

4 KOMBINIRANA INTEGRIRANA VEZJA

4.1 VRSTE KOMBINIRANIH VEZIJ IN ZNAČILNOSTI

Za kombinirana vezja je značilno, da so sestavljena iz analognih in digitalnih komponent in posledično so vhodni oz. izhodni signali analogni oz. digitalni. Prav tako se tudi signali v notranjosti vezja spreminjajo glede na pripadajočo strukturo vezja. Kombinirana vezja (*mixed signal IC*) so večinoma namenska vezja za specifične funkcije, operacije, pretvorbe in obdelave signalov. Med številnimi nalogami, ki jih ta vezja opravljajo lahko izpostavimo najznačilnejše skupine:

- DAC...digitalno - analogni (DA) pretvorniki
- ADC... analogno - digitalni (AD) pretvorniki
- Pretvorniki signalov (U/f, f/U, ...).
- Vezja za prenos signalov (ločilni ojačevalniki, linijski gonilniki, optični vmesniki,...)
- Vezja za vzorčenje signalov (*SH-Sample and Hold*).
- Vezja za digitalno krmiljenje analognih signalov (*analog switches*).
- Vezja za posebne namene (senzorika, funkcijski generatorji, napajalniki, krmiljenje koračnih motorjev,...).

Glede na to, da so nekatere skupine zelo obširne in specifične, bomo tematiko omejili le na tiste, ki jih najpogosteje srečujemo v elektronskih vezjih. Med te zagotovo sodijo D/A in A/D pretvorniki.

4.2 ZNAČILNOSTI A/D IN D/A PRETVORNIKOV

A/D in D/A pretvorniki imajo v sodobnih elektronskih vezjih zelo pomembno funkcijo, saj zunanje signale, ki so v okolju pretežno analogni (npr. temperatura in ostale zvezno se spreminjajoče veličine) pretvarjajo v digitalno obliko, katera je z današnjimi elektronskimi vezji bolj primerna za kvalitetno obdelavo (procesiranje), arhiviranje in seveda za matematične operacije. Izhodni signali pogosto ostanejo v digitalni obliki (npr. številčni prikaz, diskretni krmilni signali, prikaz na zaslonu,...) ali pa jih je potrebno ponovno pretvoriti v analogno obliko.

Pri pretvarjanju je poleg natančnosti pretvorbe pogostokrat zelo pomembna hitrost pretvorbe, upoštevati pa je potrebno tudi stranske učinke (harmonska popačenja, frekvenčna omejitvev, način kodiranja, občutljivost na motnje,...). Glede na to lahko definiramo najznačilnejše parametre za A/D in D/A pretvornike:

- Natančnost pretvorbe (število bitov-resolucija).
- Linearnost pretvorbe (*linearity error*).
- Hitrost pretvorbe (*conversion time*).
- Hitrost vzorčenja signala (*sampling rate*).
- Harmonska popačenja (*harmonic distortion*).
- Način delovanja pretvorbe.
- Vrsta vhoda oz. izhoda (tokovni, napetostni, paralelni, serijski,...).
- Povezljivost z mikroprocesorjem.

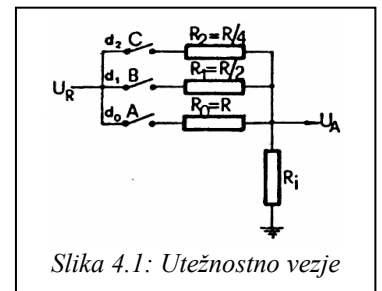
Pretvorba signalov iz analogne v digitalno obliko in obratno je možna na več načinov, vendar je glede na zahtevane kriterije, potrebno izbrati primerne. V primeru zahtevnejše pretvorbe (npr. visoka resolucija, velika hitrost in linearnost) izpolnjujejo pogoje le namenski A/D oz. D/A pretvorniki kot monolitno integrirano vezje. Za počasno spreminjajoče se signale in pri mikroprocesorskem vezju lahko uporabimo funkcijo A/D oz. D/A pretvorbe, ki je že vgrajena v nekatere vrste mikroprocesorjev. V primeru potrebe po pretvorbi analognih signalov iz procesnega okolja lahko uporabimo primerne prosto programirljive krmilnike z analognimi vhodi oz. izhodi (DC izvedba). Pri teh krmilnikih je pogosto možno programsko nastavljati nekatere parametre vgrajenega A/D pretvornika. Pogostokrat je A/D pretvornik v povezavi z analognim multipleksorjem, kar omogoča postopno pretvorbo več multipleksiranih signalov s samo enim pretvornikom.

