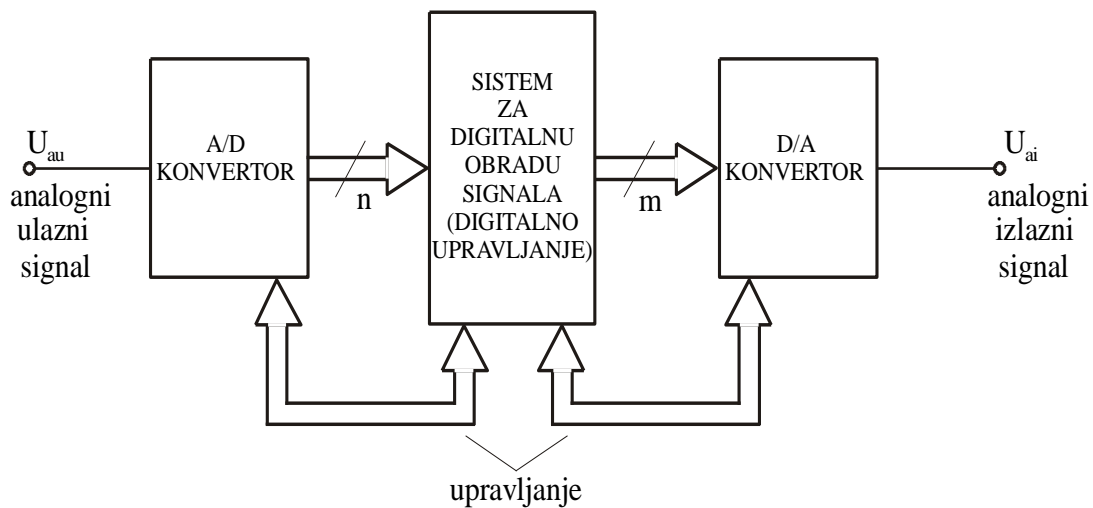


16. ANALOGNO-DIGITALNA I DIGITALNO-ANALOGNA KONVERZIJA

Da bi se mogla vršiti efikasna digitalna obrada podataka iz okoline koji su kontinualnog oblika oni se prvo pomoću odgovarajućih senzora transformišu u analogne električne signale, a zatim se ti analogni signali transformišu u digitalan oblik. Tako dobiveni digitalni podaci se obrađuju u digitalnim računarima i digitalnim sistemima. Postupak pretvaranja analognih signala u digitalne signale se naziva analogno-digitalna konverzija ili A/D konverzija. Elektronska kola i sklopovi koji se koriste za realizovanje A/D konverzije nazivaju se analogno-digitalni konvertori ili skraćeno A/D konvertori.

Rezultati digitalne obrade podataka u digitalnom računar ili digitalnom sistemu se moraju često pretvoriti u analogan oblik da bi se upravljalo odgovarajućim upravljačkim elementima ili stanjima u okolini. Postupak pretvaranja digitalnih signala u analogne signale se naziva digitalno-analogna konverzija ili D/A konverzija. Elektronska kola i sklopovi koji se koriste za realizovanje D/A konverzije nazivaju se digitalno-analogni konvertori ili skraćeno D/A konvertori.

Princip digitalne obrade signala (ili digitalnog upravljanja) sa prikazanim A/D i D/A konvertorima je dat na sljedećoj slici.

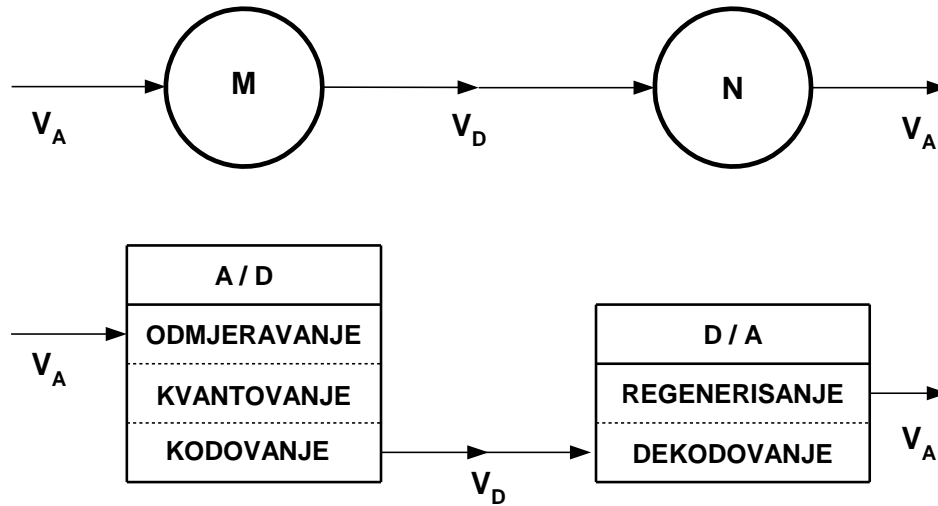


Princip digitalne obrade signala (ili digitalnog upravljanja) sa prikazanim A/D i D/A konvertorima

Princip postupaka A/D konverzije i D/A konverzije je prikazan na sljedećoj slici.

Transformacija analognih vrijednosti signala (V_A) u digitalni (numerički) oblik (V_D) realizuje se pomoću A/D konvertora primjenom tri postupka: odmjeravanje, kvantovanje i kodovanje (u tački M). Analogni signal V_A uvodi se u A/D konvertor preko bloka za odmjeravanje u kome se vrši vremensko kvantovanje signala. U određenim vremenskim razmacima pod dejstvom impulsa za odmjeravanje formiraju se odgovarajući amplitudni odmjeri analognog signala. Oni se dovode u blok za

amplitudno kvantovanje u kome se analogni odmjerci prevode u najpribližniju diskretnu veličinu. Tako se analogni signal transformiše u kvantovani signal. Najzad se kvantovani odmjerci dovode u blok za kodovanje u kome se diskretne vrijednosti izražavaju digitalnim vrijednostima (koduju).



Princip postupaka A/D i D/A konverzije

Obrnuti postupak, transformacija digitalne vrijednosti (V_D) u analogni oblik (V_A) realizuje se pomoću D/A konvertora primjenom dva postupka: dekodovanje i regenerisanje (u tački N). Digitalni signal V_D uvodi se u D/A konvertor preko bloka za dekodovanje u kome se vrši dekodovanje i dobivaju odgovarajući kvantovani odmjerci. U određenim vremenskim razmacima kao i pri odmjeraivanju formiraju se odgovarajući amplitudni odmjerci analognog signala. Oni se vode na blok za regenerisanje gdje se formira odgovarajući analogni signal.

Kako su D/A konvertori u principu jednostavniji i pošto neki tipovi A/D konvertora koriste D/A konvertore prvo će biti razmotreni i opisani D/A konvertori.

DIGITALNO-ANALOGNA KONVERZIJA

Funkcija D/A konvertora je da konvertuje binarnu digitalnu riječ (podatak) u odgovarajući (proporcionalni) analogni napon ili struju. Taj proces konverzije obuhvata dekodovanje i regenerisanje signala. Dekodovanje se sastoji u generisanju analognih izlaznih vrijednosti signala na osnovu datih ulaznih digitalnih podataka. Regenerisanje je postupak formiranja kontinualnog neprekidnog analognog izlaznog signala.

Osnovne tehnike D/A konverzije su:

- sabiranje komponenata struje,
- integriranje naponskih impulsa.

