

1

Uvod v digitalna elektronska vezja

Digitalni elektronski sistemi so prisotni vsepovsod. Najbolj znana oblika digitalnih sistemov so digitalni računalniki, največ pa jih je vgrajenih v različne gospodinjske, transportne in industrijske naprave. Danes si ne moremo več predstavljati življenja brez naprav, kot so mobilni telefoni, digitalni fotoaparati, digitalni predvajalniki glasbe in videa. Digitalni sistemi krmilijo preproste naprave, kot npr. štoparica na pečici, ali pa kompleksne industrijske procese ali robote. Digitalni sistemi so zgrajeni iz podsistemov in komponent v različnih izvedbenih tehnologijah. Vse te naprave si delijo skupne koncepte digitalne elektronike, ki temelji na poenostavitvi fizikalnih zakonov v preproste inženirske modele.

1.1 Električno vezje (tokokrog)

Električno vezje je zbirka med seboj povezanih komponent, ki opravljajo določeno funkcijo. Vezje imenujemo tudi tokokrog, saj v njem teče tok iz pozitivnega priključka napajalnega vira preko elementov proti negativnemu priključku vira. Če se ta povezava prekine, vezje ne more opravljati svoje funkcije. Sodobna električna vezja vsebujejo veliko različnih vrst komponent, kot so npr: upori, kondenzatorji in tuljave, polprevodniške diode, transistorji in integrirana vezja, ter pretvorniki: mikrofoni, senzorji, motorji, grelci, svetila.

Komponente so med seboj povezane z električnimi prevodniki, ki prenašajo tok med posameznimi točkami v vezju. Vsak električni prevodnik (npr. bakrena žica), ki povezuje dva elementa tvori skupaj s priključki elementov eno povezavo v vezju. Električna aktivnost na neki povezavi se prenese na vse komponente priključene na to povezavo. Določene povezave so namenjene prenosu električne energije na komponente vezja, druge pa so prenašalke podatkov. Povezave, ki prenašajo podatke se imenujejo *signalne povezave* in podatek je predstavljen z napetostnim nivojem v vezju. Signalne povezave običajno prenašajo manjše tokove so iz manjših prevodni-

kov. Povezave za prenos električne energije v vezje imenujemo tudi *napajalne povezave* in so močnejše, ker morajo prenašati večje tokove.

Električna vezja izvajajo funkcijo z uporabo električne energije, npr. poženejo motor ali prižgejo luč. Elektronska vezja pa so sestavljena iz komponent, ki jih krmilijo električni signali. Večina sodobnih elektronskih vezij uporablja signale z napetostjo nekaj voltov glede na maso. Analogna vezja prenašajo informacijo v obliki napetostnega nivoja signala, ki je lahko poljubna napetost med zgornjim in spodnjim napajalnim nivojem. Primer takšnega signala je napetostni signal iz mikrofona, pri katerem je napetost sorazmerna pritisku zvočnih valov. Digitalna vezja uporabljajo le dva napetostna nivoja za predstavitev podatkov in so zaradi tega manj občutljiva na šum in motnje iz okolice.

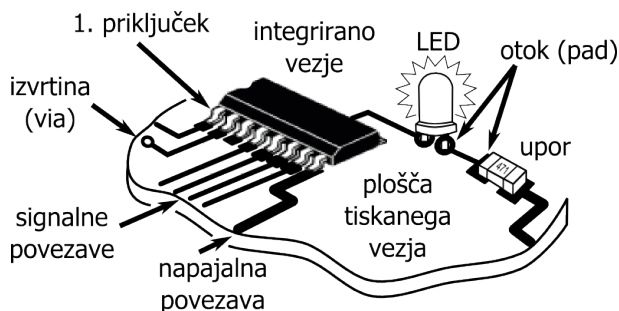
1.2 Izdelava vezja

Čeprav lahko komponente elektronskega vezja med seboj povežemo s prevodnimi žicami, je to le redko praktičen in primeren način izdelave vezja. Uporablja se predvsem za prototipno izdelavo manjših vezij, kjer na izdelanem vezju izvajamo testiranja in meritve v procesu načrtovanja. Tak način izdelave vezja je zelo zamuden in ni primeren za masovno proizvodnjo. Običajno so komponente sestavljene in povezane na plošči z imenom *tiskano vezje*. Priprava in izdelava tiskanega vezja sicer zahteva nekaj več časa kot preprosto povezovanje komponent s prevodniki, vendar dobimo na koncu izdelek, ki je primeren za vgradnjo v napravo.

