1. UVOD U DIGITALNE SKLOPOVE

Razvoj i primjene digitalnih sklopova povezuju se s razvojem poluvodičke tehnike i digitalnih računala. Mogućnosti današnjih računala nezamislive su bez tehnoloških dostignuća u razvoju poluvodičke tehnike i digitalnih sklopova. Uz računarsku tehniku digitalni sklopovi postupno imaju sve veću primjenu u ostalim područjima tehnike: mjernoj tehnici, audiotehnici i videotehnici, komunikacijama te upravljanju industrijskim i drugim procesima. Osobito se primjena digitalnih sklopova širi u posljednja dva desetljeća prošloga stoljeća. Danas je njihova primjena u svim područjima tehnike nezaobilazna. Zahvaljujući primjeni digitalnih sklopova, mogućnosti pojedinih uređaja razvijene su do mogućnosti i svojstava nezamislivih do unatrag nekoliko godina.

Slika 1.1. Mediji za snimanje fotografija

Još prije nekoliko godina digitalni fotoaparat i fotografija u usporedbi s fotografijom dobivenom klasičnim refleksnim fotoaparatom nisu bili vrijedni spomena. Danas je kvaliteta digitalne fotografije ravna fotografiji dobivenoj klasičnim fotoaparatom, a mogućnosti obrade digitalne fotografije računalom i kapaciteti digitalnih medija za snimanje su neusporedivi. Dok se na klasični film može snimiti 36 fotografija, na digitalni ih se medij može snimiti nekoliko stotina (slika 1.1.). Digitalne snimke mogu se pohraniti na druge medije i time osloboditi medij za snimanje novih fotografija. Može se reći da je praktično kapacitet digitalnih medija za snimanje fotografija neograničen. Da bi klasična fotografija ugledala svjetlo dana, potrebno je složenim kemijskim postupkom provesti razvijanje filma i zatim isto tako složenim postupkom izraditi fotografije što većina pojedinaca nije u mogućnosti samostalno obaviti. Rezultat snimanja na digitalni medij odmah je vidljiv na zaslonu digitalnoga fotoaparata, može se pogledati na zaslonu računala ili projekcijskom platnu, a kvalitetnu fotografiju moguće je izraditi samostalno kvalitetnim pisačima, cijenom dostupnima velikom broju ljudi.

Do sličnih zaključaka može se doći uspoređujući analogne i digitalne nosače zvuka, gramofonsku ploču poznatu po kratici LP i optički nosač zvuka popularno zvan CD (slika 1.2.), analogno i digitalno snimanje pokretnih slika (VHS i DVD) itd. Ukupni kapacitet gramofonske ploče u prosjeku iznosi oko 50 minuta glazbe snimljene na obje strane. Kapacitet optičkog nosača zvuka je 80 minuta glazbe snimljene samo na jednoj strani nosača. Gramofonska ploča izuzetno je osjetljiva na mehanička oštećenja i već nakon nekoliko slušanja uz najpažljiviji postupak gubi na kvaliteti (smanjuje se frekvencijski opseg i rastu popratni šumovi). Dimenzije optički snimljenoga digitalnoga nosača zvuka iznose oko petine gramofonske ploče. Kvalitetni uređaji za reprodukciju gramofonske ploče skupi su i neki njihovi dijelovi (gramofonska igla) podložni brzom trošenju. Današnji kvalitetni uređaji za reprodukciju optički zapisanoga zvuka cijenom su kudikamo pristupačniji i neusporedivo dužega vijeka trajanja.

Slika 1.2. Nosači analogno i digitalno snimljenog zvuka

Analogni i digitalni signali

Analogni mjerni instrument (slika 1.3.) pokazuje vrijednost mjerne veličine otklonom kazaljke koji je razmjeran mjernoj veličini. Mjerna veličina na ulazu analognog instrumenta je analogni signal. Osnovna značajka analognoga signala je njegova neprekinutost (kontinuiranost).

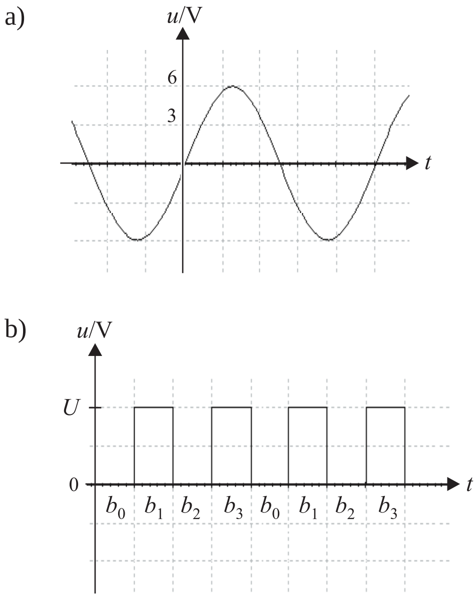
Slika 1.3. Analogni multimetar

Digitalni mjerni instrument (slika 1.4.) pokazuje vrijednost mjerne veličine brojčano, tj. znamenkama. Otud i potječe naziv za digitalne signale, sklopove, instrumente i sustave (engl. digit znači znamenka).

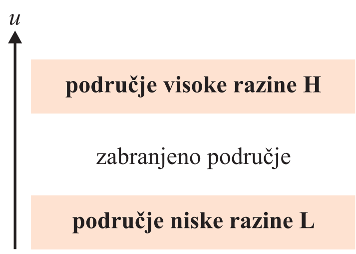
Mjerna veličina na ulazu digitalnog instrumenta najprije se pretvara iz analognog signala u digitalni. Digitalni signal čine kombinacije diskretnih stanja promatrane veličine, tj. impulsi. Ako se radi o naponu, onda on može imati jednu od samo dvije moguće vrijednosti. Te vrijednosti su najčešće 0 volta i *U* volta.