4.3 DIGITALNO ANALOGNI PRETVORNIKI - DAC

Digitalno-analogni pretvorniki delujejo na osnovi povezovanja skupine ustreznih uporov, ki se povezujejo v odvisnosti od binarne kombinacije digitalnega podatka. Upori določajo »bitno utežene« tokovne prispevke, katerih vsota ustvarja na izhodnem uporu pripadajoči padec napetosti – analogno vrednost. Upori se priključujejo na referenčno napetost pripadajoče glede na digitalni podatek in s tem prispevajo »utežen« delež toka, ki teče skozi upor na izhodu. V odvisnosti od digitalnega podatka se na izhodu pojavljajo diskretne vrednosti napetosti. Vključevanje posameznih uporov je izvedeno s pomočjo stikalnih tranzistorjev, katere krmilijo pripadajoči biti glede na velikost podatka. Upori vezja morajo biti preračunani tako, da se bo ob vsaki vrednosti digitalnega podatka na izhodu pojavila pripadajoča analogna napetost ter, da bo zagotovljena željena linearnost (enaka višina spremembe napetosti - stopničke) na izhodu v celotnem območju pretvorbe. Obstaja več izvedb D/A pretvornikov, najznačilnejši sta dve: ena temelji na utežnostnem in druga na lestvičastem vezju.

4.3.1 D/A PRETVORNIK NA OSNOVI UTEŽNOSTNEGA VEZJA

Za to vezje je značilno, da je vrednost vsakega upora definirana sorazmerno na njegov utežnostni položaj v vezju. Na sliki 4.1 je poenostavljena vezava utežnostnega vezja za tri bite (zgolj za razumevanje). Sosednji upori se med sabo razlikujejo za polovične vrednosti, kar pomeni tokovno gledano dvakratno vrednost. Glede na to bo najmanj uteženi bit podatka »priključil« upor z najvišjo upornostjo (najmanjši tokovni prispevek) in obratno najbolj uteženi bit upor z najnižjo upornostjo (največji tokovni prispevek).



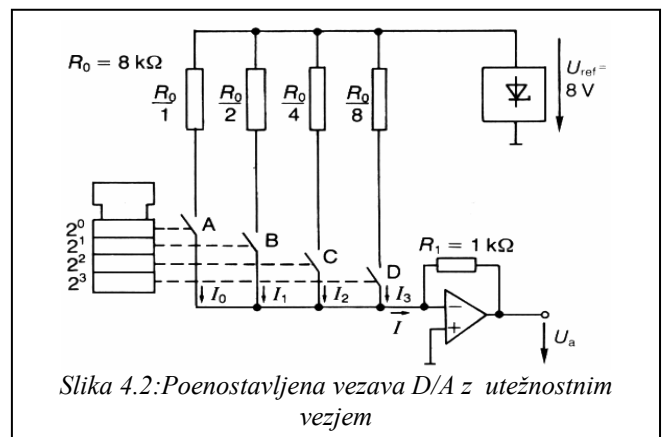
Slika 4.1: Utežnostno vezje

Slabost take vezave je v izrednem razponu upornosti, ki jih zahteva večbitna izvedba (npr. za 10 bitov je potreben razpon upornosti 1:512), kar povzroča težave (različni upori, visoka cena).

V praksi se ta način malo uporablja, vendar je primeren za lažje razumevanje ostalih načinov. Upor Ri mora biti dosti manjši od najnižje vrednosti utežnostnih uporov in takrat velja izraz:

$$I = d_0 \frac{U_R}{R_0} + d_1 \frac{U_R}{R_1} + d_2 \frac{U_R}{R_2}$$

Tok I povzroči na uporu Ri padec napetosti, ki ga izračunamo po izrazu:
UR.....referenčna napetost

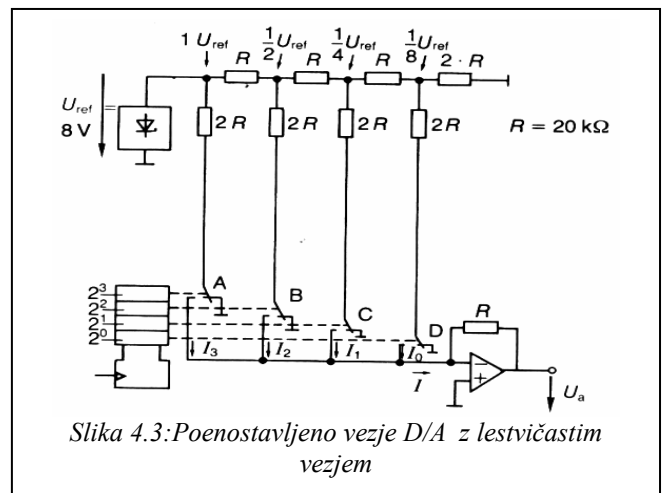


Slika 4.2: Poenostavljena vezava D/A z utežnostnim vezjem

$$U_A = \frac{R_i \cdot U_R}{R} (2^0 \cdot d_0 + 2^1 \cdot d_1 + 2^2 \cdot d_2)$$

4.3.2 D/A PRETVORNIK NA OSNOVI LESTVIČASTEGA VEZJA

Za lestvičasto vezje je značilno, da je zgrajeno iz uporov samo dveh vrednosti, kar omogoča poenostavitve, pocenitev in razširitve do največjih resolucij. Referenčna napetost mora biti v obeh primerih primerno izbrana tako, da pri največjem podatku ne pride do nelinearnosti. Referenčna napetost mora biti zelo stabilna za kar poskrbi interni stabilizator ali pa zunanji izvor referenčne napetosti (npr.: TL431C – 2,5-36V; 30ppm/°C). Hitrost D/A pretvorbe je velika in je omejena s hitrostjo registra, elektronskih stikal in operacijskega ojačevalnika.

