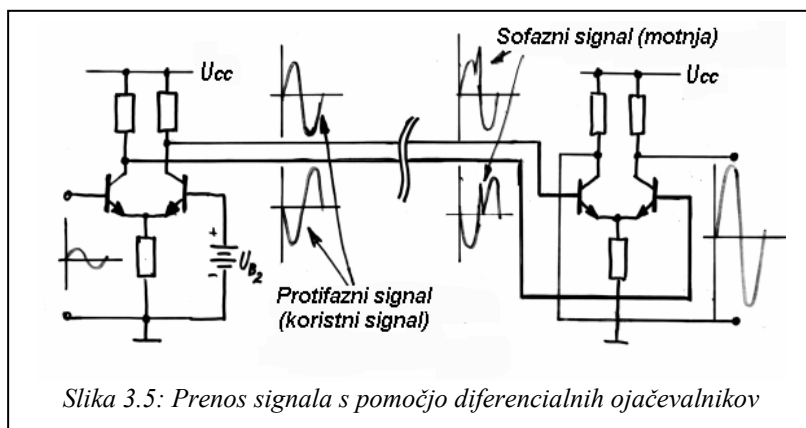
Slika 3.4: Fazne razmere pri diferencialnem ojačevalniku

V praksi lahko rečemo, da predstavljajo temperaturne spremembe napetosti  $U_{BE}$ , nihanje napajalne napetosti (brum,..) ali enake motnje na obeh vhodih sofazni signal, ki ga diferencialni ojačevalnik skoraj ne ojačuje, medtem ko močno ojačuje koristni (diferenčni) signal. Zaradi potrebe po enakem iznosu sprememb v obeh vejah, morajo imeti tranzistorji v obeh vejah čim bolj izenačene karakteristike (uparjeni). Fino nastavitvev pa je mogoče doseči tudi s pripadajočim trimmerjem v emitorskem tokokrogu. Še boljše učinke dosežemo, če v emitorskem tokokrogu nadomestimo upor  $R_E$

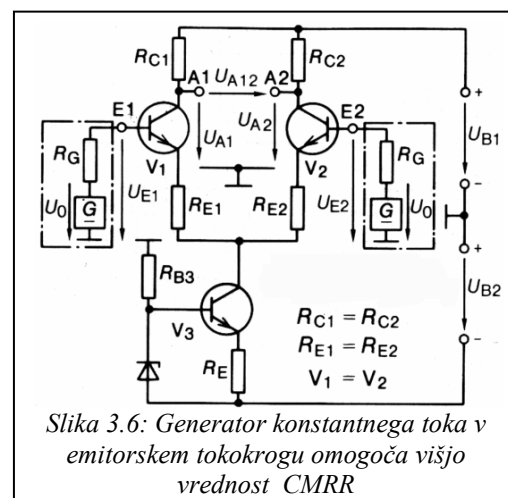
s tokovnim generatorjem. V tem primeru je ojačanje sofaznega signala odvisno le še od toleranc tranzistorjev, kar zviša razmerje med ojačanjem diferenčnega in sofaznega signala na 100dB.

Diferencialni ojačevalnik ima zaradi teh lastnosti veliko prednost, saj omogoča kljub prisotnosti motenj, ojačanje zelo šibkih signalov. V praksi je take vrste signal npr. signal iz dinamičnega mikrofona (nekaj mV), ki se mu v kablu pripojijo sofazne motnje, ki pa jih diferencialni ojačevalnik skorajda ne ojači.

Pogostokrat je prenos signalov izveden po diferencialnem načinu tudi zaradi enostavnejših povezav (npr. parice).