Realizacija D/A konvertora na principu sabiranja struja realizuje se pomoću otpornih mreža. Struktura mreže treba da bude takva, da omogućava uspostavljanje strujnih komponenata koje stoje u odnosu pozicionih vrijednosti cifara u digitalnoj riječi (podatku) koja se konvertuje. Takve mreže izvode se kao težinske mreže ili kao ljestvičaste mreže. Većina D/A konvertora se praktično realizuje na taj način.

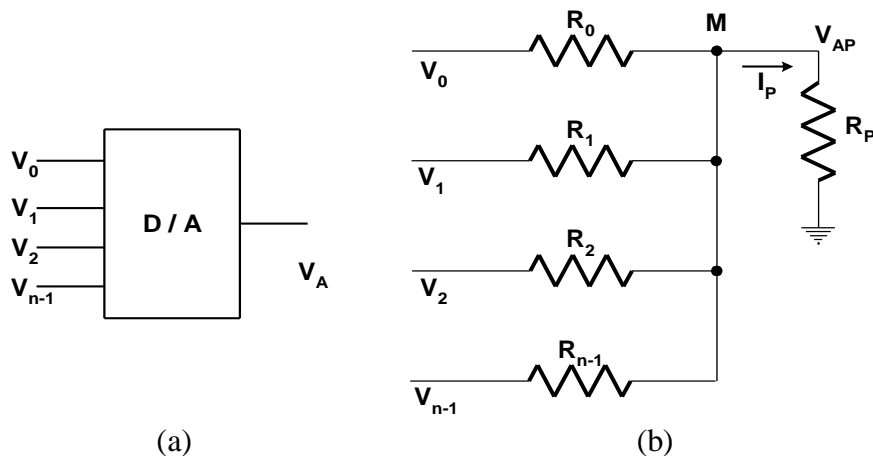
D/A konvertori na principu integriranja naponskih impulsa realizuju se uglavnom na dva načina:

- korišćenje pravougaonih impulsa sa promjenljivim faktorom ispune,
- korišćenjem različite gustine impulsa.

Dosta rijetko se primjenjuju u praksi zbog male brzine funkcionisanja.

Težinska otporna mreža

Otporne mreže imaju samo jedan izlaz, a broj ulaza im je određen brojem bita u digitalnom podatku koji se konvertuje. Elementi težinske otporne mreže se biraju tako, da se na izlazu formiraju analogni naponi čije vrijednosti stoje u odnosima pozicionih vrijednosti bita u digitalnom podatku. Na sljedećoj slici je prikazan princip D/A konverzije korištenjem težinske otporne mreže. Na slici pod a) je dat simbol D/A konvertora, a na slici pod b) je data odgovarajuća težinska otporna mreža.



D/A konverzija korištenjem težinske otporne mreže

Vrijednosti otpornika u težinskoj otpornoj mreži se određuju prema pozicionim vrijednostima, odnosno težinama pojedinih bita u ulaznom digitalnom podatku. Ako je ulaz V_0 predviđen za dovodjenje bita najniže pozicione vrijednosti (najmanje težine), onda prisustvo napona logičke 1 na ulazu V_0 treba da obezbijedi na izlazu mreže V_{AD} (na otpornosti opterećenja R_P) analogni napon od vrijednosti jednog kvanta (D_V). Ako je na ulazu mreže doveden napon logičke 1 samo na ulaz V_1 na izlazu V_{AD} treba da se uspostavi analogni napon vrijednosti dva kvanta ($2D_V$). Ako je doveden nivo logičke 1 samo na ulaz V_2 izlazni napon treba da iznosi četiri kvanta ($4D_V$).

Da bi se obezbijedio navedeni odnos napona, otpornosti mreže treba da imaju binarne težinske odnose, tako da je:

$$R_i = \frac{R}{2^i}.$$

Ulazni naponi mreže V_i odgovaraju binarnim ciframa u ulaznom digitalnom podatku. Napon V_i po amplitudi mora da bude strogo definisan i stabilan, te se za njega koristi referentni naponski izvor V_R ($V_i = a_i V_R$, gdje a_i ima vrijednost nule ili jedinice zavisno od vrijednosti odgovarajućeg bita i). Na izlaznom otporniku R_P se vrši sabiranje struja iz ulaznih grana mreže.

Napon u ma kom čvoru mreže jednak je količniku zbira struja koje ulaze u čvor i zbira provodnosti vezanih za taj čvor (Milmanova teorema) (ako je R_P beskonačno velik), pa se može pisati da je izlazni napon mreže jednak:

$$V_A = \frac{\frac{V_0}{R_0} + \frac{V_1}{R_1} + \dots + \frac{V_{n-1}}{R_{n-1}}}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_{n-1}}}$$

Izlazna otpornost mreže je:

$$R_I = R_0 \parallel R_1 \parallel \dots \parallel R_{n-1} = \frac{R}{2^n - 1}.$$

Ako se umjesto R_i stavi $R/2^i$, a umjesto V_i stavi $a_i V_R$ dobije se da je izlazni napon dat sa:

$$V_A = \frac{a_0 2^0 + a_1 2^1 + \dots + a_{n-1} 2^{n-1}}{2^0 + 2^1 + \dots + 2^{n-1}} V_R = \frac{V_R}{2^n - 1} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i,$$

gdje je V_R napon na ulazu (referentni napon) ako je na ulazu logička 1, a_i vrijednost odgovarajućeg bita (0 ili 1), a i redni broj bita u ulaznom digitalnom podatku (od 0 do $n-1$).

Ako je jedino $a_0 = 1$ (a svi ostali biti su na logičkoj 0) dobija se vrijednost tzv. napona kvanta:

$$D_V = \frac{V_R}{2^n - 1}.$$

Napon kvanta je najmanji napon koji konvertor može da registruje pa se zove rezolucioni napon ili osjetljivost konvertora.

Ako su svi koeficijenti $a_i = 1$ (svi digitalni ulazi na nivou logičke 1) dobije se najveća vrijednost analognog napona, tzv. napon pune skale konvertora:

$$V_{APS} = \frac{V_R}{2^n - 1} (2^0 + 2^1 + \dots + 2^{n-1}) = V_R,$$

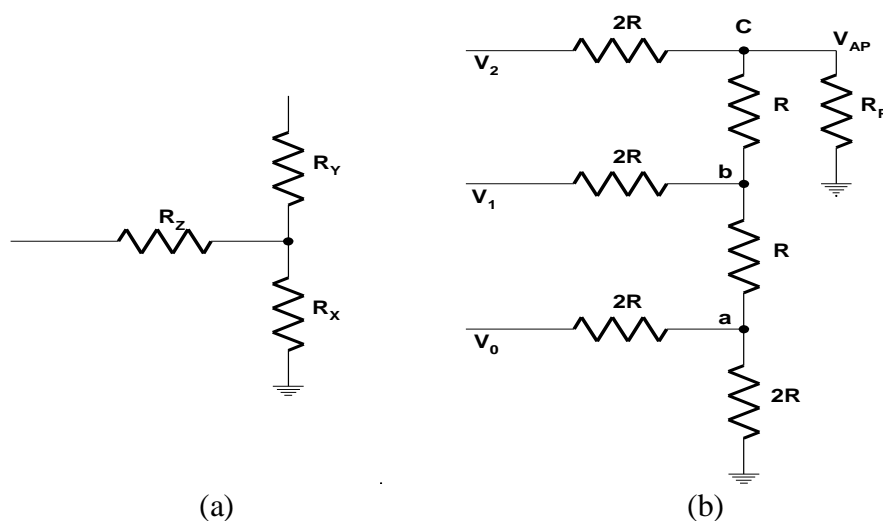
(uz uslov da je $R_p = \infty$).