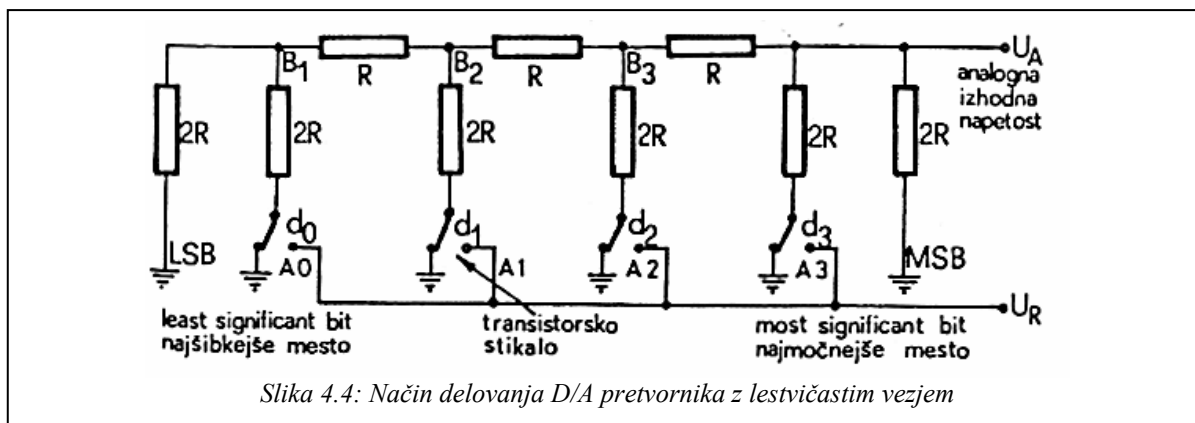


Slika 4.3: Poenostavljeno vezje D/A z lestvičastim vezjem

Za lažje razumevanje delovanja, opravimo analizo vezja na sliki spodaj. Glede na položaj posameznega stikala, je pripadajoči tokovni prispevek na izhodu sorazmeren kombinaciji zaporedno vezanih upornosti. Levo in desno od vsakega vozlišča je nadomestna upornost enaka $2R$, zato se tok, ki teče iz referenčne napetosti v vsakem vozlišču prepolovi. Katerokoli od stikal bo vključeno na U_R , bo skozi stikalo tekel tok $I = U_R/3R$. Desna polovica toka se v naslednjem vozlišču spet razpolovi (polovica teče dalje proti izhodu, polovica pa preko stikala na maso). Tako se tok na vsakem vozlišču razpolavlja (na bolj oddaljenih vozliščih večkrat), dokler ne pride do bremenskega upora R_L , kjer povzroči podatku sorazmeren padec napetosti.

Tok, ki steče v R_L od skrajnega desnega stikala, kadar je le- to priključeno na U_R znaša:

$$I_3 = \left(\frac{U_R}{3R}\right) \cdot \frac{1}{2}$$



Ustrezni prispevek stikala A_3 k napetosti U_A znaša:

$$U_{A_3} = \left(\frac{U_R}{3R}\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot 2R = \frac{U_R}{3} \cdot 1$$

Prispevek vključenega sosednjega levega stikala A_2 je:

$$U_{A_2} = \left(\frac{U_R}{3R}\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2R = \frac{U_R}{3} \cdot \frac{1}{2}$$

Podobno lahko zapišemo za ostala stikala izraze:

$$U_{A_1} = \left(\frac{U_R}{3}\right) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \quad U_{A_0} = \left(\frac{U_R}{3}\right) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3$$

Celotno izhodno napetost lahko izračunamo po izrazu:

$$U_A = \frac{U_R}{3} \cdot \left(d_3 + \frac{d_2}{2} + \frac{d_1}{4} + \frac{d_0}{8}\right)$$

Po preureditvi enačbe dobimo izraz:

$$U_A = \frac{U_R}{3} \cdot \frac{1}{2^3} (d_0 \cdot 2^0 + d_1 \cdot 2^1 + d_2 \cdot 2^2 + d_3 \cdot 2^3)$$

Primer izračuna:

V primeru vhodnega podatka 1010, bi bili koeficienti $d_0=0$; $d_1=1$; $d_2=0$ in $d_3=1$ in na izhodu sledeča napetost:

$$U_A = \frac{U_R}{3} \cdot \frac{1}{8} (2 + 8) = \frac{10}{24} \cdot U_R = 0,4167U_R$$

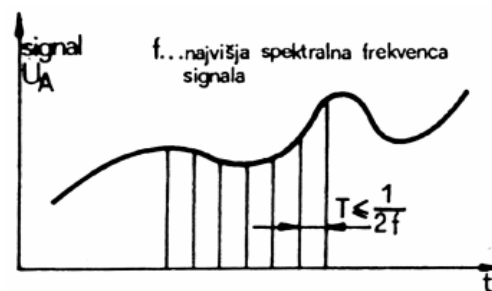
V praksi se D/A pretvorniki se uporabljajo posamezno ali kot pomožna komponenta pri A/D pretvornikih, ki so po konstrukciji vezja nekoliko zahtevnejši.