1.2.1 Tiskano vezje

Proizvedena tiskana vezja morajo imeti zanesljive in permanentne povezave med vsemi komponentami. Poleg tega mora biti vezje poceni in primerna za masovno izdelavo. Vezja so danes večinoma narejena na neprevodni plošči (npr. vitoplast plošče iz epoksi in steklenih vlaken) z bakrenimi povezavami. Komponente so pritrjene in povezane s postopkom spajkanja.

Proizvodnja tiskanih vezij se začne z 1–2mm debelimi ploščami, ki so iz obeh strani prevlečene z bakreno folijo. Na bakreni plošči natisnemo vzorec, ki preprečuje jedkanje na mestih s povezavami (od tod ime tiskano vezje, angl. *Printed Circuit Board*). Plošče nato potopimo v



Slika 1.1: Tiskano vezje s površinsko montiranimi elektronskimi elementi

kislino, ki odstrani odvečni baker, tako da ostanejo le povezave in otoki (angl. *pads*) za spajkanje komponent. Nekatere komponente imajo priključke, ki gredo skozi tiskano vezje, za katere naredimo izvrtine, novejšje komponente pa so pritrjene kar na površini tiskanega vezja (angl. *Surface Mount Devices*). Tiskana vezja imajo eno, dve ali več bakrenih plasti ali slojev. Večslojna tiskana vezja so narejena z lepljenjem izdelanih dvoplastnih vezij v sendviče. Preprosta digitalna elektronska vezja so dvo ali štiriplastna, kompleksna računalniška plošča pa ima lahko tudi več kot 20 plasti.

Nekatere izvrtine v vezju so namenjene za povezave med plastmi (angl. *via*) zato so prekrte s tankim kovinskim slojem v postopku galvanizacije. Zunanje bakrene plasti zaščitimo z lakom pred oksidacijo, za identifikacijo komponent pa so naredimo s sitotiskom napise na zgornji in spodnji strani. Napisi označujejo ime komponente, njihove vrednosti in orientacijo za lažje sestavljanje in testiranje vezja. Orientacija komponent z več priključki je določena tako, da je posebej označen prvi priključek (s tiskano oznako, številko ali kvadratno obliko otoka).

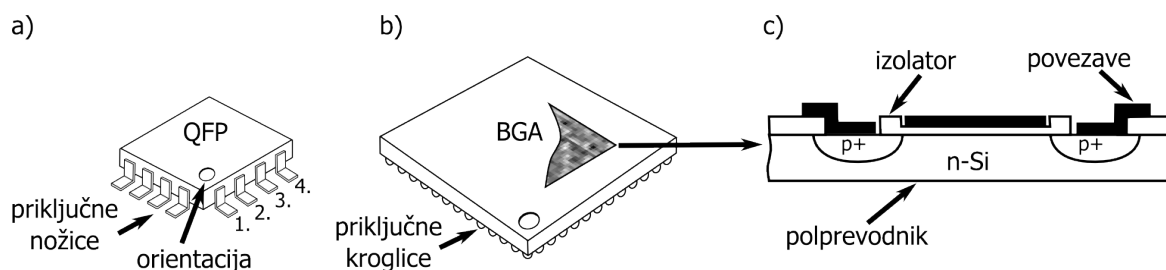
Elektronske komponente imajo izpostavljene kovinske priključke s katerimi jih pritrdimo na tiskano vezje, tako da je komponenta mehansko pritrjena in električno povezana. To storimo v procesu spajkanja, pri katerem s staljeno kovino (spajko) oblijemo priključek na komponenti in na tiskanem vezju. Ko se spajka ohladi, se strdi in tvori trdno prevodno vez.

Razvojni sistemi so vnaprej pripravljena tiskana vezja s komponentami, ki jih oblikujemo s postopkom programiranja. *Programirljivi razvojni sistemi* nam omogočajo, da vezje razvijemo na računalniku in s programiranjem oblikujemo povezave na fizičnem vezju. To je zelo učinkovit in sodoben postopek prototipne izdelave vezij, ki ga bomo spoznali pri praktičnem delu.