Slika 1.4. Digitalni multimetar

Na slici 1.5.a prikazan je sinusoidni napon amplitude 6 V. Digitalni prikaz amplitude toga napona pokazan je na slici 1.5.b. Vidi se da u digitalnomu signalu napon može poprimiti jednu od svega dvije moguće vrijednosti. To su vrijednosti visoke razine H (od engl. high) i vrijednost niske razine L (od engl. low). Vrijednosti napona između razina H i L signal ne može imati. Naponi niske i visoke razine mogu odstupati od nominalnih vrijednosti pa se govori o područjima niske i visoke razine (slika 1.6.). Praktične vrijednosti napona niske razine iznose između 0 i 0,8 V, a visoke razine između 2 i 5 V.

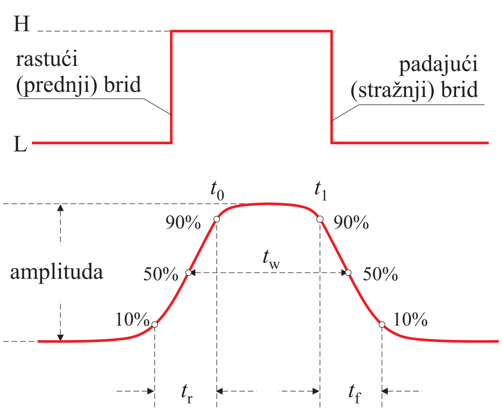


Slika 1.5. Analogni i digitalni signal



Slika 1.6. Područja napona u digitalnim sklopovima

Dio digitalnog signala u kojemu napon prelazi iz vrijednosti niske razine u vrijednost visoke razine naziva se **rastući** ili **prednji brid** impulsa (engl. leading edge). Dio digitalnog signala u kojemu napon prelazi iz vrijednosti visoke razine u vrijednost niske razine naziva se **padajući** ili **stražnji brid** impulsa (enhl. trailing edge). U stvarnosti je potrebno određeno vrijeme da napon od vrijednosti niske razine poprimi vrijednost visoke razine i obrnuto. Ta vremena nazivaju se **vrijeme porasta t_r** (engl. rise time) i **vrijeme pada t_f** (engl. fall time).



Slika 1.7. Idealni i stvarni oblik impulsa

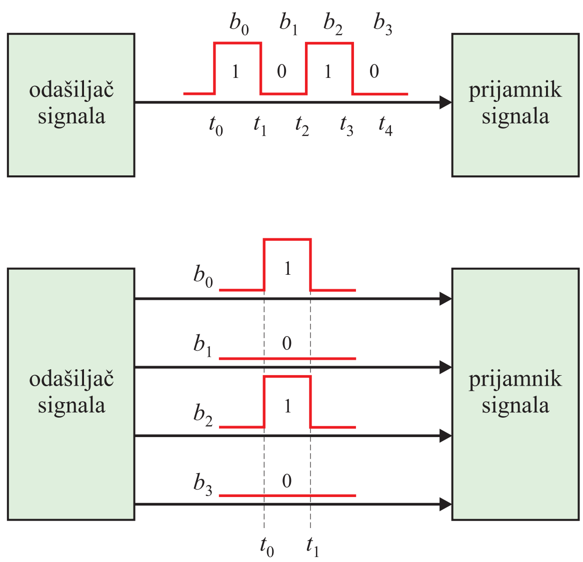
Vrijeme porasta je vrijeme koje je potrebno da napon od vrijednosti koja iznosi 10% od amplitude impulsa dostigne vrijednost od 90% amplitude impulsa. Vrijeme pada je vrijeme koje je potrebno da napon od vrijednosti koja iznosi 90% od amplitude impulsa dostigne vrijednost od 10% amplitude impulsa.

Vrijeme trajanja t_w impulsa, odnosno **širina impulsa** (engl. pulse width) jest vrijeme od trenutka kad napon dostigne iznos 50% od amplitude impulsa pa do trenutka kad napon padne na iznos 50% od amplitude impulsa (slika 1.7.).

Ako se naponu niske razine dodijeli znamenka 0, a naponu visoke razine znamenka 1, digitalni signali mogu se prikazati pomoću znamenki **binarnoga brojevnoga sustava** pa se takvi signali nazivaju binarnima. Znamenke binarnoga sustava nazivaju se **bitovi**. Iz primjera sa slike 1.6. vidi se da se digitalni signal prikazuje s pomoću skupine bitova. Osnovna skupina bitova naziva se riječ. Veličine riječi u digitalnim sustavima mogu biti 8, 16, 32 i više bitova. U praksi je uobičajen naziv **bajt** (engl. byte) za skupinu od 8 bitova.

Prijenos binarnih signala

Binarni signali mogu se prenositi **serijski** ili **paralelno** (slika 1.8.). Pri serijskom prijenosu bitovi digitalnoga signala prenose se jedan za drugim. U intervalu od t_0 do t_1 prenosi se prvi bit, u intervalu od t_1 do t_2 drugi bit itd. Pri paralelnom prijenosu prenose se svi bitovi digitalnoga signala istodobno. Svaki bit signala ima svoju prijenosnu liniju. Prednost serijskoga prijenosa je potreba jedne prijenosne linije, a nedostatak sporiji prijenos. Za paralelni prijenos potrebno je više linija ali je prijenos brži. Primjer serijskoga prijenosa digitalnih signala je između računala i miša, a paralelnoga između računala i pisača (slika 1.9.).



Slika 1.8. Prijenos binarnih signala

Slika 1.9. Spoj računala s pisačem i mišem

Integrirani digitalni sklopovi

Digitalni sklopovi danas se proizvode isključivo u integriranoj izvedbi. Sve komponente sklopa izvedene su na jednoj pločici silicija zatvorenoj u odgovarajuće kućište. Kućišta mogu biti različitog oblika s različitim brojem priključaka (izvoda), plastična ili keramička. Sama kućišta znatno su većih dimenzija od integriranog sklopa. Ograničenje u izvedbi integriranih sklopova jest broj priključaka. Ovisno o broju ulaza i izlaza koje ima logički sklop, u jedno kućište moguće je smjestiti jedan osnovni logički sklop ili više njih.