Ljestvičasta otporna mreža

Formiranje ljestvičaste otporne mreže vrši se na osnovu sljedećeg uslova:

$$R_x \parallel R_z + R_y = R_x.$$

Kad se stavi da je: $R_x = R_z \Rightarrow R_y = R_x/2$, dobije se mreža sa dvije vrijednosti otpornika R i $2R$. Na sljedećoj slici je pod a) prikazan princip formiranja ljestvičaste otporne mreže, a pod b) je prikazana šema ljestvičaste otporne mreže

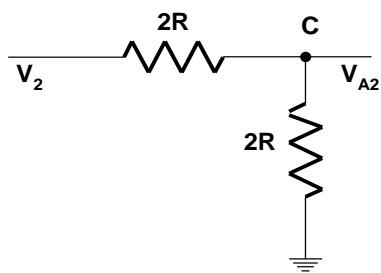


Ljestvičasta otporna mreža

Ljestvičasta otporna mreža ima prednost u poređenju sa težinskom otpornom mrežom jer koristi samo dvije različite otpornosti, iako ima dvostruko veći broj otpornika.

Otpornost ljestvičaste otporne mreže iz bilo kog čvora a, b, c prema ulazima ili prema masi iznosi $2R$, odnosno izlazna otpornost mreže i tačke gdje se priključuje R_p ima vrijednost R .

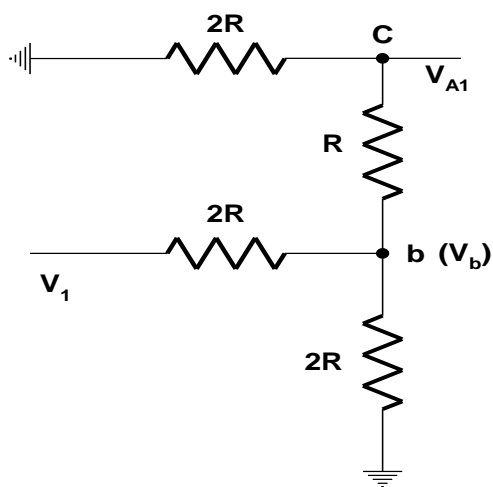
Ako na ulazu djeluje samo napon $V_2 = a_2 V_R$, a ostali ulazi su na logičkoj 0 (R_p vrlo velika), ekvivalentna šema mreže u tom slučaju je prikazana na sljedećoj slici.



Tada je napon:

$$V_{A2} = \frac{2V}{2R + 2R} V_2 = \frac{a_2 V_R}{2}.$$

Ako na ulazu djeluje napon samo $V_1 = a_1 V_R$, a ostali ulazi su u stanju logičke 0, ekvivalentna šema mreže je za taj slučaj prikazana na sljedećoj slici.



Tada je napon:

$$V_{A1} = \frac{2R}{R + R + 2R} \cdot \frac{V_1}{2} = \frac{a_1 V_R}{4}.$$

Sličnim postupkom se može odrediti da je:

$$V_{A0} = \frac{a_0 V_R}{8}.$$

Odnosno može se pisati da je:

$$V_{A(n-k)} = \frac{a_{n-k}}{2^k} V_R, \quad k = 1, 2, 3, \dots n.$$

Prema tome, ukupni izlazni analogni napon D/A konvertora sa lestvičastom otpornom mrežom je dat sa:

$$V_A = (a_0 2^0 + a_1 2^1 + \dots + a_{n-1} 2^{n-1}) \frac{V_R}{2^n} = \frac{V_R}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i.$$

Na osnovu toga se može dobiti da je naponski kvant ili napon rezolucije ovog D/A konvertora dat sa:

$$D_V = \frac{V_R}{2^n},$$

dok je napon pune skale dat sa:

$$V_{APS} = (2^0 + 2^1 + \dots + 2^{n-1}) \frac{V_R}{2^n} = \frac{2^n - 1}{2^n} V_R,$$

i uvijek je manji od referentnog napona V_R .

Osnovne karakteristike D/A konvertora

U osnovne karakteristike D/A konvertora spadaju: rezolucija, izlazni napon pune skale, maksimalna greška, linearnost i vrijeme uspostavljanja izlaznog napona.

Rezolucija je određena brojem bita u ulaznom digitalnom podatku. To je ukupan broj ulaznih digitalnih stanja i mogući broj izlaznih analognih stanja D/A konvertora. Ako je broj ulaznih bita konvertora jednak n onda je rezolucija tog konvertora jednaka 1 od 2^n , a što se često izražava u procentima kao $1/2^n \cdot 100$. Ako je npr. broj ulaznih bita $n=8$ onda je rezolucija 1 od 256 (jer je $2^8=256$), a izraženo u procentima to je $1/256 \cdot 100 = 0,39\%$.

Izlazni napon pune skale je vrijednost maksimalnog izlaznog napona D/A konvertora za slučaj kada su svi ulazni biti konvertora u stanju logičke 1.

Maksimalna greška je razlika između potrebne i stvarno dobivene analogne vrijednosti na izlazu konvertora. Ona je uvijek manja (podešava se dane može biti veća) od $\pm 1/2$ vrijednosti napona koji odgovara vrijednosti bita najniže težine (naponskog kvanta) konvertora.

Linearnost pokazuje koliko vrijednost analognog napona na izlazu konvertora odstupa od potpuno linearne zavisnosti (naziva se još i greškom linearizacije). Idealno, ona nije veća od ± 1 vrijednosti napona koji odgovara vrijednosti bita najniže težine (naponskog kvanta) konvertora.

Vrijeme uspostavljanja izlaznog napona je vrijeme koje je potrebno da izlazni napon D/A konvertora dodje u okvire zahtjevanog napona nakon promjene digitalne vrijednosti na ulazu konvertora. Taj parametar odražava brzinu funkcionisanja D/A konvertora. Često se naziva vremenom konverzije D/A konvertora.

ANALOGNO-DIGITALNA KONVERZIJA

Analogno-digitalna (A/D) konverzija predstavlja transformaciju analogne vrijednosti signala sa ulaza u njegov digitalni ekvivalent. Funkcija A/D konverzora je da na svojim izlazima da digitalni podatak koji predstavlja digitalno predstavljenu vrijednost ulaznog analognog napona. Proces A/D konverzije obuhvata tri postupka: vremensko kvantovanje, amplitudno kvantovanje i kodovanje signala.

Vremensko kvantovanje ili odmjeravanje se odnosi na izdvajanje trenutne vrijednosti analognog signala u diskretnim vremenskim razmacima koja se konvertuje. Svaka takva analogna vrijednost naziva se odmjerak. Da bi se moglo da izvede regenerisanje prvobitnog analognog signala iz niza uzetih odmjeraka u postupku D/A konverzije, učestanost odmjeravanja mora biti bar dva puta veća od najviše frekvencije spektralne komponente analognog signala koji se konvertuje.

Amplitudno kvantovanje sastoji se u iznalaženju diskretne veličine koja je najpribližnija po vrijednosti datom analognom odmjerku na ulazu.