Slika 3.5: Prenos signala s pomočjo diferencialnih ojačevalnikov



Slika 3.6: Generator konstantnega toka v emitorskem tokokrogu omogoča višjo vrednost CMRR

### Delovanje operacijskega ojačevalnika

Za operacijski ojačevalnik lahko zapišemo dve pravili, s pomočjo katerih lahko vedno presojava pravilnost delovanja. Pravili opisujeta osnovna dejstva, ki veljajo za katerikoli izmed številnih vezav, ki jih z operacijskimi ojačevalniki lahko realiziramo in sta pri analizi delovanja nujni. (<http://www.williamson-labs.com>)

## Z E L O P O M E M B N O!

### 1.PRAVILO

Operacijski ojačevalnik bo **glede na razliko in polariteto** napetostnih potencialov na vseh vhodih, zavzel na izhodu tak napetostni potencial (pozitiven oz. negativen), da bo preko negativne povratne vezave vplival nazaj na invertirajoči (-) vhod, da se njegov potencial **izenači** s potencialom neinvertirajočega (+). To pomeni, da sta v »normalnih pogojih« delovanja oba vhoda na izenačenih potencialih. Napetostna razlika med vodomoma je v tem primeru minimalna in jo v praksi lahko večinoma zanemarimo.

V primeru, da doseženi potencial na izhodu (npr. omejitev zaradi prenizke napajalne napetosti) **ne zadostuje za izenačitev obeh vhodnih potencialov**, ostane med vodomoma sorazmerna (večja ali manjša) napetostna razlika. V takem slučaju zavzame izhod napetostni potencial, ki je v danih pogojih maksimalno mogoč. To je lahko katerikoli potencial med  $-U_{nap} + U_{sat}$  do  $+U_{nap} - U_{sat}$  (*rail to rail*), kar je odvisno od vrste operacijskega ojačevalnika. Vhodni tok je izjemno mali (npr. za LF411 je 0,2 nA) in ga pri izračunu vezja lahko večinoma zanemarimo.

### 2.PRAVILO

**Prvo pravilo ne velja, če sta vhoda zamenjana.** To pomeni, da je povratna vezava pozitivna in bi lahko rekli, da operacijski ojačevalnik »izenačuje« vhodni potencial v »napačno smer«. V tem primeru **deluje operacijski ojačevalnik kot primerjalnik vhodnih potencialov** in na izhodu zavzame skrajni možen potencial, odvisen od polariteto napetostne razlike med vodomoma. Izhod torej zavzame eno od obeh skrajnih vrednosti ( pozitivno:  $+U_{nap} - U_{sat}$  oz. negativno:  $-U_{nap} + U_{sat}$ ).

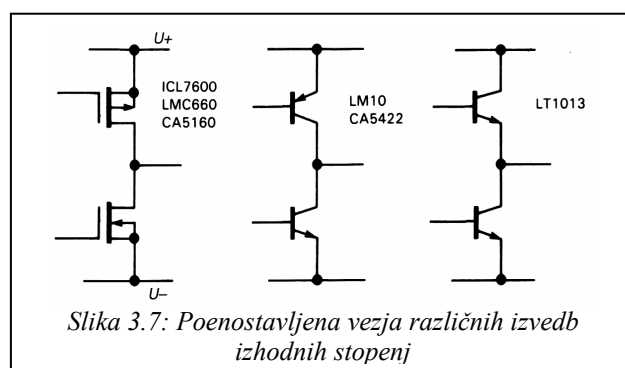
### 3.2.1 NAPAJANJE OPERACIJSKEGA OJAČEVALNIKA

**Simetrično napajanje** (*offset napajanje*) s pozitivno in negativno napetostjo enake velikosti, zahteva velika večina standardnih operacijskih ojačevalnikov, kar pomeni, da je optimalna nastavitvev delovne točke pri 0V (*referenčni potencial-masa*). Seveda je možna nastavitvev delovne točke tudi pri katerem drugem referenčnem potencialu (odmik od referenčnega potenciala 0V), vendar je to odvisno od posameznega tipa operacijskega ojačevalnika. Za nekatere tipe (npr. LM741) to pomeni le nekaj voltov, za druge (npr. TLxxx serija) pa je nastavitvev možna skoraj v celotnem obsegu napajalne napetosti. Večino teh operacijskih ojačevalnikov je možno priključiti tudi na enojno napajanje, pri čemer je potrebno poudariti, da je potem potencial delovne točke (referenčni potencial) običajno pri polovični vrednosti napajalne napetosti. To je potrebno dodatno zagotoviti, npr. z napetostnim delilnikom. Tega načina se zaradi dodatnih problemov in omejitev v praksi izogibamo, oz. v tem primeru je bolje izbrati operacijski ojačevalnik, ki je predviden za asimetrično napajanje.