Česti oblik kućišta integriranih sklopova je **dvolinijsko kućište** (engl. dual-in-line package, skraćeno DIP, slika 1.10a). Sve više se proizvode digitalni sklopovi u kućištima za **tehnologiju površinske montaže** (engl. surface-mount technology, skraćeno SMT). Nekoliko tipova takvih kućišta pokazano je na slici 1.10b.

a)

b)

Slika 1.10. Primjeri izvedbi kućišta integriranih digitalnih sklopova

Danas se proizvodi mnogo različitih sklopova u jednom kućištu, od osnovnih logičkih do čitavih uređaja. Osnovni integrirani logički sklopovi sadrže manji broj integriranih elemenata (do 100) i nazivaju se sklopovi niskog stupnja integracije (engl. SSI, skraćeno od Small Scale Integration).

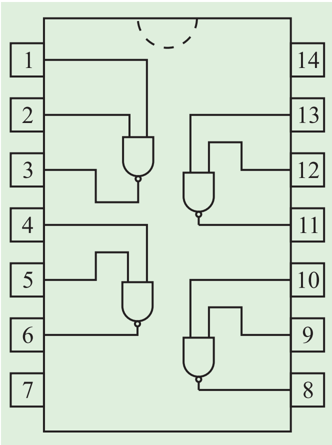
Složeniji integrirani sklopovi (brojila, registri, dekoderi) sadrže veći broj integriranih elemenata (od 100 do 1000) i nazivaju se sklopovi srednjeg stupnja integracije (engl. MSI, skraćeno od Medium Scale Integration). Još veći broj elemenata (od 1000 do 100000) sadrže sklopovi visokog stupnja integracije (engl. LSI, skraćeno od Large Scale Integration). među njih spadaju memorije i mikroprocesori.

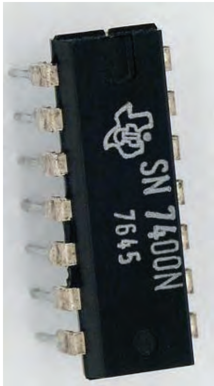
Sklopovi s više od 100000 integriranih elemenata nazivaju se sklopovima vrlo visokog stupnja integracije (engl. VLSI, skraćeno od Very Large Scale Integration). Tu spadaju memorije i mikroprocesori. U posljednje vrijeme proizvode se sklopovi s još većim brojem elemenata koji se svrstavaju pod naziv sklopovi ultravisokog stupnja integracije (engl. ultra large-scale integration, skraćeno ULSI).

Svi integrirani digitalni sklopovi mogu se svrstati u nekoliko skupina. Za sklopove unutar neke skupine karakteristično je da su prilagođeni za međusobno spajanje, što omogućuje relativno jednostavnu gradnju složenih digitalnih uređaja.

Skupine integriranih sklopova s bipolarnim tranzistorima poznate su pod nazivima TTL i ECL, a skupine s unipolarnim tranzistorima su CMOS i NMOS. O značajkama digitalnih sklopova pojedinih skupina govori se u trećem poglavlju kad se obrađuju skupine integriranih sklopova.

Pri radu s integriranim sklopovima neophodno je poznavati raspored priključaka ili dijagram spajanja (engl. pin connection diagram, pin assignment, pin description, pin configuration). Iz njega se vide funkcije izvoda integriranoga sklopa. Postupak brojenja izvoda za DIP kućišta vidi se iz prikaza na slici 1.11.





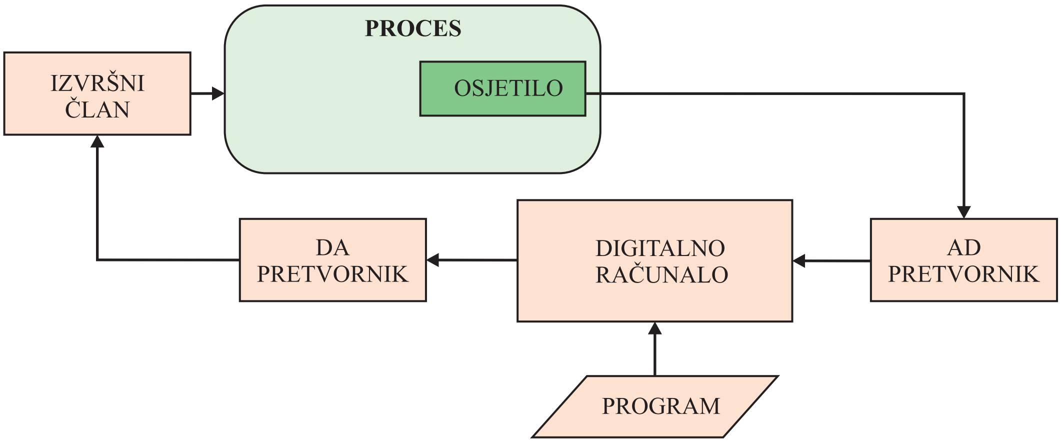
7 – GND, 14 – V_{CC}

Slika 1.11. Raspored izvoda integriranoga digitalnoga sklopa (pogled odozgo)

Priključci označeni s U_{CC}, odnosno V_{CC} (engl. voltage) i GND (engl. ground) služe za spajanje zajedničkoga napona napajanja za sve sklopove unutar jednoga kućišta. Na priključak V_{CC} spaja se pozitivni pol izvora napajanja, a na priključak GND negativni pol.

Sustav za digitalno upravljanje

Poopćeni i pojednostavnjeni prikaz digitalnog uređaja, odnosno sustava za digitalno upravljanje pokazan je na slici 1.12. Odvijanjem nekoga procesa mijenjaju se njegove karakteristične veličine. To mogu biti pomak, brzina, temperatura, tlak, protok itd. Osjetilo (senzor) mjeri te promjene i šalje ih analogno-digitalnom pretvorniku. AD-pretvornik daje signalu digitalni oblik nakon čega signal dolazi u računalo na obradu. Da bi računalo moglo obaviti potrebnu obradu, mora mu se staviti na raspolaganje potrebna programska potpora (softver) kojim se određuje što i kako se u promatranom procesu mora mijenjati. Digitalni signal se iz računala dovodi u digitalno-analogni pretvornik koji ga vraća u analogni oblik. Signal se dovodi na izvršni član, koji će u željenom opsegu djelovati na promjene u procesu.