1.2.2 Integrirano vezje

Elektronska vezja so lahko narejena v obliki integriranega vezja. Integrirano vezje je mikrovezje, sestavljeno iz množice elektronskih elementov, ki so na skupnem substratu med seboj povezani v električno vezje.

Integrirano vezje se po izdelavi vgradi v ohišje iz katerega izhajajo priključki za zunanje signale in je primerno za montažo npr. na tiskano vezje. Označujemo ga tudi z besedo čip, ki izhaja iz računalniškega slenga in pomeni silicijevo rezino. Silicij je polprevodniški material, ki je danes najbolj pogosto uporabljen kot osnova oz. substrat na katerem so narejene plasti integriranega vezja. Z različnimi plastmi so narejeni aktivni in pasivni elementi ter povezave na vezju.

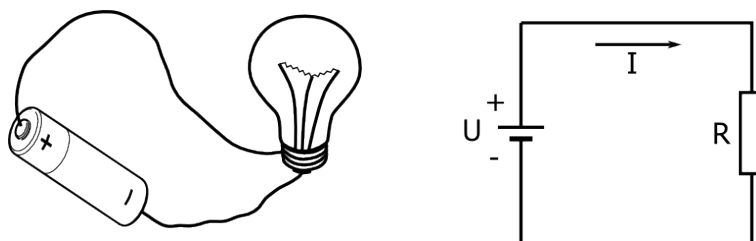


Slika 1.2: Integrirano vezje v ohišju QFP (a), BGA (b) in presek plasti na silicijevi rezini (c).

1.3 Modeli električnih vezij

Na podlagi proučevanja električnih pojavov so znanstveniki oblikovali fizikalne zakone. Osnovne zakone elektromagnetizma opisujejo zelo splošne in za praktično uporabo precej zapletene fizikalne enačbe. Inženirji se ukvarjamo s praktično uporabo izsledkov znanosti. Elektroinženirji uporabljamo poenostavljene *modele* in enačbe, ki pod določenimi pogoji dovolj dobro opisujejo dogajanje v električnih vezjih. Poenostavljeni ali abstraktni modeli omogočajo bolj učinkovito obravnavo električnih vezij.

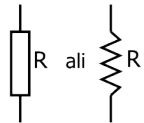
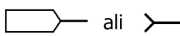
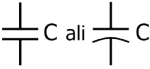
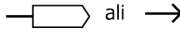
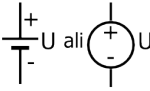
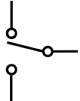
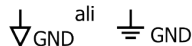
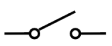
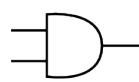
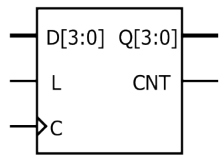
Za izdelavo fizičnega vezja potrebujemo tudi pri najmanjših vezjih kar nekaj časa in s tem povezanih stroškov, da jih izpopolnimo do končne oblike. V nekaterih primerih lahko nepravilno delovanje vezja predstavlja nevarnost za človeka ali okolico, zato je pri razvoju novega vezja bolje narediti analizo na modelu vezja.



Slika 1.3: Vezje (tokokrog) in električna shema modela vezja

Slika 1.3 prikazuje preprosto vezje z baterijo in žarnico na levi strani ter elektrotehniški model vezja na desni strani. V modelu vezja smo uporabili več poenostavitev: baterijo predstavlja idealen vir napetosti, povezovalne žice so idealni prevodniki, žarnico pa smo predstavili z upornostjo. Osnovni princip izdelave modelov električnih vezij je, da komponente vezja zamenjamo z diskretnimi elementi, ki jih opišemo z enim parametrom: baterijo z napetostjo, žarnico pa z upornostjo. S takim modelom lahko naredimo preprost izračun: ugotovimo kakšen tok bo tekkel pri določeni napetosti baterije in kakšna moč se bo trošila na žarnici.