Izražavanje diskretne vrijednosti u digitalnom obliku zove se kodovanje.

Zadnja dva postupka čine stvarnu A/D konverziju.

Tehnike A/D konverzije

Tehnike A/D konverzije se najčešće dijele na:

- A/D konverzija podatak po podatak,
- A/D konverzija bit po bit,
- A/D konverzija kvant po kvant.

Na osnovu toga se vrši podjela A/D konvertora prema tehnici izvođenja postupka konverzije na: A/D konvertori podatak po podatak, A/D konvertori bit po bit i A/D konvertori kvant po kvant.

U postupku A/D konverzije podatak po podatak konverzija se realizuje na taj način što se analogni ulazni signal ili njegov odabrani odmjerak istovremeno poredi sa svim mogućim diskretnim veličinama, kako bi se odredila njegova digitalna vrijednost. Određivanje digitalne izlazne vrijednosti se vrši samo u jednom taktom interval. Takvi A/D konvertori su najbrži ali su i najsloženiji i najskuplji. Poznati su i po nazivu fleš (Flash) A/D konvertori. Koriste se u primjenama gdje su potrebne maksimalne brzine konverzije.

Princip A/D konverzije bit po bit sastoji se u tome što se izlazni digitalni ekvivalent (digitalni podatak) analogne ulazne vrijednosti dobija postepenim određivanjem jednog po jednog svakog bita posebno, polazeći od bita najveće pozicije vrijednosti (najviše težine). Za realizovanje konverzije je potrebno onoliko taktih intervala koliko izlazni digitalni podatak ima bita. Takvi A/D konvertori su sporiji od prethodnih, ali su jednostavniji i jeftiniji. Poznati su još pod nazivom A/D konvertori sa

sukcesivnom aproksimacijom jer se digitalni podatak dobiva sukcesivnim odredjivanjem bita po bita pri čemu se približava stvarnoj vrijednosti podatka.

A/D konverzija primjenom principa kvant po kvant se sastoji u mjerenju ulaznog analognog signala pomoću samo jedne i to najmanje diskretne veličine, tzv. etalona, tj. kvanta (napona kvanta) i odredjivanja koliko se puta etalon (kvant) nalazi u ulaznom analognom signalu. Ako se ta konverzija odvija sinhronizovano onda je za A/D konverziju potrebno onoliko taktnih intervala koliko mjerena veličina sadrži etalona. Takva A/D konverzija najduže traje kada je na ulazu maksimalna vrijednost analognog signala, odnosno kada se u digitalnom podatku dobiju sve logičke jedinice. A/D konvertori sa takvim principom konverzije su najsporiji ali su najjednostavniji i najjeftiniji. Koriste se u primjenama gdje nisu potrebne veće brzine konverzije.

A/D konvektori sa paralelnim komparatorima

Takvi A/D konvertori spadaju u konvertore koji realizuju konverziju podatak po podatak. Spadaju u najbrže A/D konvertore. Nazivaju se fleš A/D konvertorima. Njihova složenost i cijena naglo rastu sa porastom broja izlaznih digitalnih bita.

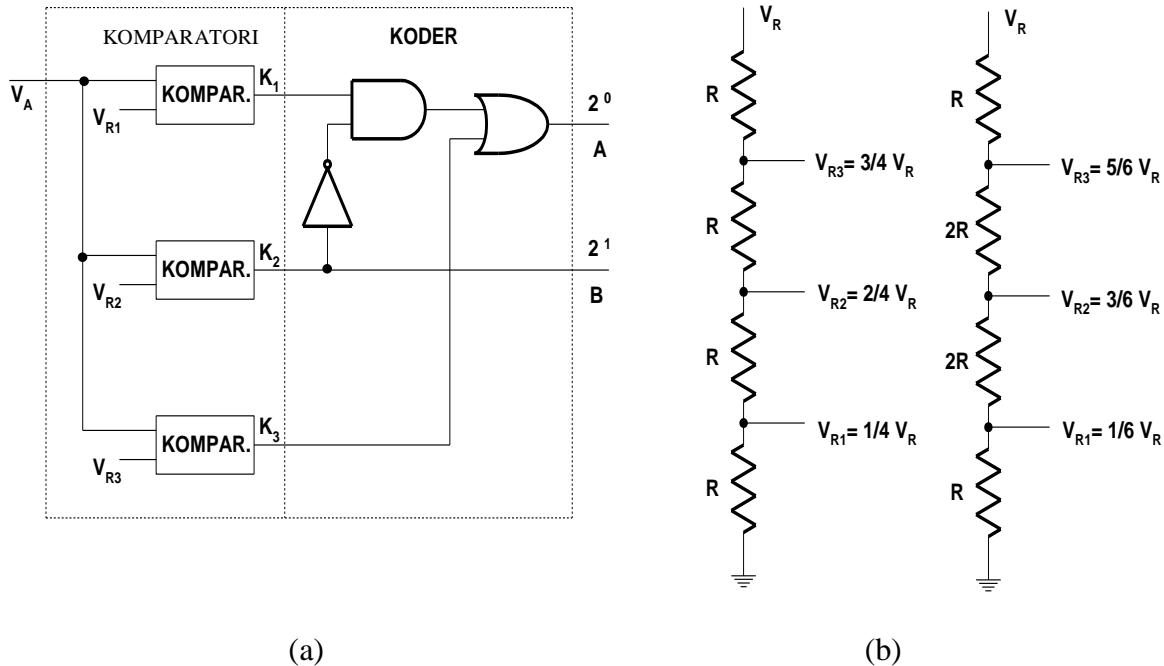
Ovakav A/D konvertor se sastoji od paralelnih komparatora (komparatorske mreže) na ulazu i koda (koderske mreže) na izlazu. Komparatorska mreža se sastoji od više paralelnih komparatora koji porede ulazni analogni signal sa odgovarajućim referentnim naponima (etalonima). Komparatori na svojim izlazima generišu digitalni signal (logičku 0 ili logičku 1) u zavisnosti od odnosa između ulaznog analognog signala i konkretnog referentnog napona. Na osnovu stanja na izlazima komparatora dekoderska izlazna mreža generiše odgovarajuće digitalne vrijednosti. Ovakvi A/D konvertori imaju onoliko etalona koliko primijenjeni digitalni sistem ima diskretnih vrijednosti različitih od nule. Etalone čine referentni naponi koji se dovode na odgovarajuće kompare. Broj referentnih napona kao i broj komparatora upotrijebljenih u ovakvom A/D konvertoru zavisi od broja bita (n) digitalnih izlaznih vrijednosti i iznosi:

$$N = 2^n - 1.$$

Vidi se da broj komparatora i broj referentnih napona naglo raste sa brojem izlaznih bita (n) A/D konvertora. Takođe, složenost koda se vrlo povećava sa povećanjem broja izlaznih bita (n).