Slika 1.12. Opći prikaz sustava za digitalno upravljanje

PREGLED KLJUČNIH POJMOVA

bajt - skupina od osam bitova koja čini dio digitalnoga signala

bit - binarna znamenka, znamenka binarnoga brojevnoga sustava

dvolinijsko kućište (DIP) - tip kućišta integriranih (digitalnih) sklopova

padajući ili stražnji (zadnji) brid - dio digitalnog signala u kojemu napon prelazi iz vrijednosti visoke razine u vrijednost niske razine

paralelni prijenos - prijenos digitalnoga signala pri kojemu se svi bitovi digitalnoga signala prenose istodobno, svaki bit signala ima svoju prijenosnu liniju

prednji ili rastući brid - dio digitalnog signala u kojemu napon prelazi iz vrijednosti niske razine u vrijednost visoke razine.

serijski prijenos - prijenos digitalnoga signala pri kojemu se bitovi digitalnoga signala prenose jedan za drugim u određenim vremenskim intervalima

tehnologija površinske montaže (SMT) - tehnika montaže integriranih komponenata na tiskanu pločicu kojom se izvodi integriranoga sklopa leme izravno na površinu tiskane pločice na istoj strani na kojoj se nalazi sklop bez izrade provrta na tiskanoj pločici

vrijeme pada - vrijeme koje je potrebno da napon od vrijednosti koja iznosi 90% od amplitude impulsa dostigne vrijednost od 10% amplitude impulsa

vrijeme porasta - vrijeme koje je potrebno da napon od vrijednosti koja iznosi 10% od amplitude impulsa dostigne vrijednost od 90% amplitude impulsa

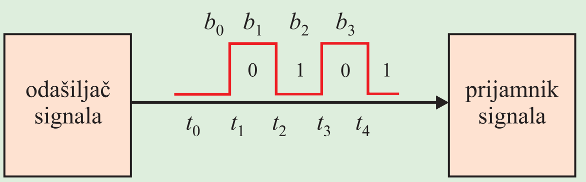
vrijeme trajanja ili širina impulsa - vrijeme od trenutka kad napon dostigne iznos 50% od amplitude impulsa pa do trenutka kad napon padne na iznos 50% od amplitude impulsa

DODATNA LITERATURA ZA UČENIKE

U. Peruško, *Digitalna elektronika*, (1. Uvodni pojmovi), Školska knjiga, Zagreb, 1991.

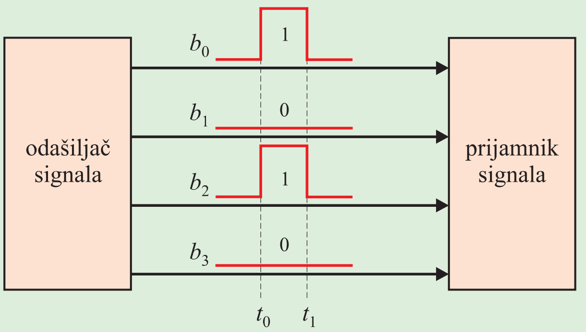
PITANJA I ZADATCI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Za digitalni signal prikazan u serijskom prijenosu (slika 1. 13.) nacrtajte prikaz za paralelni prijenos.



Slika 1.13. Serijski prijenos digitalnoga signala

2. Za digitalni signal prikazan u paralelnom prijenosu (slika 1. 14.) nacrtajte prikaz za serijski prijenos.



Slika 1.14. Paralelni prijenos digitalnoga signala

3. Za impuls sa slike 1.15. odredite vrijeme porasta, vrijeme pada i vrijeme trajanja.

Slika 1. 15. Stvarni impuls

4. Po čemu se razlikuju dvolinijsko kućište i kućište sklopova za površinsku montažu?

2. BROJEVNI SUSTAVI I KODOVI

U uvodnome poglavlju pokazano je da se električne veličine u digitalnim sklopovima prikazuju s pomoću znamenaka binarnoga brojevnoga sustava. Zbog toga je za razumijevanje rada i svojstava digitalnih sklopova i sustava potrebno poznavanje brojevnih sustava i kodova na kojima se temelji prikaz digitalnih signala. Stoga se u prvom dijelu ovoga poglavlja obrađuju brojevni sustavi, a u drugome kodovi.

2.1. BROJEVNI SUSTAVI

Najvažniji brojevni sustavi koje je potrebno poznavati da bi se razumio rad digitalnih sklopova i sustava, jesu binarni i heksadekadni brojevni sustav. Uz te brojevne sustave na početku ovoga poglavlja govori se o dekadnom brojevnom sustavu kako bi se olakšao pristup binarnom i heksadekadnom sustavu.

Dekadni brojevni sustavi

U dekadnom brojevnom sustavu (engl. decimal number system) ima deset znamenaka: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9, što znači da se svi brojevi od nula do devet mogu prikazati jednom znamenkom. To su jednoznamenkasti brojevi. Najveći broj koji se može napisati jednom znamenkom jest devet. Za broj deset nema znamenke pa se taj broj piše kombinacijom dviju znamenaka 10. S pomoću dviju znamenaka mogu se napisati svi brojevi od deset do devedeset devet. To su dvoznamenkasti brojevi. Za veće brojeve potrebne su tri znamenke ili više njih. Općenito se može reći da najveći broj koji se može napisati s n znamenaka iznosi $\mathbf{10^n - 1}$.

Položaj znamenke u bilo kojemu broju naziva se **brojno mjesto**. Svako brojno mjesto ima svoju vrijednost, odnosno težinu. **Težine brojnih mjesta** u dekadnom brojevnom sustavu mogu se prikazati kao potencije broja deset (broj znamenaka u sustavu). Zato se kaže da je deset **osnovica** ili **baza** dekadnoga brojevnog sustava. Najniže cjelobrojno mjesto ima težinu $10^0 = 1$. Težine viših brojnih mjesta iznose $10^1 = 10$, $10^2 = 100$, $10^3 = 1000$ itd. Težine mjesta desno od decimalnog zareza iznose 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3} itd.