**Asimetrično napajanje** (*single supply*) omogočajo le nekatere izvedbe operacijskih ojačevalnikov, ki so namenjene za razmere brez negativne napajalne napetosti (npr. baterijsko napajanje, napajanje elektronskega vezja v senzorjih, daljinsko napajanje,...). Tovrstni operacijski ojačevalniki imajo pogosto minimalno porabo energije, na izhodu pa tranzistor z odprtim kolektorjem.

#### Izhodnja stopnja operacijskega ojačevalnika

Glede na lastnosti (hitrost, obremenitev,...) imajo operacijski ojačevalniki različne izvedbe izhodne stopenj. Nekatere izhodne stopnje imajo vgrajeno tudi kratkostično zaščito, ki omejuje izhodni tok na še dovoljen nivo (npr. LM 741). V nekaterih primerih je na izhodu samo tranzistor z odprtim kolektorjem, ki omogoča različno napajanje operacijskega ojačevalnika in bremena.

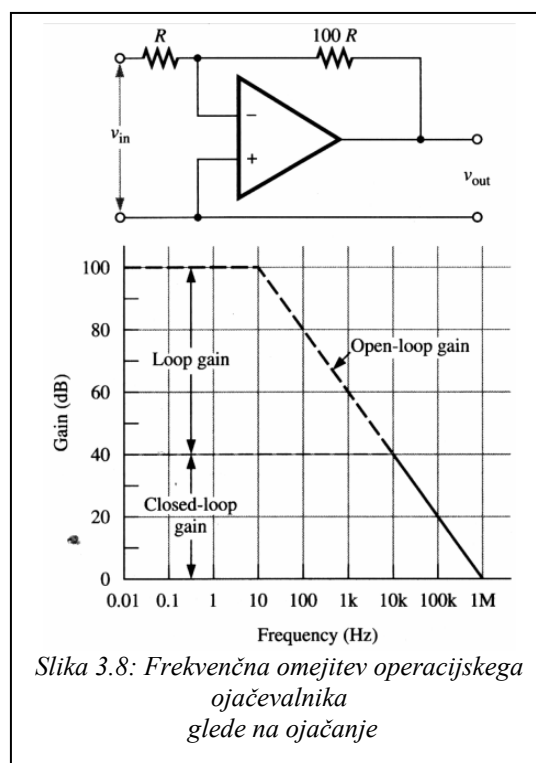


Slika 3.7: Poenostavljena vezja različnih izvedb izhodnih stopenj

### 3.2.2 ZNAČILNI PARAMETRI IN KARAKTERISTIKE

**Ojačanje** realnega operacijskega ojačevalnika  $A_0$  (brez povratne vezave) je zelo veliko (100 000 in več) vendar se pri ojačevalniških vezjih v praksi uporablja dosti manjše ojačanje, ker je s tem zagotovljena dosti višja frekvenčna meja. Za večino operacijskih ojačevalnikov velja, da je produkt ojačanja in pasovne širine (zgornja frekvenčna meja) konstantna vrednost ( $gain \cdot bandwidth = GBW = konst.$ ).

Sorazmerno upadanju ojačanja se spreminjajo tudi fazne razmere med vhodno in izhodno napetostjo. Praviloma velja, da je pri mejni frekvenci (-3dB) tudi faza že spremenjena za  $45^\circ$  (glede na fazne razmere v izhodišču - najnižja frekvenca). Pri primerjalniku in podobnih vezjih, kjer je zahtevano zelo velik ojačevalni faktor, ojačanje ostane na nivoju  $A_0$  ali pa ga s pozitivno povratno zvezo še povečamo, da je prehod izhodnega signala iz enega v drugo stabilno stanje čim hitrejši.