Na sljedećoj slici pod a) je prikazan primjer realizacije A/D konvertor sa paralelnim komparatorima koji ima digitalne izlaze od dva bita. Kako je u pitanju broj bita $n=2$ onda se koriste tri ($2^n - 1 = 2^2 - 1 = 3$) naponska komparatora i isto toliko (tri) referentnih napona (etalona) V_{Ri} . Analogni napon V_A dovodi se istovremeno na ulaze svih komparatora. Etaloni su u stvari referentni naponi V_{Ri} sa kojima se upoređuje analogni napon V_A . Pošto digitalne riječi od dva bita mogu imati četiri diskretne vrijednosti, to su potrebna tri referentna napona V_{R1} , V_{R2} i V_{R3} . Kada se dovede ulazni analogni napon dobiće se stanje logičke jedinice na izlazu svakog komparatora za koji vrijedi $V_A \geq V_{Ri}$. Po završetku komparacije ulazna analogna vrijednost napona je transformisana u digitalni oblik koji se dobiva na izlazima komparatora. Zatim se ta

digitalna vrijednost vodi na koder (kodersku mrežu) koja vrši kodovanje i generiše izlazne digitalne signale u odgovarajućem kodu.



A/D konvertor sa paralelnim komparatorima i realizacije mreža referentnih napona

Kod A/D konvertora prikazanog na prethodnoj slici koriste se tri komparatora koji generišu tri izlazna digitalna signala K_1 , K_2 i K_3 . Ti signali se vode na ulaze koder koji vrši odgovarajuće kodovanje i tako generiše potrebne izlazne digitalne kombinacije. Na sljedećoj slici je prikazana kombinaciona logička tabela za taj A/D konvertor.

Analogni ulaz	Stanja izlaza komparatora			Digitalni izlazi	
V_A	K_1	K_2	K_3	B	A
$0 \leq V_A < V_{R1}$	0	0	0	0	0
$V_{R1} \leq V_A < V_{R2}$	1	0	0	0	1
$V_{R2} \leq V_A < V_{R3}$	1	1	0	1	0
$V_{R3} \leq V_A < V_{Amax}$	1	1	1	1	1

Kombinaciona logička tabela za A/D konvertor sa prethodne slike

Na osnovu prikazane kombinacione logičke tabele za ovaj A/D konvertor, koristeći minimizaciju, dobivaju se sljedeće logičke funkcije za izlazne signale koder:

$$A = K_1 \bar{K}_2 + K_3$$

$$B = K_2.$$

Na prethodno prikazanoj slici konvertora pod a) data je praktična realizacija koda na osnovu prethodno određenih logičkih funkcija.

Referentni naponi (etaloni) za ovakav A/D konvertor mogu da budu odabrani na dva načina: da se poklapaju sa granicama kvantizacionih nivoa ili da se nalaze u sredini tih nivoa. Mogu se realizovati pomoću odgovarajućih otpornih razdjelnih mreža. Na prethodnoj slici A/D konvertora pod b) su prikazane realizacije referentnih napona pomoću otpornih razdjelnika. Sa tih otpornih razdjelnika se uzimaju referentni naponi. Kod prve realizacije su referentni naponi nalaze na granicama kvantizacionih nivoa. Ako se koristi takva realizacija referentnih napona onda je greška konvertora jednaka $-D_V$ (napon kvanta). Kod druge realizacije se referentni naponi nalaze na sredini između granica kvantizacionih nivoa. Ako se koristi takva realizacija referentnih napona onda je greška konvertora jednaka $\pm \frac{1}{2} D_V$.

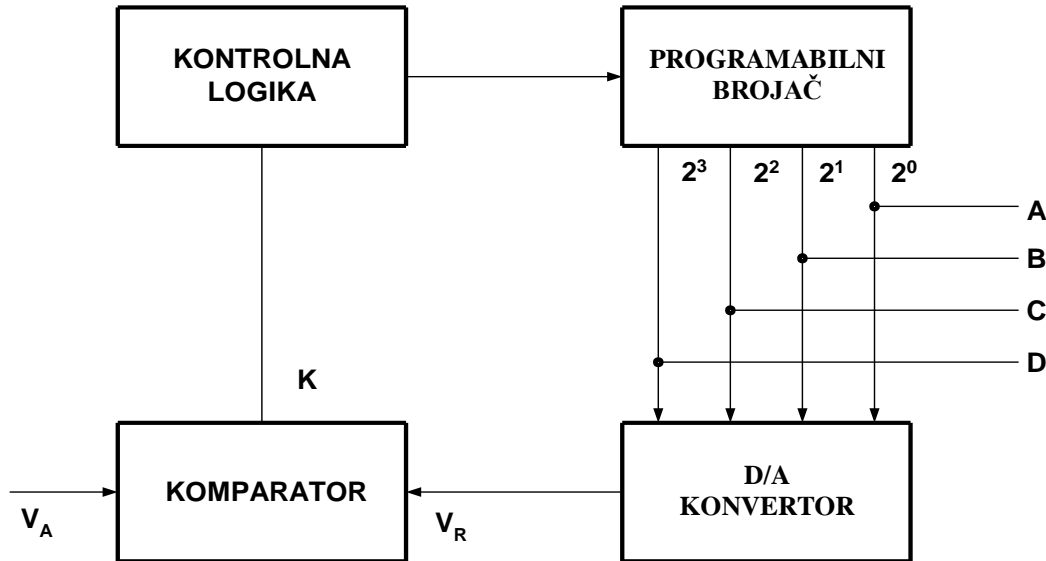
A/D konvertor sa programabilnim brojačem

Ovakvi A/D konvertori spadaju u konvertore koji realizuju konverziju bit po bit. Spadaju u sporije ali jednostavnije A/D konvertore u odnosu na A/D konvertore sa paralelnim komparatorima. Nazivaju se A/D konvertorima sa sukcesivnom aproksimacijom jer se sukcesivno određuje vrijednost jednog po jednog bita digitalnog podatka počevši od bita najveće težine. Vrijeme konverzije je proporcionalno sa brojem izlaznih bita i veće je što je veći broj izlaznih bita A/D konvertora.

Ovakav A/D konvertor se sastoji od programabilnog brojača, D/A konvertora, naponskog komparatora i odgovarajuće kontrolne logike. Kontrolna logika upravlja cijelim postupkom konverzije. Ulazni analogni napon V_A se dovodi na naponski komparator. Na drugi ulaz komparatora se dovodi napon V_R sa izlaza D/A konvertora koji je analogna naponska vrijednost koja odgovara trenutnom stanju brojača, odnosno trenutnoj izlaznoj vrijednosti u toku procesa konverzije. Izlazi programabilnog brojača su izlazi A/D konvertora.

Na sljedećoj slici je prikazana struktura A/D konvertora sa programabilnim brojačem koji ima digitalni izlaz od 4 bita (izlazni signali A, B, C i D). Postupak konverzije se realizuje pod upravljanjem kontrolne logike, a na sljedeći način. Konverzija počinje sa resetovanim stanjem brojača (svi izlazni biti jednaki logičkoj 1). Iz resetovanog stanja brojač se u prvom taktom intervalu postavlja tako da stepen najvišeg bita bude u stanju logičke jedinice. Ta vrijednost na izlazu D/A konvertora se pretvara u analognu vrijednost koja odgovara etalonu analognog napona V_{R3} pomoću koga se provjerava postojanje bita najviše pozicije vrijednosti 2^3 u analognom ulaznom naponu V_A . Napon V_{R3} se poredi na komparatoru sa analognim ulaznim naponom V_A . Ukoliko je $V_{R3} < V_A$ na izlazu komparatora K se uspostavlja stanje logičke 1, a ako je $V_{R3} > V_A$ uspostavlja se stanje logičke 0. Taj podatak se prenosi preko kontrolne logike za upravljanje brojača na

brojač tako da ako je konstatovao da je $V_A > V_{R3}$ (ako je $K=1$) zadržava se već postavljena vrijednost logičke jedinice najvišeg bita, a u protivnom (ako je $K=0$) postavljena vrijednost najvišeg bita se briše na logičku nulu. Tako je određen prvi bit (bit najviše težine) digitalnog izlaznog podatka (bit na izlazu D).