Primjer 2.1.

$$\left.\begin{array}{l}10^2 = 100\\ 10^1 = 10\\ 10^0 = 1\\ 10^{-1} = 0{,}1\end{array}\right\}\text{ težine mjesta}$$

$$432{,}5 = 4 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0 + 5 \cdot 10^{-1}$$

znamenka najmanje težine mjesta
decimalni zarez, točka
znamenka najveće težine mjesta

U dekadnome brojevnom sustavu brojevi se prikazuju nizom znamenki koje označavaju **koeficijente** kojima se množi baza sustava dignuta na potenciju pripadnoga brojnog mjesta. Krajnja desna znamenka broja je **znamenka najmanje težine** brojnog mjesta (engl. least significant digit), a krajnja lijeva je **znamenka najveće težine mjesta** (engl. most significant digit). Pri pisanju brojeva pišu se samo koeficijenti, a težine mjesta određuju se prema položaju koeficijenata.

Binarni brojevni sustav

Binarni brojevni sustav (engl. binary number system) ima samo dvije znamenke: 0 i 1. Zato je već za pisanje broja dva potrebno koristiti se kombinacijom dviju binarnih znamenaka. Stoga se broj dva u binarnom sustavu piše 10. Najveći dvoznamenkasti broj u binarnome brojevnom sustavu je 11, što odgovara decimalnom broju tri. Najveći broj koji se uopće može napisati s n znamenaka iznosi $\mathbf{2^n - 1}$.

Osnovica binarnoga brojevnog sustava je dva. Prema tome, težine cjelobrojnih mjesta u binarnome brojevnom sustavu su $2^0 = 1$, $2^1 = 2$, $2^2 = 4$, $2^3 = 8$ itd. Brojna mjesta desno od binarnog zareza imaju težine 2^{-1}, 2^{-2}, 2^{-3} itd. Za znamenke binarnoga brojevnog sustava (binarne znamenke) vrlo često se upotrebljava naziv **bit** (skraćeno od engl. binary digit).

Primjer 2.2.

$$\left.\begin{array}{l}2^3 = 8\\ 2^2 = 4\\ 2^1 = 2\\ 2^0 = 1\\ 2^{-1} = 0{,}5\end{array}\right\}\text{ težine mjesta}$$

$$1010{,}1 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1}$$

znamenka najmanje težine mjesta
binarni zarez, točka
znamenka najveće težine mjesta

Dakle, i u binarnome brojevnom sustavu brojevi se prikazuju nizom znamenaka koje označuju koeficijente kojima se množi baza sustava dignuta na potenciju koja odgovara brojnom mjestu. Pri pisanju brojeva pišu se samo koeficijenti, a težine mjesta određuju se prema položaju koeficijenata.

Krajnja desna znamenka binarnog broja je **binarna znamenka najmanje težine brojnog mjesta** (engl. least significant bit, skraćeno LSB). Krajnja lijeva znamenka binarnog broja je **binarna znamenka najveće težine brojnog mjesta** (engl. most significant bit, skraćeno MSB).

Tablica 2.1. Prikaz binarnih brojeva od nula do petnaest

Binarni broj	Dekadni broj	Binarni broj	Dekadni broj
0	0	1000	8
1	1	1001	9
10	2	1010	10
11	3	1011	11
100	4	1100	12
101	5	1101	13
110	6	1110	14
111	7	1111	15

Pretvorba brojeva između binarnog i dekadnoga brojevnog sustava

Broj iz binarnog brojevnoga sustava pretvara se u odgovarajući broj dekadnoga sustava tako da se svaka znamenka binarnog broja pomnoži sa svojom težinom mjesta i tako dobiveni iznosi zbroje.

Primjer 2.3.

Pretvorba binarnog broja 1011011 u dekadni

$$101101_2 = 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$$
$$= 1 \cdot 32 + 1 \cdot 8 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 1 = 45_{10}$$

Jedan od načina pretvorbe dekadnoga broja u binarni provodi se uzastopnim dijeljenjem dekadnoga broja s 2. Ako se pri dijeljenju dobije ostatak, znamenka binarnog broja je 1, a ako ostatka nema, znamenka je 0. Prvo dijeljenje daje znamenku najnižega brojnog mjesta.

Primjer 2.4.

Pretvorba dekadnoga broja 57 u binarni

57 : 2 = 28 + ostatak 1
28 : 2 = 14 + ostatak 0
14 : 2 = 7 + ostatak 0
7 : 2 = 3 + ostatak 1
3 : 2 = 1 + ostatak 1
1 : 2 = 0 + ostatak 1

$$57_{10} = 1\,1\,1\,0\,0\,1_2$$

Heksadekadni brojevni sustav

Osnovica **heksadekadnoga brojevnog sustava** (engl. hexadecimal number system) je 16, odnosno sustav ima 16 znamenaka. Za znamenke od nula do devet rabe se znamenke dekadnoga brojevnog sustava. Kako za znamenke deset do petnaest ne postoje simboli, rabi se šest slova abecede: A, B, C, D, E, i F.

Tablica 2.2. Znamenke heksadekadnoga brojevnoga sustava

Heksa-dekadna znamenka	Dekadni broj	Heksa-dekadna znamenka	Dekadni broj
0	0	8	8
1	1	9	9
2	2	A	10
3	3	B	11
4	4	C	12
5	5	D	13
6	6	E	14
7	7	F	15

Primjer 2.5.

16^3
16^2
16^1
16^0

$$7B4E = 7 \cdot 16^3 + B \cdot 16^2 + 4 \cdot 16^1 + E \cdot 16^0$$

znamenka najmanje težine mjesta
znamenka najveće težine mjesta

Heksadekadni brojevni sustav upotrebljava se vrlo često u prikazivanju rada digitalnih uređaja zbog jednostavne pretvorbe u binarni brojevni sustav i obratno.

Pretvorba brojeva između heksadekadnoga i drugih brojevnih sustava

Brojevi heksadekadnoga brojevnog sustava pretvaraju se u dekadne brojeve tako da se vrijednost svake znamenke množi s težinom brojnog mjesta i dobiveni iznosi zbroje.

Primjer 2.6.