Pozornost velja pri napajanju, saj morata biti masi (D_{gnd} in A_{gnd}) ločeni, da ne pride do motenj v analognem signalu zaradi padcev napetosti v napajalnih povezavah digitalnih vezij.

(Primer: <http://www.williamson-labs.com> - decoupling)

4.4 ANALOGNO DIGITALNI PRETVORNIKI - ADC

A/D pretvorniki pretvarjajo zvezno se spreminjajoče napetosti, ki so lahko rezultat meritev procesnih veličin ali drugi električni signali (npr. zvok, slika,...) v digitalne podatke. Obstaja več načinov A/D pretvorbe, ki se med seboj razlikujejo po hitrosti, natančnosti in kompleksnosti vezja za pretvornik. Postopek pretvorbe je sestavljen iz treh faz. Najprej je potrebno odmeriti nek dovolj kratek čas, ki ga imenujemo vzorčni interval T , za katerega menimo, da se signal tudi v najhitrejšem delu signala ne spremeni bistveno. Glede na frekvenčni spekter signala to pomeni najvišjo frekvenco, ki je še vsebovana v signalu.

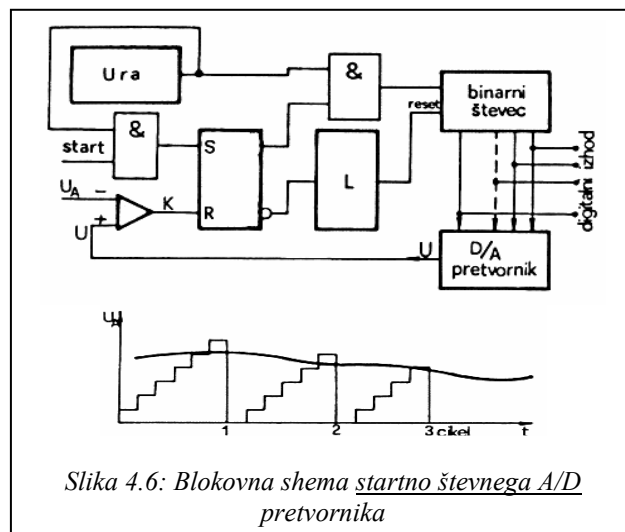


Slika 4.5: Prikaz intervalov vzorčenja analognega signala

V praksi se je izkazalo, da mora biti ta čas vsaj polovico krajši kot je recipročna vrednost najvišje frekvence (minimalne periode), ki je zastopana v signalu (slika 4.5). Ta zahteva sledi iz Shanonovega teorema o odmerjanju vzorcev (*sampling theorem*). Ta pravi da mora biti frekvenca vzorčenja 2 krat večja od največje frekvence v signalu, ki jo še želimo upoštevati v pretvorbi. Naslednji del postopka pretvorbe zajema amplitudno kvantizacijo, kar pomeni, da je treba poiskati trenutni analogni vrednosti najbližjo diskretno vrednost. To funkcijo opravlja vezje za vzorčenje (*Sample and Hold*), ki ima to značilnost, da v času impulza za vzorčenje prebere trenutno velikost napetosti in to vrednost »zadrži« do naslednjega impulza za vzorčenje. Tretja faza postopka A/D pretvorbe zajema primerno kodiranje diskretne vrednosti napetosti (stopničke) v pripadajoči digitalni podatek. Glede na način pretvorbe razlikujemo več izvedb A/D pretvornikov, vendar se v praksi pojavljajo le nekatere izmed obravnavanih.

4.4.1 STARTNO ŠTEVNI PRETVORNIK

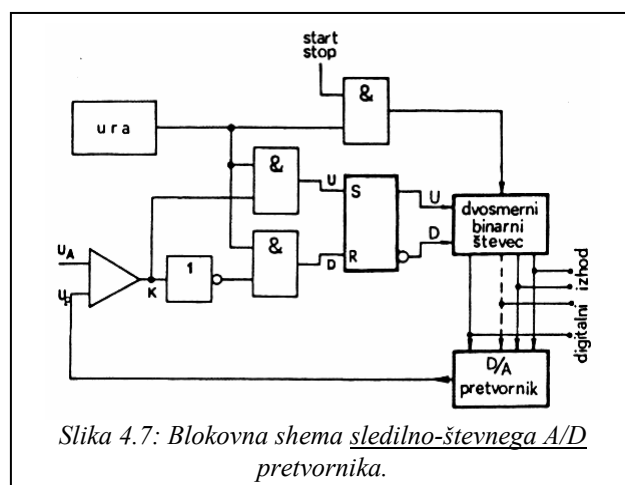
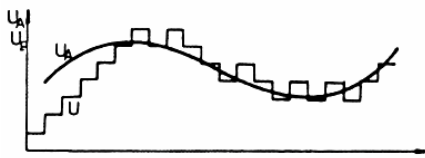
Ta vrsta pretvornika ima v povratni vezavi D/A pretvornik, ki na izhodu po korakih zvišuje referenčno napetost, primerjalnik jo primerja z napetostjo na vhodu. Binarni števec šteje taktne (urine) impulze, dokler se referenčna napetost ne izenači z vhodno, kar predstavlja konec pretvorbe. Na izhodu števca je v tem trenutku na razpolago digitalni podatek. Čez določen čas logično vezje števec resetira in prične se lahko novi cikel pretvorbe. Pretvornik je lahko zelo natančen, toda čas konverzije je pogosto predolg, skrajšati ga je mogoče, če napetost D/A sledi napetosti na vhodu.