Slika 3.8: Frekvenčna omejitev operacijskega ojačevalnika glede na ojačanje

**Izhodna impedanca**

Klub temu, da je izhodna impedanca mala, vpliva na spremembo izhodne napetosti pri spremembi izhodnega toka (obremenitev). Odvisnost lahko zapišemo z izrazom:

$$\Delta V_{out} = \Delta I_{out} Z_{out}$$

Sprememba izhodne napetosti  $\Delta V_{out}$  (zaradi izhodne impedance) pa vpliva tudi nazaj na vhod, kjer sorazmerno povečuje »potrebno« napetostno razliko med vhodoma. V primeru večjih izhodnih tokov ta razlika ni več zanemarljiva, temveč jo moramo pri natančnejšem izračunu upoštevati z izrazom:  $\Delta V_S = -\Delta V_{out} / A$

Glede na dejansko izhodno napetost  $V'_{out}$  lahko zapišemo izraz za izhodno impedanco ob upoštevanju vpliva povratne vezave:

$$Z_{Cout.} = \Delta V'_{out} / \Delta I_{out} = \Delta V_S / \Delta I_{out}$$

Če upoštevamo izraz za spremembo vhodne napetosti zaradi izhodne obremenitve in ga vstavimo v gornji izraz dobimo odvisnost izhodne impedance od ojačanja:

$$Z_{Cout.} = (\Delta V_{out} / A)(Z_{out} / \Delta V_{out}) = Z_{out} / A$$

To pomeni, da zmanjšanje ojačanja povzroči tudi sorazmerno znižanje izhodne impedance. Tipična vrednost  $Z_{out}$  (Open Loop) znaša nekaj k $\Omega$ , v primeru direktne povezave izhod/vhod (napetostni sledilnik) pa na 0.05 $\Omega$ . Pogostokrat lahko zaradi optimalne obremenitve (do 20mA) izhodno impedanco zanemarimo, za večje izhodne tokove pa je nujen dodatni tokovni ojačevalnik.

**Vhodna impedanca**

Tudi vhodna impedanca je odvisna od ojačanja. Sprememba izhodne napetosti  $\Delta V_{out}$ , povzroči spremembo napetosti v točki seštevanja vhodne in izhodne napetosti (npr. za napetostni sledilnik):

$$\Delta V_S = \Delta V_{out} / A = \Delta V_{in} / A_0$$

Sprememba napetosti na vhodu povzroči tudi spremembo toka na vhodu:

$$\Delta I_{in} = \Delta V_S / Z_{in} = \Delta V_{in} / A_0 Z_{in}$$

Impedanco »zaprte zanke«  $Z_{Cin}$  potem lahko izračunamo kot:

$$Z_{Cin} = \Delta V_{in} / \Delta I_{in}$$

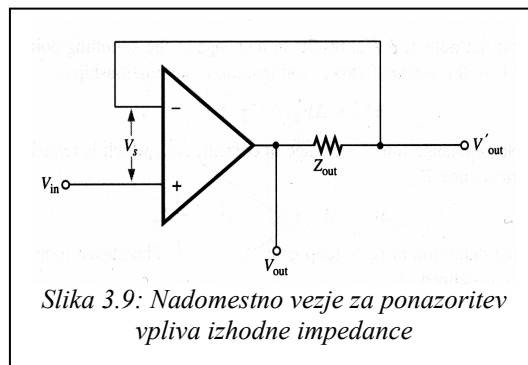
in po vstavitvi izraza za spremembo toka dobimo:  $Z_{Cin} = \Delta V_{in} A_0 / \Delta I_{in} Z_{in} / \Delta V_{in} = A_0 Z_{in}$

To pomeni, da je vhodna impedanca v primeru zaprte zanke večja za faktor ojačanja, v primerjavi z odprto zanko. V praksi ima bipolarni operacijski ojačevalnik v primeru odprte zanke  $Z_{in}$  okrog 50M $\Omega$ . Pri ojačanju 100000 (100dB) v tem primeru  $Z_{in}$  naraste kar na 10<sup>12</sup> $\Omega$ , pri operacijskem ojačevalniku s FET vhodi pa še več. Pogosto je ta impedanca dosti višja od zunanjih upornosti, zato pri izračunu zanemarimo vhodni tok in smatramo, da sta oba vhoda na istem potencialu.

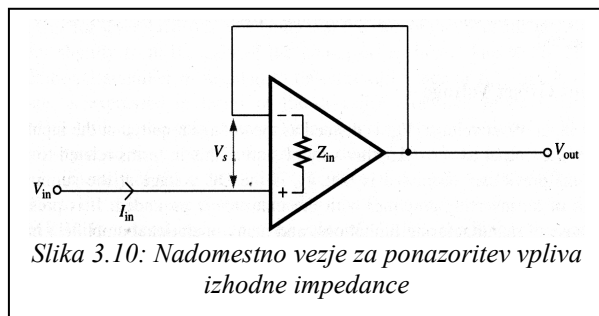
Vhodna impedanca napetostnega sledilnika je najvišja med vsemi vezavami, za napetostni inverter pa velja, da je enaka kar nadomestni upornosti na invertiranem vhodu.