Pretvorba heksadekadnoga broja 1A2F u dekadni

$$1A2E_{16} = 1 \cdot 16^3 + A \cdot 16^2 + 2 \cdot 16^1 + E \cdot 16^0$$
$$= 1 \cdot 4096 + 10 \cdot 256 + 2 \cdot 16 + 14 \cdot 1 = 6702_{10}$$

Pretvorba dekadnoga broja u heksadekadni može se provesti istim postupkom kao i pri pretvorbi u binarni, dakle uzastopnim dijeljenjem dekadnoga broja sa 16, tj. bazom sustava. Ostatak dijeljenja označuje heksadekadne znamenke.

Primjer 2.7.

Pretvorba dekadnoga broja 217 u heksadekadni

217:16 = 13 + ostatak 9
13:16 = 0 + ostatak 13

$$217_{10} = D9_{16}$$

Broj u heksadekadnomu sustavu pretvara se u binarni broj tako da se svaka znamenka heksadekadnoga brojevnog sustava nadomjesti odgovarajućim binarnim brojem, tj. četverobitnom kombinacijom.

Primjer 2.8.

Pretvorba heksadekadnoga broja A3F u binarni.

$A3E_{16} = 1010\ 0011\ 1110$
$= 101000111110_{2}$

Za pretvorbu binarnog broja u heksadekadni potrebno je binarni broj razdijeliti u skupine od četiri binarne znamenke počevši od najnižeg mjesta. Svaka skupina binarnih znamenaka predočava se ekvivalentnom heksadekadnom znamenkom.

Primjer 2.9.

Pretvorba binarnog broja 110001101011 u heksadekadni

$110001101011_{2} = 1100\ 0110\ 1011 = C6B_{16}$

Tablica 2.3. Znamenke heksadekadnoga brojevnoga sustava i njihovi binarni ekvivalenti

Heksa-dekadna znamenka	Binarni ekvivalent	Heksa-dekadna znamenka	Binarni ekvivalent
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	A	1010
3	0011	B	1011
4	0100	C	1100
5	0101	D	1101
6	0110	E	1110
7	0111	F	1111

Prikaz brojeva s predznakom

Pozitivni i negativni brojevi ili brojevi s predznakom (engl. signed numbers) mogu se prikazati uporabom dodatnog **bita za predznak** (engl. sign bit). Za označivanje pozitivnog broja rabi se bit 0, a za negativan bit 1. Ostali bitovi čine **iznos broja** (engl. magnitude).

Iznos negativnih brojeva može se prikazati na više načina. Najčešći upotrebljavani način je uporaba komplemenata. U binarnom brojevnom sustavu **1-komplement** ili **komplement do najvećega broja** (engl. 1's-complement) nekog broja dobije se zamjenom nula u jedinice i jedinica u nule. Ako se 1-komplementu doda jedinica dobije se **2-komplement**, odnosno **komplement do baze** (engl. 2's-complement).

Primjer 2.10.

Prikaz brojeva + 66 i – 66 s pomoću bita za predznak i komplemenata

$66_{10} = 1000010_{2}$

bit predznaka
$+ 66_{10} = 0\ \underline{1000010}_{2}$
iznos

bit predznaka
$- 66_{10} = 1\ \underline{1000010}_{2}$
iznos

1-komplement od broja 1000010 je 0111101

bit predznaka
$- 66_{10} = 1\ \underline{0111101}_{2}$
iznos

2-komplement od broja 1000010 je 0111101 + 1 = 0111110

bit predznaka
$- 66_{10} = 1\ \underline{0111110}_{2}$
iznos

2.2. KODIRANJE I KODOVI

U digitalnim uređajima podatci se prikazuju s pomoću binarnih znamenaka. Da bi se uz brojeve mogli prikazivati i znakovi i slova, upotrebljavaju se kodovi. Kod je određena kombinacija binarnih znamenaka koja se dodjeljuje dekadnoj znamenki, slovu ili znaku.

Ako se kodiranjem želi prikazati znamenke dekadnoga brojevnog sustava, potrebno je koristiti se kombina-cijom od najmanje četiri bita. S četiri bita može se dobiti $2^4 = 16$ različitih kombinacija. Kako je za prikaz znamenaka dekadnoga brojevnog sustava potrebno svega 10 kombinacija, postoji više načina za kodiranje dekadnih znamenaka. Ovdje će se spomenuti BCD i excess-3 kod.

Kodovi koji omogućuju osim znamenaka i kodiranje slova i znakova, nazivaju se alfanumerički kodovi. To su kodovi s više od četiri bita kako bi se mogao dobiti potreban broj kombinacija.

BCD kod

Za kodiranje dekadnih znamenaka u BCD kodu (skraćeno od engleskog Binary Coded Decimal) upotrebljava se prvih deset kombinacija prirodnoga binarnog četverobitnog niza. To znači da se svaka dekadna znamenka prikazuje pripadnim binarnim brojem. Stoga se ovaj kod ponekad naziva i prirodni binarno dekadni kod ili kraće **NBCD kod** (od engl. natural binary coded decimal).

Primjer 2.11.

Kodiranje i dekodiranje u BCD kodu.

$753_{10} = 0111\ 0101\ 0011_{BCD}$

0011
0101
0111

$0110\ 1001\ 0100_{BCD} = 694_{10}$

6
9
4

BCD kod je **težinski kod** (engl. weighted code) jer bitovi u kombinacijama imaju težine mjesta 8, 4, 2 i 1. Zbroj težina brojevnih mjesta na kojima je binarna znamenka koda 1 daju vrijednost kodirane dekadne znamenke.

Nedostatak toga koda je što sadrži i kombinaciju 0000 pa prekid pri prijenosu podataka može biti prihvaćen kao podatak 0.

Tablica 2.4. BCD kod

Dekadna znamenka	Binarna kombinacija 8421
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001

Potrebno je razlikovati broj prikazan u binarnome brojevnom sustavu od istog broja prikazanog u binarnom kodu, iako se u oba slučaja radi o nizu bitova. Kombinacija bitova u binarnome brojevnom sustavu označuje uvijek određen broj. Kombinacija bitova u kodu može označivati broj, ali i znakove ili slova, dakle općenito neki podatak.

Primjer 2.12.

Binarna kombinacija 10000110 kao binarni broj odgovara u dekadnom sustavu broju 134. Ista kombinacija u BCD kodu odgovara dekadnom broju 86.