Slika 4.6: Blokovna shema startno števnega A/D pretvornika

4.4.2 SLEDILNO ŠTEVNI PRETVORNIK

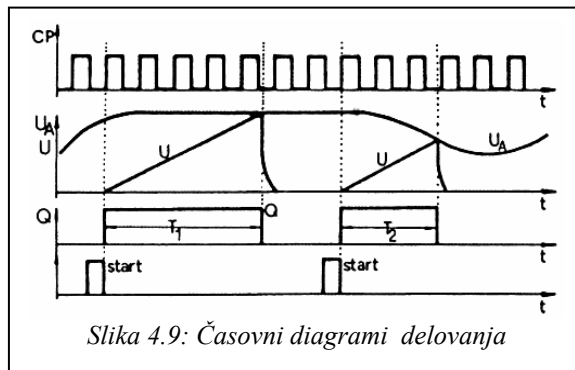
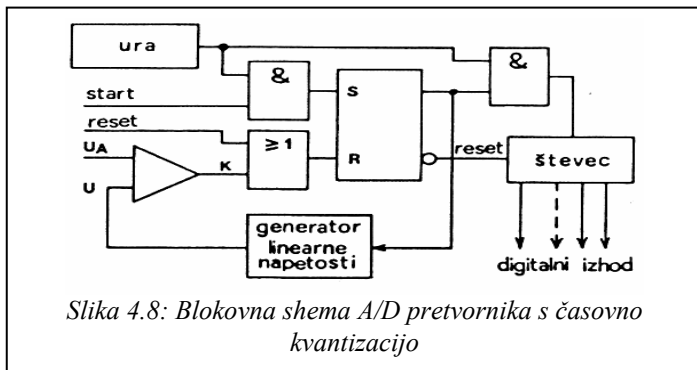
Ta pretvornik je podoben predhodnemu, le da ima dvosmerni števec s kontrolo štetja naprej (U) in nazaj (D). V primeru, da je vhodna napetost manjša od referenčne (izhodna napetost D/A pretvornika), števec šteje naprej in dviguje stopničasto napetost. Če postane vhodna napetost višja od referenčne (stopničaste) števec prične odštevati.



Slika 4.7: Blokovna shema sledilno-števnega A/D pretvornika.

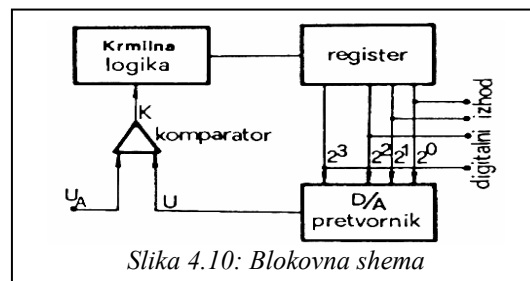
4.4.3 A/D PRETVORNIK S ČASOVNO KVANTIZACIJO

Ta pretvornik uporablja namesto stopničaste, linearno naraščajočo (žagasta) napetost za referenčno. Ob startnem impulzu se števec resetira in začne teči, in šteje vse do trenutka da se »žagasta« napetost izenači z vhodno. V tistem trenutku se števec ustavi, na izhodih pa se pojavi digitalni podatek, ki ustreza analogni napetosti na vhodu. Po resetiranju števca in naslednjem start impulzu se prične ponovni cikel pretvorbe.