**Vhodni tokovi (Input Bias, Offset current)**

Kljub velikim vhodnim upornostim pa moramo v zahtevnejših primerih posvetiti tudi pozornost vhodnim tokovom  $I_b$  (bias) in toku med obema vhodoma  $I_{offset}$ . Tok  $I_b$  je definiran kot maksimalni tok, ki je potreben na vsakem od vhodov, da zavzame izhod v tem primeru napetostni potencial 0V. Pogosto se ta tokova podajata kot povprečni tok za invertirani in neinvertirani vhod. Tipične vrednosti so od nekaj nA do nekaj pA, vendar jih moramo upoštevati le v primeru nizkih tokovnih oz. napetostnih



Slika 3.9: Nadomestno vezje za ponazoritev vpliva izhodne impedance



Slika 3.10: Nadomestno vezje za ponazoritev vpliva izhodne impedance

signalov na vhodu. Pri novejših operacijskih ojačevalnikih jih lahko večinoma zanemarimo (npr. serija TLxxx).

### Preostala napetost vhoda (Input Offset voltage)

Preostala napetost  $V_{OS}$  je definirana kot tista napetost, ki je dotatno potrebna med obema vhodoma, da potencial na izhodu izenačimo s potencialom na »referenčnem« vходу (npr. 0V) seveda ob pogoju, da ni nobenega zunanega signala. To pomeni »fino nastavitev« izhodiščnega potenciala na izhodu. Nekateri operacijski ojačevalniki imajo predvidene posebne vhode za zunanjo kompenzacijo preostale napetosti kar je potrebno npr. pri ojačevalnikih enosmerne napetosti. Pri operacijskih ojačevalnikih, ki pa teh vhodov nimajo, pa je možna tudi kompenzacija s pomočjo dodatne enosmerne napetosti preko invertiranega oz. neinvertiranega vhoda.

### CMRR (Common Mode Rejection ratio)

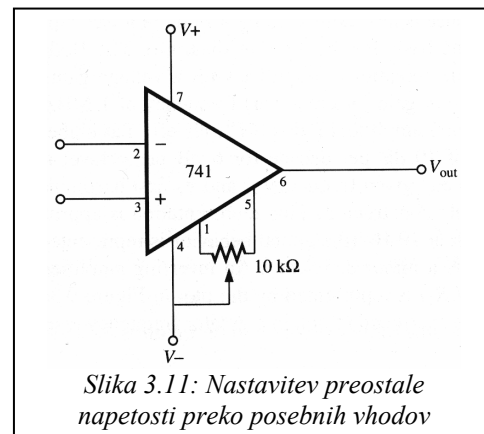
Razmerje med ojačanjem diferenčnega in ojačanjem sofaznega signala podaja faktor CMRR v dB. V idealnem slučaju želimo, da se napetost na izhodu ne bo spremenila (npr. 0V), če se bo potencial na obeh vhodih spreminjal enako in istočasno. Vendar se pri realnih operacijskih ojačevalnikih sofazno ojačanje lahko spreminja glede na nivo vhodne napetosti, kar moramo v nekaterih primerih upoštevati (npr. merilni ojačevalniki za enosmerne napetosti, regulatorji,...). Običajno je sofazno ojačanje 1, kar pomeni, da izhod zavzame isti potencial kot je trenutno na obeh vhodih (brez diferenčnega signala).