Excess-3 kod

Excess-3 kod razlikuje se od BCD koda i po tome što nije težinski, ali je **samokomplementirajući** (engl. selfcomplemented). To znači da se komplement bilo koje znamenke dobije zamjenom nula s jedinicama i jedinica s nulama. Osim toga, u excess-3 kodu ne pojavljuju se kombinacije sa sve četiri nule niti sve četiri jedinice, što može biti korisno za otkrivanje prekida u prijenosu podataka.

Za kodiranje dekadnih znamenaka u excess-3 kodu koristi se srednjih deset kombinacija binarnoga četverobitnoga niza, a odbacuju se tri prve i tri zadnje kombinacije.

Tablica 2.5. Excess-3 kod

Dekadna znamenka	Binarna kombinacija
0	0011
1	0100
2	0101
3	0110
4	0111
5	1000
6	1001
7	1010
8	1011
9	1100

Primjer 2.13.

Kodiranje i dekodiranje u excess-3 kodu.

$753_{10} = 1010\ 1000\ 0110_{BCD}$

0110
1000
1010

$0110\ 1001\ 0100_{BCD} = 361_{10}$

3
6
1

Alfanumerički kodovi

Kodovi koji omogućuju osim znamenki kodiranje slova i znakova, nazivaju se **alfanumerički kodovi**. To su kodovi s više od četiri bita kako bi se mogao dobiti potreban broj kombinacija.

Među alfanumeričkim kodovima najčešće je u uporabi sedmerobitni kod poznat pod nazivom **ASCII** (skraćeno od engleskog American Standard Code for Information Interchange). Kod se upotrebljava pri prijenosu podataka između računala i ulazno-izlaznih uređaja.

Primjer 2.14.

Kodiranje ASCII kodom podatka *A1a*.

	A	***1***	***a***
	100 0001	011 0001	110 0001
b7	1	0	1
b6	0	1	1
b5	0	1	0
b4	0	0	0
b3	0	0	0
b2	0	0	0
b1	1	1	1

Tablica 2.6. ASCII kod sa slovima hrvatske abecede

				B_7	0	0	0	0	1	1	1	1
				B_6	0	0	1	1	0	0	1	1
				B_5	0	1	0	1	0	1	0	1
B_4	B_3	B_3	B_1		0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	NUL	DLE	sp	0	Ž	P	ž	p
0	0	0	1	1	SOH	DCI	!	1	A	Q	a	q
0	0	1	0	2	STX	DC2	“	2	B	R	B	r
0	0	1	1	3	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0	1	0	0	4	EOT	DC4	$	4	D	T	d	t
0	1	0	1	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0	1	1	0	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0	1	1	1	7	BEL	ETB	‘	7	G	W	g	w
1	0	0	0	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1	0	0	1	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1	0	1	0	A	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1	0	1	1	B	VT	ESC	+	;	K	Š	k	š
1	1	0	0	C	FF	FS	,	<	L	Đ	l	đ
1	1	0	1	D	CR	GS	_	=	M	Ć	m	ć
1	1	1	0	E	SO	RS	.	>	N	Č	n	č
1	1	1	1	F	SI	US	/	?	O	_	o	DEL

Kodovi za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka

U digitalnim sustavima često se signali prenose preko dužih ili kraćih veza. Unatoč velikoj pouzdanosti digitalnih sklopova, moguće su povremene pojave pogrešaka u prijenosu informacija. Stoga se nameće potreba otkrivanja i ispravljanja pogreške.

Vrlo često se za siguran prijenos kodiranih podataka rabi **metoda pariteta**. Radi se o tome da se svakoj binarnoj kombinaciji kojom se prikazuje digitalni podatak dodaje jedan bit. Dodatni bit naziva se paritetni bit (engl. parity bit). Paritetni bit dodaje se tako da u kombinaciji s povećanim brojem bitova uvijek postoji isključivo paran broj jedinica (parni paritet) ili neparan broj jedinica (neparni paritet). Pogreška u prijenosu koja uzrokuje promjenu jednog bita mijenja paritet jedinica u podatku, što upućuje na pogrešku.

Primjer 2.15.

Kodiranje s parnim paritetom
Slovo *A* u ASCII kodu je 100 0001. Kombinacija ima paran broj jedinica pa je paritetni bit jednak 0 te je *A* u ASCII kodu s parnim paritetom 0100 0001.
Slovo *C* u ASCII kodu je 100 0011 što daje neparan broj jedinica. Stoga je paritetni bit 1 pa je *C* u ASCII kodu s parnim paritetom 1100 0011.

Primjer 2.16.

Kodiranje s neparnim paritetom
A u ASCII kodu je 100 0001, dakle sadrži paran broj jedinica. Prema tome, u kodu s neparnim paritetom *A* će biti 1100 0001 što daje ukupno neparan broj jedinica.
C u ASCII kodu je 100 0011, dakle sadrži neparan broj jedinica. U kodu s neparnim paritetom *C* će biti 0100 0011 što daje ukupno neparan broj jedinica.

Metodom pariteta samo se otkriva postojanje pogreške, ali ne i njezino mjesto što omogućuje ispravak pogreške. Kodovi koji omogućuju točno određivanje mjesta pogreške sastoje se od određenog broja znakovnih bitova *m* i ispitnih bitova *i*. Mjesto pogreške otkriva se višekratnim ispitivanjem na paritet određenih kombinacija znakovnih i ispitnih bitova. Broj koji se dobije tim ispitivanjem pokazuje mjesto pogreške.

Primjer koda koji omogućuje otkrivanje mjesta pogreške je **Hammingov kod** (tablica 2.7.). Znakovni bitovi m_7, m_6, m_5 i m_3 služe za prikaz dekadnih znamenki a ispitni bitovi i_4, i_2 i i_1 su dodatni bitovi za paritet.