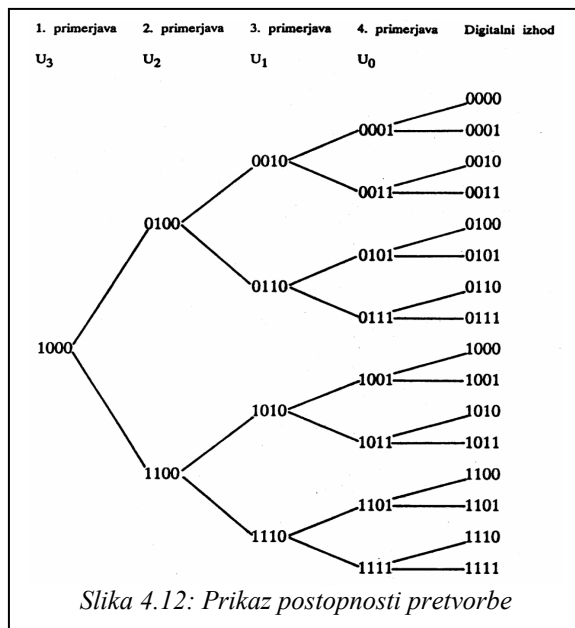
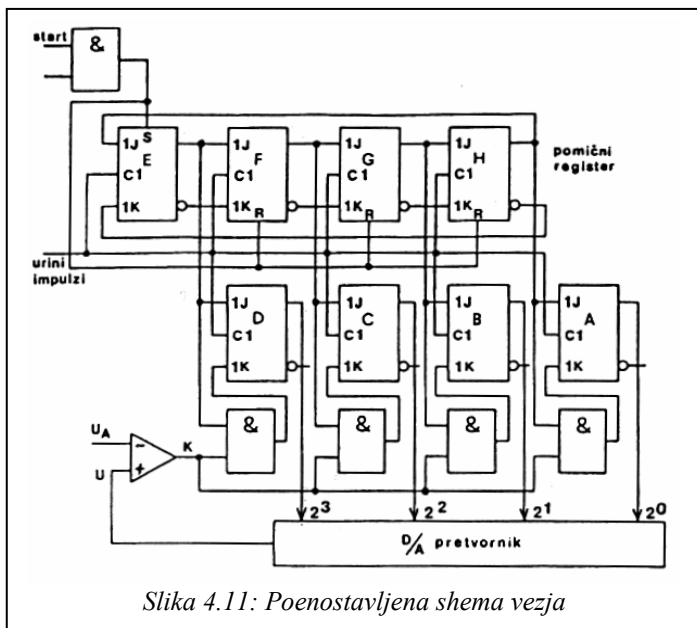


4.4.4 A/D PRETVORNIK S POSTOPNO PRETVORBO

A/D pretvornik s postopno pretvorbo (*successive approximation converter*) se veliko uporablja zaradi sorazmerno velike hitrosti in natančnosti pretvorbe. Analogni signal se pretvori v digitalnega bit za bitom, pri čemer pa pretvorba poteka od najbolj uteženega mesta (skrajno levo) navzdol. Sestavlja ga primerjalnik, D/A pretvornik, krmilna logika, pomikalni in LATCH register. Delovanje lahko opišemo na sledeč način.



Krmilna logika najprej postavi LATCH register na 0. Ob naslednjem taktne impulzu se postavi prvi flip-flop pomikalnega registra na »1«. Pri 4-bitni pretvorbi to pomeni, da je v tem primeru na vhodu D/A pretvornika podatek 1000. Ekvivalentna izhodna napetost D/A pretvornika se primerja z vhodno in če je vhodna višja se to stanje vpiše v prvi flip-flop LATCH registra, kjer ostane »1«. V primeru, da je vhodna napetost v tem poskusu nižja, se »1« ne vpiše in v prvem flip-flopu LATCH registra ostane »0«. V naslednjem taktne impulzu se postopek ponovi za drugo pomembnejše mesto in nadaljuje do najmanj uteženega bita. Postopek potrebuje toliko taktne impulzov, kolikor bit-na je izvedba, perioda cikla pa traja nekaj dlje saj je potrebno še nekaj impulzov za krmiljenje.



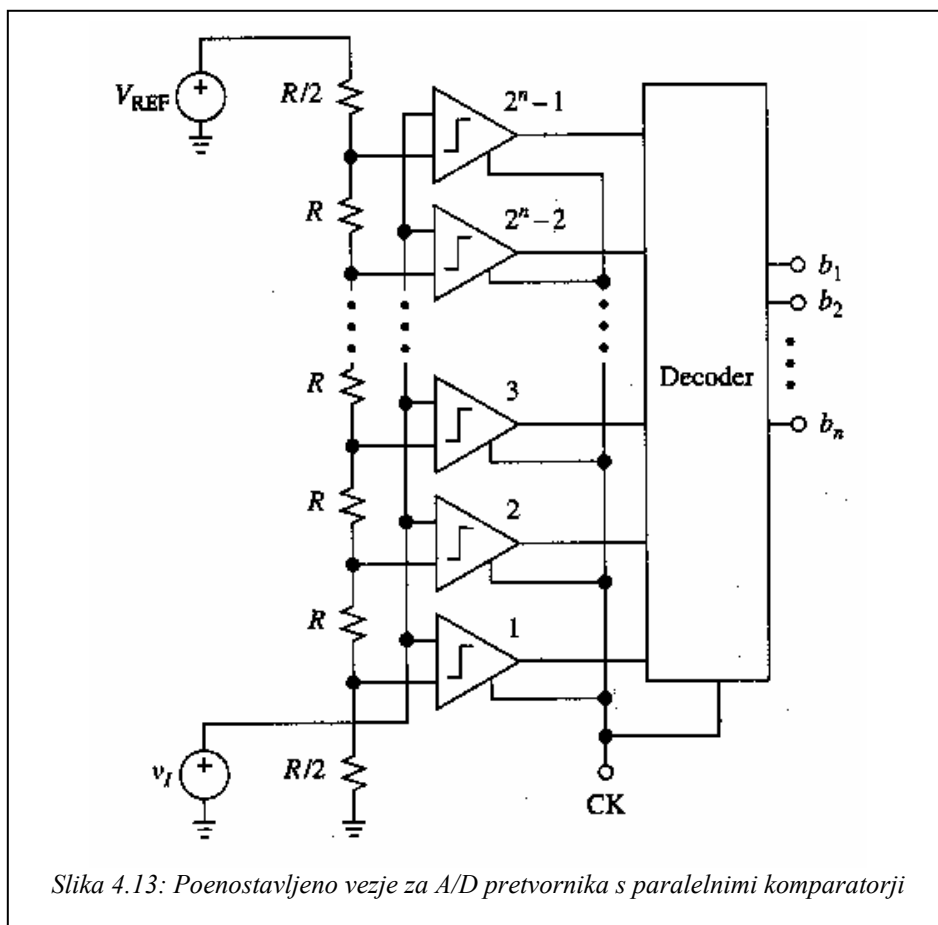
4.4.5 A/D PRETVORNIK S PARALELNIMI KOMPparatorJI (FLASH CONVERTER)