A/D konvertor sa programabilnim brojačem

Po završetku određivanja najvišeg bita (bita na izlazu D) kontrolna logika zadržava tu vrijednost u brojaču i postavlja brojački stepen sljedeće težine (težine 2^2) u stanje logičke 1. Na izlazu D/A konvertora se formira novi etalon napon V_{R2} . Komparator sada poredi taj etalon V_{R2} i analogni ulazni napon V_A . Na osnovu rezultata poredjenja komparator daje kontrolnoj logici podatak o vrijednosti izlaznog bita pozicije 2^2 (bit na izlazu C). Naime, ako je $V_{R2} < V_A$ na izlazu komparatora K se uspostavlja stanje logičke 1, a ako je $V_{R2} > V_A$ uspostavlja se stanje logičke 0. Taj podatak se prenosi preko kontrolne logike na brojač tako da ako je $K=1$ zadržava se već postavljena vrijednost logičke jedinice tog određivanog bita, a ako je $K=0$ postavljena vrijednost bita se briše na logičku nulu. Tako je određen drugi bit (bit niže težine) digitalnog izlaznog podatka (bit na izlazu C).

Na isti način se dalje sukcesivno jedna za drugom određuju vrijednosti bita na pozicijama težine 2^1 i 2^0 (bita na izlazima B i A). Veličina napona odgovarajućih etalona za određivanje vrijednosti tih bita zavisi ne samo od bita brojača odgovarajuće pozicije, već i od vrijednosti predhodno određenih bita. Kod svakog novog bita i odgovarajućeg naponskog etalona udvostručava se broj mogućih vrijednosti u poređenju sa prethodnim. Ukupan broj mogućih vrijednosti naponskih etalona za ovakav A/D konvertor koji ima n izlaznih digitalnih signala je $2^n - 1$. U sljedećoj tabeli su prikazane sve kombinacije vrijednosti etalona te izlazne digitalne vrijednosti za ovakav četverobitni A/D konvertor (za A/D konvertor prikazan na prethodnoj slici).

V_{R3}	V_{R2}	V_{R1}	V_{R0}	Digit. Izl.
1000	0100	0010	0001	0000
				0001
			0011	0010
				0011
		0110	0101	0100
				0101
			0111	0110
				0111
	1100	1010	1001	1000
				1001
			1011	1010
				1011
		1110	1101	1100
				1101
			1111	1110
				1111

Kombinacije vrijednosti etalona i digitalnih izlaza za četverobitni A/D konvektor

Kao primjer razmotrimo postupak konverzije ulaznog analognog signala vrijednosti $V_A = 11\text{V}$. Neka je rezolucioni napon konvertora $D_V = 1\text{ V}$. U prvom taktnom intervalu brojač se postavlja u stanje 1000. U tom slučaju je vrijednost odgovarajućeg referentnog napona $V_{R3} = 8\text{V}$. Kako je $V_A > V_{R3}$ digitalni izlaz težine 2^3 (izlaz D) ostaje tj. dobija vrijednost 1. Zatim se u sljedećem taktnom intervalu brojač postavlja u stanje 1100. Tada je vrijednost odgovarajućeg referentnog napona $V_{R2} = 12\text{V}$. Kako je sada $V_A < V_{R2}$ digitalni izlaz težine 2^2 (izlaz C) se briše, tj. dobija vrijednost logičke 0. Taj postupak se ponavlja sve do određivanja svih bita podatka. Detaljniji prikaz sijeklog postupka konverzije je prikazan u sljedećoj tabeli.

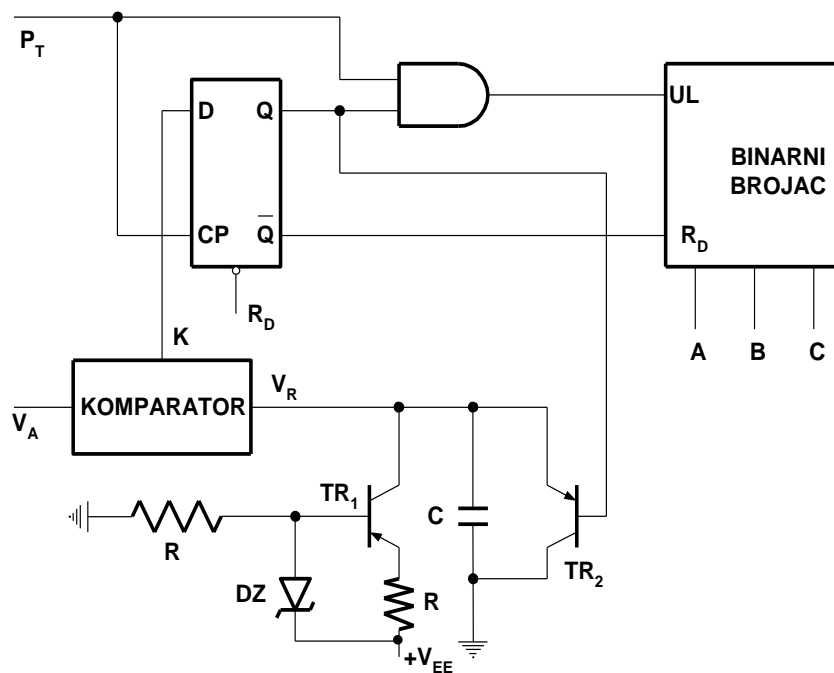
V_A [V]	Taktni interval	Stanje brojača D C B A	Vrijednost etalona [V]	Komparacija	Digitalna vrijednost
11	1.	1 0 0 0	$V_{R3} = 8$	$V_A > V_{R3}$	$D = 1$
	2.	1 1 0 0	$V_{R2} = 12$	$V_A < V_{R2}$	$C = 0$
	3.	1 0 1 0	$V_{R1} = 10$	$V_A > V_{R1}$	$B = 1$
	4.	1 0 1 1	$V_{R0} = 11$	$V_A = V_{R0}$	$A = 1$

Postupak A/D konverzije analogne vrijednosti od 11V

A/D konvertor sa vremenskim ekvivalentom

Ovakvi konvertori spadaju u A/D konvertore koji koriste princip kvant po kvant. Konverzija se svodi na mjerenje ulaznog analognog napona pomoću napona kvanta i određivanja koliko se puta napon kvanta nalazi u ulaznom analognom signalu. Vrijeme konverzije je proporcionalno sa vrijednošću ulaznog analognog napona i veće je što je veći ulazni analogni napon.

Kod A/D konvertora sa vremenskim ekvivalentom se ulazni analogni naponski signal poredi sa interno generisanim kontinualnim naponom koji linearno raste. Pomoću odgovarajućeg vremenskog kvanta (koji odgovara naponskom kvantu) mjeri se vrijeme koje je potrebno da interni linearni napon dostigne vrijednost ulaznog analognog napona. Tako se dobije potrebna digitalna vrijednost. Proces konverzije obuhvata dva postupka: transformaciju mjerene veličine (ulaznog analognog napona) u odgovarajući vremenski interval i mjerenje dobijenog vremenskog interval pomoću vremenskog kvanta. A/D konvertor sa vremenskim ekvivalentom je prikazan na sljedećoj slici.