### Hitrost sledenja izhodne napetosti (Slew Rate)

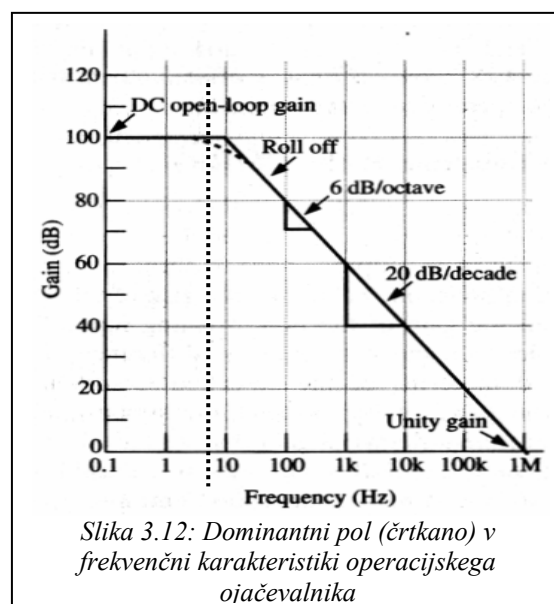
Parameter *Slew Rate* (v nadaljevanju *SR*) je merilo za hitrost sledenja izhodne napetosti spremembam napetosti na vhodu in se podaja v  $V/\mu s$ . V vezjih, kjer so zahteve po veliki hitrosti (pravokotni impulzi, digitalni signali,..) je potrebno uporabiti operacijske ojačevalnike z dovolj visoko vrednostjo *SR*. Za navadne operacijske ojačevalnike je *SR* med  $5 V/\mu s$  (LM741) in  $20 V/\mu s$  (TL 081), pri hitrejših znaša  $100 V/\mu s$ , specialne izvedbe pa dosežejo tudi  $6000 V/\mu s$  (LH0063C).

### Frekvenčna karakteristika

Višji *SR* omogoča praviloma tudi večji frekvenčni razpon operacijskega ojačevalnika. Frekvenčni razpon je definiran kot območje konstantnega ojačanja pri čemer smatramo, da je frekvenčna meja tam, kjer pade ojačanje za -3dB ( $0.707 \cdot A_U \rightarrow$  takrat pade moč na polovično vrednost). Zaradi enosmernih povezav omejitve spodnje frekvenčne meje seveda ni, zgornja frekvenčna meja je odvisna od velikosti ojačanja in vrste operacijskega ojačevalnika. Razlikujemo nekompenzirane operacijske ojačevalnike in tiste z vgrajeno frekvenčno kompenzacijo (npr. LM 741). Nekompenzirani imajo praviloma višji frekvenčni razpon, katerega pa lahko znižamo z zunanjo negativno frekvenčno odvisno povratno vezavo (npr. LF355). Najnižjo frekvenco, pri kateri ojačanje  $A_0$  že upade za -3dB, imenujemo **dominantni pol** (prekinjena črta na levi sliki).



Slika 3.11: Nastavitev preostale napetosti preko posebnih vhodov



Slika 3.12: Dominantni pol (črtkano) v frekvenčni karakteristiki operacijskega ojačevalnika