Vežje sestavlja veriga uporov, ki definirajo $2^n - 1$ različnih referenčnih nivojev, razmaknjenih med sabo za 1 LSB in hitrih primerjalnikov z LATCH funkcijo, ki zavzamejo ustrezni izhodni nivo glede na velikost vhodne napetosti v_i . Glede na to, da mora biti center območja (posamezne stopničke) analognega signala na primernem nivoju, morata biti spodnji in zgornji upor v verigi polovične vrednosti glede na ostale.

Takoj, ko CK signal aktivira primerjalnike (*strobe*), zavzamejo tisti pri katerih so referenčni nivoji pod trenutno vrednostjo v_i logični nivo »1«, vsi ostali pa logični nivo »0«. Rezultat na izhodih komparatorjev je v obliki »bar-graph« ali kot tudi lahko rečemo *termometer* kode, ki se zatem preko ustreznega dekoderja (npr. prioritetni enkoder) pretvori v primerno kodo b_1, \dots, b_n in posreduje na izhod konvertorja. Ker je na ta način postopek vzorčenja in »pomnjenja« izveden v prvem delu CLOCK periode, postopek dekodiranja pa v drugem delu, je za popolno pretvorbo potreben le en CLOCK cikel in zato je ta ADC v okviru možnosti najhitrejši. Primerno ime »flash converter« mu določa uporabo v vezjih za najvišje hitrosti, kot so npr. procesiranje video in radarskih signalov, kjer je potrebno število pretvorb reda nekaj milijonov v sekundi (*Msp*- *megacycles per second*) in konverterji na podlagi postopne aproksimacije ne zadostijo zahtevam.

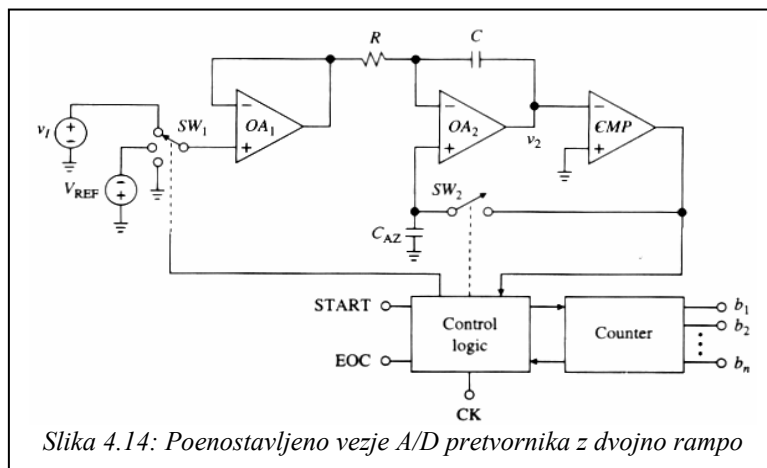
Prednosti izjemne hitrosti in edinstvenega načina vzorčenja opravičujejo dejstvo, da ADC vežje potrebuje $2^n - 1$ komparatorjev. V primeru 8-bitnega flash AD pretvornika, vežje zahteva 255 komparatorjev. Eksponencialno naraščanje števila komparatorjev glede na n , ima za posledico močno povečanje toplotnih izgub in stresanih kapacitivnosti ter postavlja praktično omejitev pri $n=10$.

Flash ADC so dobavljivi v bipolarni ali CMOS tehnologiji, z resolucijo 6, 8 in 10 bitov ter hitrostjo vzorčenja od nekaj 10 do nekaj 100 *Msp*, odvisno od resolucije in izgubne moči, ki je reda 1W ali manj.