A/D konvertor sa vremenskim ekvivalentom

Osnovni elementi konvertora su naponski komparator, binarni brojač, kontrolni flipflop i generator linearno rastućeg napona. Generator linearno rastućeg napona je sklop sa tranzistorima TR_1 , TR_2 i kondenzatorom C . Ulazni analogni napon V_A se dovodi na jedan ulaz komparatora. Na drugi ulaz se dovodi linearno rastući referentni napon V_R . Binarni brojač broji takt signale P_T za vrijeme dok referentni napon V_R ne dostigne

vrijednost ulaznog analognog napona V_A . Tada je process konverzije završen, a stanja binarnog brojača predstavljaju odgovarajuću digitalnu vrijednost.

Da bi se ostvarila linearna zavisnost između veličine ulaznog napona i trajanja vremenskog intervala, referentni napon V_R treba da se mijenja linearno sa vremenom. Napon V_R raste linearno, a generiše ga integrator, koga čine kondenzator C i tranzistor TR_1 . Kondenzator C se puni konstantnom strujom kolektora tranzistora TR_1 . Tranzistor TR_2 služi kao prekidač preko koga se vrši resetovanje, odnosno pražnjenje kondenzatora C , nakon završetka konverzije. Prije svakog ciklusa konverzije treba resetovati ne samo kondenzator nego i brojač.

Ciklus konverzije započinje setovanjem kontrolnog flipflopa. Visoki napon na izlazu Q isključuje transistor TR_2 . Napon na kondenzatoru V_R raste linearno sa vremenom jer se kondenzator C puni konstantnom strujom. Istovremeno je omogućeno brojanje binarnog brojača. Napon V_R na kondenzatoru C će linearno rasti prema vrijednosti analognog napona V_A . Sve dok je $V_A > V_R$ na komparatorском izlazu K postoji visoki nivo. Punjenje kondenzatora i brojanje taktних impulsa traje sve dok V_R ne bude jednak V_A , čime se završava ciklus konverzije. Rezultat brojanja binarnog brojača predstavlja digitalni ekvivalent ulazne analogne vrijednosti. Tada signal na izlazu komparatora prelazi na nizak nivo što uključuje TR_2 i preko njega se prazni kondenzator C i vrši priprema konvertora za sljedeću konverziju.

Struja punjenja kondenzatora C je konstantna, to je struja generatora konstantne struje sa tranzistorom TR_1 i zener diodom DZ , i iznosi:

$$I_P = \frac{V_Z - V_{EB1}}{R},$$

gdje je V_Z radni napon zener diode.

Vremenska zavisnost referentnog napona je:

$$V_R(t) = \frac{V_Z - V_{EB1}}{RC} \cdot t.$$

Na sljedeći način se određuje trajanje vremenskog T intervala koji odgovara vrijednosti ulaznog analognog napona V_A :

$$V_R(t) = V_A \Rightarrow T = RC \frac{V_A}{V_Z - V_{EB1}}.$$

Ako se taj vremenski interval kvantuje (mjeri) periodom taktnog generatora T_P , može se odrediti koliko on sadrži intervala N taktnog generatora. Iz jednakosti:

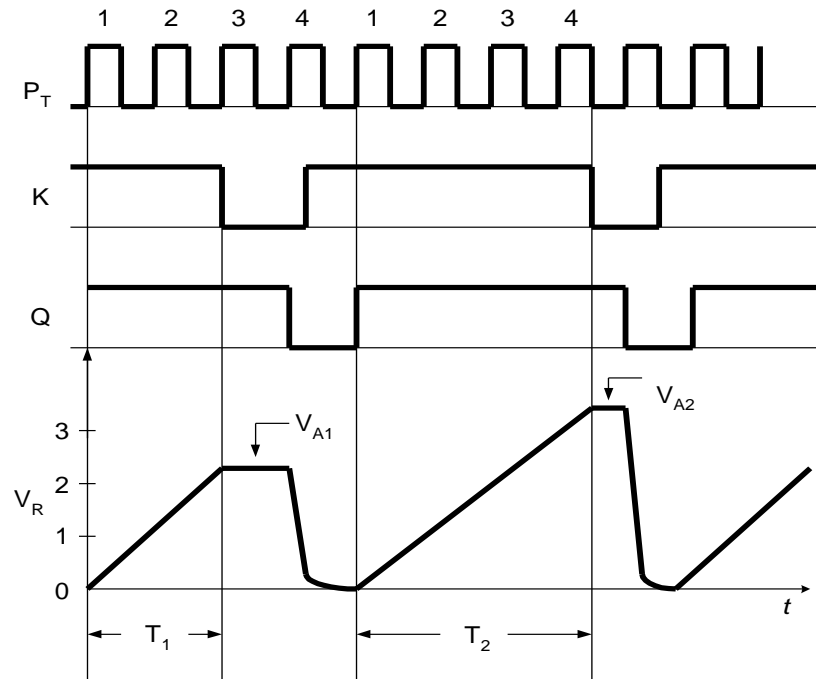
$$T = RC \frac{V_A}{V_Z - V_{EB1}} = NT_P,$$

dobija se da je:

$$V_A = (V_Z - V_{EB1}) \frac{T_P}{RC} N = K \cdot N.$$

Analogni ulazni napon V_A je proporcionalan broju odbrojanih impulsa N u brojaču, što znači da je tako određena odgovarajuća digitalna vrijednost.

Na sljedećoj slici su prikazani impulsi signali u pojedinim tačkama opisanog A/D konvertora.



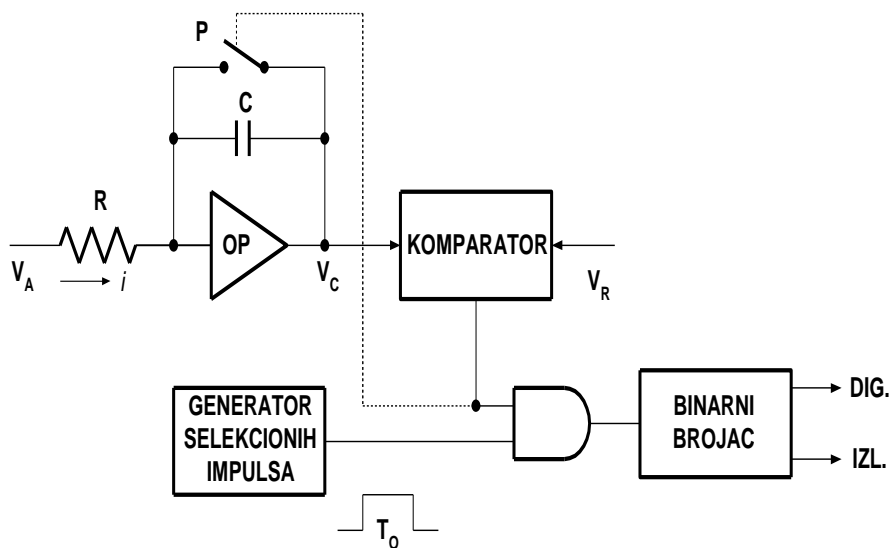
Impulsi signali A/D konvertora sa vremenskim ekvivalentom.

A/D konvertor sa frekvencijskim ekvivalentom

I takvi konvertori spadaju u A/D konvertore koji koriste princip kvant po kvant. Konverzija se, takodje, svodi na mjerenje ulaznog analognog napona pomoću napona kvanta i određivanja koliko se puta napon kvanta nalazi u ulaznom analognom signalu.