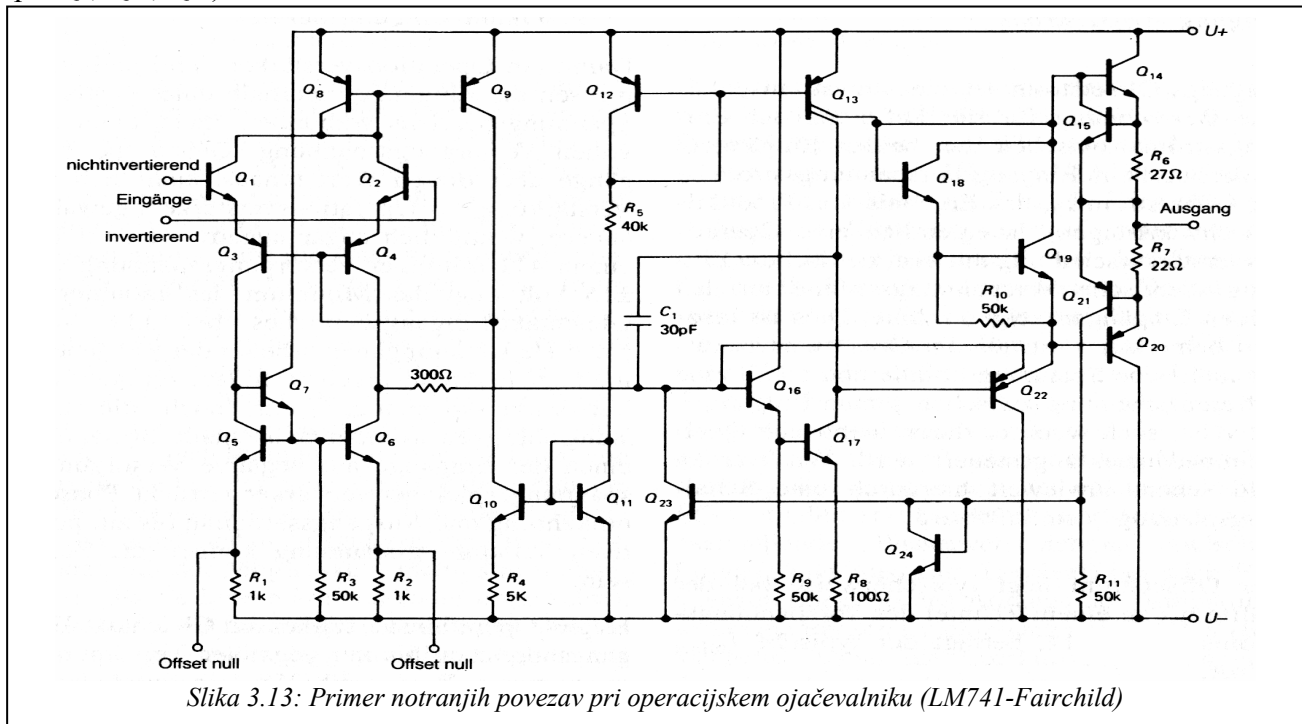
Višje od frekvence dominantnega pola ojačanje upada s tipično vrednostjo 20dB/dekado, kar pomeni isto strmino kot 6 dB/oktavo. Iz frekvenčnega diagrama lahko enostavno razberemo frekvenčno mejo ob izbranem ojačanju, vendar je karakteristika zanimiva samo do točke, kjer je **tranzitna frekvenca** – *unity gain* ( $A_U = 0\text{dB}$ ), kajti višje je samo še slabljenje vhodnega signala.

**Drift**

Drift pomeni spreminjanje napetosti in tokov na izhodu zaradi temperaturnih sprememb. Pri operacijskih ojačevalnikih znaša  $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  oz.  $1\text{nA}/^\circ\text{C}$  ali manj, kar je potrebno upoštevati pri ojačevalnikih za enosmerne napetosti oz. izbrati primerne operacijske ojačevalnike z minimalnim driftom. Pojav je npr. pogostokrat opažen pri vhodnih ojačevalnikih osciloskopov, kjer se nivo žarka odmika od nastavljenega dokler ni doseženo temperaturno ravnovesje

**3.2.3 NOTRANJA ZGRADBA**

Iz sheme notranjih povezav operacijskega ojačevalnika, ki je vzeta za primer je razviden diferencialni ojačevalnik ( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ ) z vhodi za kompenzacijo preostale napetosti (offset null). Kondenzator  $C_1$  je namenjen frekvenčni omejitvi, ker je ta tip ojačevalnika že kompenziran. Izhodna stopnja je opremljena s kratkostično zaščito, ki jo predstavljata  $Q_{15}, Q_{21}$ , katera zasledujeta padec napetosti na uporih  $R_6$  in  $R_7$ . Potrebne diode so izvedene kot tranzistorji, ki imajo bazo in kolektor kratko sklenjena (npr.  $Q_8, Q_{11}, Q_{24}$ ).



**3.2.4 NADOMESTNO VEZJE**

Za potrebe računalniških simulacij se uporablja model nadomestnega vezja, ki zajema najbistvenejše značilnosti operacijskega ojačevalnika. V nadomestnem vezju je ponazorjena samo povezava posameznih impedanc in ojačevalnega faktorja, medtem ko so druge odvisnosti (napajalna napetost, frekvenčna in fazna karakteristika, slew rate,...) podane zraven nadomestnega vezja kot omejitvene veličine.

$Z_{1C}$  ----impedanca, ki jo čuti sofazni vhodni signal

$Z_{1D}$  ----impedanca, ki jo čuti diferenčni vhodni signal

$Z_0$  ----izhodna impedanca op. ojačevalnika

$A_{UDO}$  -napetostno ojačanje diferenčnega signala pri neobremenjenem izhodu.