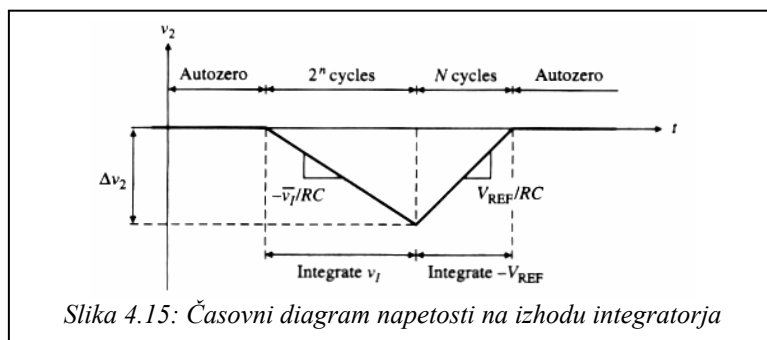


4.4.6 A/D PRETVORNIK Z DVOJNO RAMPO (DUAL RAMP ADC)

A/D pretvornik na osnovi dvojne rampe prav tako deluje na dvofaznem postopku pretvorbe. V prvi fazi se preko visokoimpedančnega vhodnega vmesnika (*buffer*) integrira vhodna napetost, ki na izhodu integratorja ustvari naraščajočo rampo. Rampa doseže velikost, ki je premosorazmerna vhodni napetosti. V drugem delu elektronsko stikalo preklopi vhod na referenčno napetost z nasprotnim predznakom, kar povzroči integriranje v nasprotno smer. Števec v prvem delu prešteje celoten obseg štetja, v drugem delu pa šteje samo tako dolgo, da doseže izhod integratorja 0V, kar zazna komparator. V tem trenutku se števec ustavi, trenutno stanje na izhodih pa predstavlja vhodni napetosti pripadajoči digitalni podatek. Za lažje razumevanje delovanja A/D pretvornika z dvojno rampo si pomagamo s časovnim diagramom.



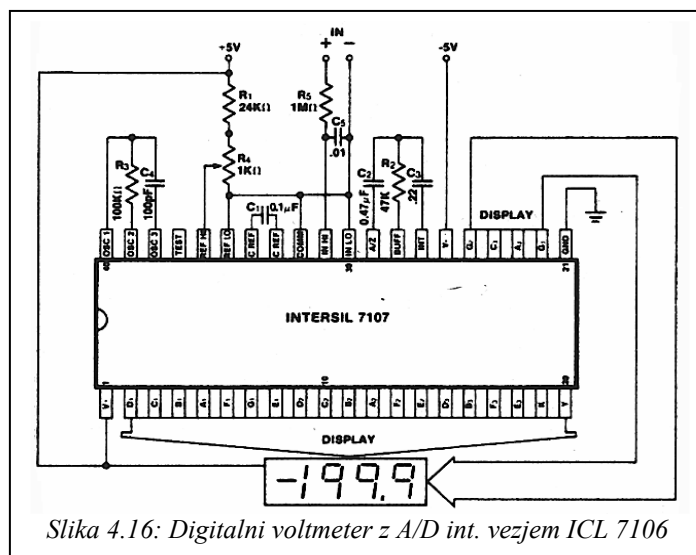
Slika 4.14: Poenostavljeno vezje A/D pretvornika z dvojno rampo



Slika 4.15: Časovni diagram napetosti na izhodu integratorja

Pred START stikalom je stikalo SW_1 sklenjeno s potencialom mase, stikalo SW_2 pa sklene kombinacijo integrator-komparator v zanko in postavi izhod integratorja na tak potencial, da se izhod na komparatorju sprevrže v nasprotno stanje. Ta faza postopka (*autozero*) simultano kompenzira vhodne *offset* napetosti vseh treh operacijskih ojačevalnikov. Skozi sledeče faze, ko je stikalo SW_2 odprto, kondenzator C_{AZ} služi kot »analogni spomin«, ki ohranja potrebno napetost. Po START signalu, kontrolna logika odpre stikalo SW_2 , preklopi SW_1 na vhodno napetost v_1 (mora biti pozitivna) in števec prične s štetjem od 0. Napetost na integratorju pada in po 2^n taktnih periodah doseže vrednost, ki je sorazmerna velikosti vhodne napetosti. V tej točki logično vezje avtomatično resetira števec in stikalo SW_1 priključi referenčno napetost (negativna $-V_{REF}$) na vhod, kar povzroči linearno naraščanje napetosti integratorja (druga rampa). Ta rampa ima vedno enak naklon saj je referenčna napetost vedno enaka. Ko doseže napetost v_2 nivo preklopa, komparator števec ustavi postavi signal *EOC* (*end of conversion*) v aktivno stanje. Pretvorba je končana, podatek je na razpolago in lahko se prične nova pretvorba.

Ta A/D pretvornik ima kljub počasnosti bistvene prednosti, saj je natančnost pretvorbe neodvisna od R , C in T_{CK} in vhodnih *offset* napetosti vseh treh operacijskih ojačevalnikov. Poleg tega je karakteristika zelo linearna (nelinearnost je pod 0.01%), resolucija pa lahko presega 20 bitov. V praksi se ta vrsta A/D pretvornika, uporablja pri večini digitalnih merilnikov, kjer ni zahtevana potreba po veliki hitrosti pretvorbe – (univerzalni merilni instrumenti (npr. z ICL 7106), digitalni merilniki temperature, medicinski digitalni merilniki tlaka,...)



Slika 4.16: Digitalni voltmetr z A/D int. vezjem ICL 7106