A/D konverzija sa frekvencijskim ekvivalentom (sa frekvencijskom kvantizacijom) sadrži dva postupka: pretvaranje napona u učestanost i kvantizacija (mjerenje) dobijene učestanosti. Prvi postupak je poznat pod imenom naponsko-frekvencijska konverzija, a drugi nije ništa drugo do brojanje frekvencijskih ciklusa binarnim brojačem u određenom vremenskom intervalu. Naponsko-frekvencijska konverzija se ostvaruje pomoću impulsnog generatora čija je učestanost funkcija mjerenog ulaznog analognog napona. I ovdje se najčešće koriste integratorska kola slična onima kod A/D konverzije sa vremenskim ekvivalentom (vremenskom kvantizacijom).

Na sljedećoj slici je dat principijelni prikaz A/D konvertora sa frekvencijskim ekvivalentom.



A/D knvertor sa frekvencijskim ekvivalentom

A/D konvertor se sastoji od integratora, naponskog komparatora, binarnog brojača i generatora selekcionih impulsa. Integrator čine operacioni pojačavač OP, kondenzator C i otpornik R.

Kada se na ulaz integratora dovede analogni ulazni napon V_A na njegovom izlazu se generiše linearno promjenljivi napon V_C prema sljedećem izrazu:

$$V_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{V_A}{RC} \cdot t.$$

Ako se sa T_1 označi vrijeme za koje taj napon dostigne vrijednost referentnog napona V_R , onda je:

$$T_1 = RC \frac{V_R}{V_A}.$$

Pri izjednačavanju napona V_C sa V_R komparator K generiše na svom izlazu impuls, koji aktivira prekidač P za pražnjenje (resetovanje) kondenzatora C . Po završenom pražnjenju kondenzatora prekidač P se ponovo otvara i na izlazu pojačavača se ponovo generiše napon $V_C(t)$. Na taj način se generiše testerasti napon $V_C(t)$ čija je amplituda ograničena vrijednošću referentnog napona V_R , a nagib je funkcija analogne ulazne vrijednosti V_A . Ako se sa T_2 označi vrijeme resetovanja kondenzatora C , uz pretpostavku da to resetovanje traje vrlo kratko (tada je $T_2 \ll T_1$), onda se generisani testerasti napon periodično ponavlja u vremenskim intervalima T :

$$T = T_1 + T_2 \approx T_1,$$

pa je :

$$V_A \approx RC \cdot V_R \cdot f,$$

gdje je

$$f = 1 / T_1.$$

To pokazuje da je dovedeni ulazni analogni napon V_A proporcionalan frekvenciji f ponavljanja testerastog napona V_C , odnosno da je analogni napon V_A transformisan u frekvenciju (izvršena je naponsko-frekvencijska konverzija).

Da bi se odredio digitalni ekvivalent analognog ulaznog signala potrebno je izvršiti kvantovanje (mjerjenje) dobijene učestanosti. To se realizuje pomoću binarnog brojača na koji se dovode impulsi sa izlaza komparatora u toku trajanja selekcionog impulsa T_0 odgovarajućeg trajanja. Brojač broji impulse sa izlaza komparatora za vrijeme dok je selekциони impuls na visokom nivou i tako mjeri frekvenciju generisanih impulsa. Ako se sa N označi broj impulsa koji dodju na ulaz brojača u toku selekcionog impulsa T_0 , onda se može pisati da je:

$$V_A \approx \frac{RC}{T_0} \cdot V_R N = K \cdot N,$$

jer je

$$f = \frac{N}{T_0}.$$

Iz ovoga se vidi da je analogni napon na ulazu konvertora proporcionalan broju impulsa koje primi i izbroji binarni brojač. Prema tome, sadržaj binarnog brojača predstavlja digitalni ekvivalent ulaznog analognog napona.

Osnovne karakteristike A/D konvertora

I kod A/D konvertora se koriste slične karakteristike kao i kod D/A konvertora. U osnovne karakteristike A/D konvertora spadaju: rezolucija, ulazni napon pune skale, maksimalna greška, linearnost i vrijeme uspostavljanja izlaznih stanja.

Rezolucija je određena brojem bita u izlaznom digitalnom podatku. To je ukupan broj izlaznih digitalnih stanja i mogući broj ulaznih analognih stanja A/D konvertora. Ako je broj izlaznih bita konvertora jednak n onda je rezolucija tog konvertora jednaka 1 od 2^n , što se često izražava u procentima kao $1/2^n \cdot 100$. Ako je npr. broj izlaznih bita $n=8$ onda je rezolucija 1 od 256 (jer je $2^8=256$), a izraženo u procentima to je $1/256 \cdot 100 = 0,39\%$.

Ulazni napon pune skale je vrijednost maksimalnog ulaznog napona A/D konvertora za slučaj kada su svi izlazni biti konvertora u stanju logičke 1 .

Maksimalna greška je razlika između potrebne i stvarno dobivene digitalne vrijednosti na izlazu A/D konvertora. Ona se često naziva osjetljivošću konvertora. Ona je uvijek manja (podešava se da ne može biti veća) od $\pm 1/2$ vrijednosti napona koji odgovara vrijednosti bita najniže težine (naponskog kvanta) konvertora.

Linearnost pokazuje koliko vrijednost digitalnog napona na izlazima A/D konvertora odstupa od potpuno linearne zavisnosti analognog napona na ulazu (naziva se još i greškom linearizacije). Idealno, ona nije veća od ± 1 vrijednosti napona koji odgovara vrijednosti bita najniže težine (naponskog kvanta) konvertora.

Vrijeme uspostavljanja izlaznih stanja je vrijeme koje je potrebno da se uspostave izlazna digitalna stanja A/D konvertora nakon promjene analogne vrijednosti na ulazu konvertora. Taj parametar odražava brzinu funkcionisanja A/D konvertora. Često se naziva vremenom konverzije A/D konvertora.

PRIMJENA D/A I A/D KONVERTORA

D/A konvertori i A/D konvertori se praktično koriste svugdje gdje je potrebno ostvariti vezu između analognog promjenljivih signala i digitalnih sistema. To su situacije i sistemi kada se vrši digitalno prikupljanje, obrada i prenos analognog promjenljivih signala ili digitalno upravljanje procesima, objektima, uređajima, mašinama. Praktično u najpoznatije i najšire oblasti primjene A/D i D/A konvertora spadaju:

- mjerno–regulacioni uređaji i sistemi,
- snimanje, obrada, prenos i reprodukcija tona i slike,
- sistemi za prikupljanje, obradu i prenos podataka.

U zavisnosti od dinamike promjena pojava (analognih signala) koje se digitalizuju i obrađuju primjenjuju se A/D i D/A konvertori odgovarajuće brzine. Tako se npr. za obradu video slike u radarskim i TV sistemima koriste najbrži konvertori. Za audio sisteme, prenos i obradu zvučnih signala, koriste se konvertori srednjih brzina. U sistemima upravljanja, zavisno od potrebne brzine upravljanja, uglavnom se koriste konvertori srednje ili male brzine.

Zajedničko za sve A/D i D/A konvertore je da uglavnom imaju mogućnost sprege sa računarima i mikroračunarima, jer se sve više praktično koriste računarski ili mikroračunarski sistemi u svim prethodno navedenim primjenama A/D i D/A konvertora.