Tablica 2.7. Hammingov kod

	m_7	m_6	m_5	i_4	m_3	i_2	i_1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	1
2	0	0	1	1	0	0	1
3	0	0	1	1	1	1	0
4	0	1	0	1	0	1	0
5	0	1	0	1	1	0	1
6	0	1	1	0	0	1	1
7	0	1	1	0	1	0	0
8	1	0	0	1	0	1	1
9	1	0	0	1	1	0	0

Ispitivanje pariteta izvodi se tri puta (slika 2.1.). U prvom ispitivanju ispituju se bitovi m_7, m_5, m_3 i i_1, u drugom ispitivanju bitovi m_7, m_6, m_3 i i_2 te u trećem ispitivanju bitovi m_7, m_6, m_5 i i_4. Ako je u ispitivanoj kombinaciji paran broj jedinica, onda se rezultat ispitivanja označuje s 0. Kad je u ispitivanoj kombinaciji neparan broj jedinica, onda se rezultat ispitivanja označuje s 1. Na taj način dobije se trobitna kombinacija *k* bitova koja označuje bitno mjesto *n* na kojemu se nalazi pogreška. Ako se ispitivanjem dobiju svi *k* bitovi 0, to znači da nema pogreške u ispitivanoj kombinaciji.

m_7	m_6	m_5	i_4	m_3	i_2	i_1		k_3	k_2	k_1
m_7		m_5		m_3		i_1				
m_7	m_6			m_3	i_2					
m_7	m_6	m_5	i_4							

Slika 2.1. Prikaz primjene Hammingova koda

Primjer 2.17.

Ispitivanje pogreške podatka 011000 s pomoću Hammingova koda

0	1	1	0	0	0	0		0	1	1
0		1		0		0	neparan broj 1			
0	1			0	0		neparan broj 1			
0	1	1	0				paran broj 1			

Ispitivanje pokazuje da je pogreška na bitnom mjestu 3, tj. u bitu m_3. To znači da je ispravna kombinacija: 0110100.

PREGLED KLJUČNIH POJMOVA

ASCII kod - sedmerobitni alfanumerički kod

BCD kod - četverobitni težinski kod s težinama mjesta 8421

binarna znamenka najnižega brojnog mjesta - binarna znamenka najmanje vrijednosti brojnog mjesta, krajnja desna znamenka binarnog broja

binarna znamenka najvišega brojnog mjesta - binarna znamenka najveće vrijednosti brojnog mjesta, krajnja lijeva znamenka binarnog broja

binarni brojevni sustav - brojevni sustav s dvije znamenke

binarni zarez - zarez koji razdvaja cjelobrojna od razlomljenih mjesta u binarnomu brojevnom sustavu

brojno mjesto - položaj znamenke u bilo kojemu broju

dekadni brojevni sustav - brojevni sustav s deset znamenaka

2-komplement ili komplement do baze, dobije se tako da se 1-komplementu doda jedinica

excess-3 kod, skraćeno XS-3 kod - četverobitni samokomplementirajući kod

heksadekadni brojevni sustav - brojevni sustav sa 16 znamenaka

1-komplement ili komplement do najvećeg broja, u binarnom brojevnom sustavu dobije se međusobnom zamjenom nula i jedinica

težina brojnog mjesta - vrijednost brojnog mjesta, može se prikazati kao potencija baze brojevnog sustava

znamenka najnižega brojnog mjesta - znamenka najmanje vrijednosti (težine) brojnog mjesta, krajnja desna znamenka broja bilo kojega brojevnog sustava

znamenka najvišega brojnog mjesta - znamenka najviše vrijednosti (težine) brojnog mjesta, krajnja lijeva znamenka broja bilo kojega brojevnog sustava

Hammingov kod - kod koji omogućuje ispravljanje pogreške

neparni paritet - dodavanje paritetnog bita binarnoj kombinaciji koda tako da je ukupan broj jedinica u kombinaciji neparan

parni paritet - dodavanje paritetnog bita binarnoj kombinaciji koda tako da je ukupan broj jedinica u kombinaciji paran

paritetni bit - dodatni bit koji se dodaje osnovnoj kombinaciji nekoga koda radi otkrivanja moguće pogreške u prijenosu

samokomplementirajući kod - kod u kojemu se kombinacija za komplement bilo koje znamenke dobije jednostavnom zamjenom nula u jedinice i jedinica u nule

težinski kod - kod u kojemu znamenke kombinacije imaju određene težine mjesta

DODATNA LITERATURA ZA UČENIKE

S. Paunović, *Digitalna elektronika 1* (1. Brojevni sustavi i kodovi), Školska knjiga, Zagreb, 2003.

U. Peruško, *Digitalna elektronika* (2. Brojevni sustavi i kodovi), Školska knjiga, Zagreb, 1991.

A. Szabo, *Impulsna i digitalna elektronika II* (16. Brojevni sustavi i kodovi), Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 1973.

PITANJA I ZADATCI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Objasnite razlike između dekadnoga i binarnoga brojevnog sustava.
2. Koji se najveći broj (izražen dekadno) može napisati s 5 znamenaka binarnog sustava?
3. Koliko je binarnih znamenaka potrebno za prikaz dekadnoga broja 47?
4. Pretvorite binarni broj 11 0110 u dekadni.
5. Pretvorite dekadni broj 53 u binarni.
6. Navedite značajke heksadekadnoga brojevnog sustava.
7. Pretvorite heksadekadni broj 12BF u dekadni.
8. Pretvorite dekadni broj 3127 u heksadekadni.
9. Pretvorite heksadekadni broj 2C4E u binarni.
10. Pretvorite binarni broj 100 1010 0011 1111 u heksadekadni.
11. Kodirajte BCD kodom broj 395.
12. Koji broj dekadnoga brojevnoga sustava odgovara binarnoj kombinaciji 100001100010 u BCD kodu?
13. Koliko binarnih znamenaka treba da se broj 128 napiše u binarnome brojevnom sustavu, a koliko da se napiše u BCD kodu?
14. Kodirajte XS-3 kodom broj 295.
15. Koji broj dekadnoga brojevnog sustava odgovara binarnoj kombinaciji 101010010101 u XS-3 kodu?
16. Kodirajte podatak Y:9 u ASCII kodu.
17. Koji je sadržaj podatka 1011000 0101011 0111000 zadanog u ASCII kodu?
18. Nađite ispravnu kombinaciju za podatak zadan Hammingovim kodom: a) 0011001, b) 0111101.