Model vezja, ki ga predstavlja *električna shema*, je za inženirje elektronike osnovna dokumentacija za izdelavo fizičnega vezja. Shematski model vezja prikazuje vse komponente, signalne in napajalne povezave v vezju. Model lahko skiciramo, pregledujemo in analiziramo poljubno mnogokrat in precej hitreje in ceneje, kot bi to delali na realnem vezju. Z računalniškimi programi lahko analiziramo delovanje vezja s pomočjo simulacije do poljubne natančnosti pred fizično izdelavo. Danes se praktično vsa vezja začnejo načrtovati v obliki računalniških modelov v orodjih z imenom CAD (angl. Computer Aided Design). Model vezja s temi orodji hitro sestavimo in ga preučimo pred fizično izdelavo, kar prihrani veliko časa in stroškov. Zavedati pa se moramo, da računalniški model ni pravo vezje in da je dober toliko, kolikor dobre so bile predpostavke načrtovalcev. Računalniški model vezja je lahko v grafični obliki (shema ali diagram) ali pa je narejen z opisom v nekem jeziku. Grafični zapis je lažje berljiv in primernejši za manjša vezja ali pa grobo blokovno predstavitev velikih vezij. Jezikovni opis je bolj učinkovit pri kompleksnih vezjih in primeren za avtomatsko obdelavo v računalniku.

simbol	lastnost	element	simbol	pomen
	upornost [Ω]	upor	 ali 	vhodni signal
	kapacitivnost [F]	kondenzator	 ali 	izhodni signal
	napetost [V]	baterija ali vir napetosti	 ali 	napajalni nivo
	preklopi tokokrog	preklopno stikalo		masa
	sklene tokokrog	tipka		logična vrata
	sveti ko teče tok v smeri 	svetleča dioda (angl. LED)		števec

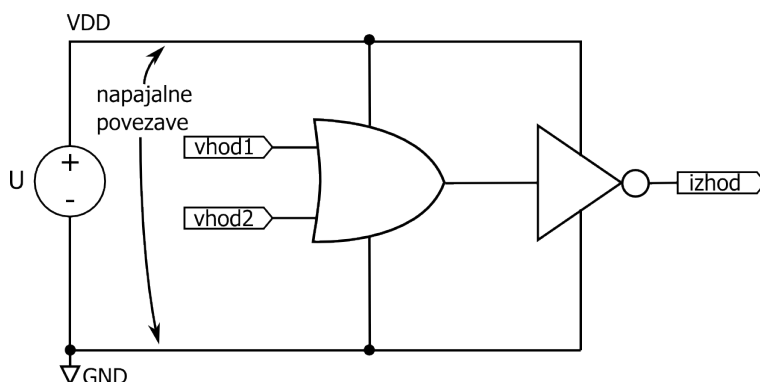
Slika 1.4: Simboli za osnovne gradnike modelov električnih vezij

1.4 Digitalna vezja

Digitalna vezja so sestavljena iz blokov oz. komponent, napajalnih povezav in signalnih povezav. Nekatere povezave predstavljajo vhode, ki pripeljejo v vezje zunanje signale. Na shemi so vhodne povezave običajno narisane na levi strani. Določene povezave so izhodi iz vezja, ki so običajno narisani na desni strani.

Signalne povezave so pogosto sestavljene iz več vzporednih vodnikov. Takšno povezavo imenujemo *vodilo* (angl. bus) in je označena na shemi z debelejšo črto. Na vsakem vodilu je lahko s poševno črto in številko zapisano število vzporednih vodnikov, ki jih vsebuje. Vhodi in izhodi digitalnega vezja so predstavljeni s posebnimi shematskimi simboli.

Vsako digitalno vezje potrebuje napajanje s konstantnim in stabilnim napetostnim virom za vse elemente. Pozitivni in negativni pol napetostnega vira sta v digitalnem vezju označena z Vdd (lahko tudi Vcc) in GND (lahko tudi Vss). Napajalna povezava z oznako GND je univerzalna referenca proti kateri se v vezju merijo vse napetosti. Na shemi je včasih težko in nepregledno narisati povezave vseh priključkov na GND. Namesto tega se priključek le označi z besedo GND ali posebnim simbolom (npr. navzdol obrnjen trikotnik) in vsi takšni priključki se smatrajo vezani skupaj. Napajalna povezava z oznako Vdd je v digitalnem vezju tipično najvišja napetost. Ker so na Vdd vezani vsi aktivni elementi vezja, tudi to povezavo na shemi poenostavimo tako da priključke ustrezno označimo. Napetostna razlika med Vdd in GND je v digitalnih vezjih tipično nekaj voltov: 5V pri starejših tehnologijah (TTL, CMOS) in 1V – 3.3V pri novejših vezjih (LVCMOS).

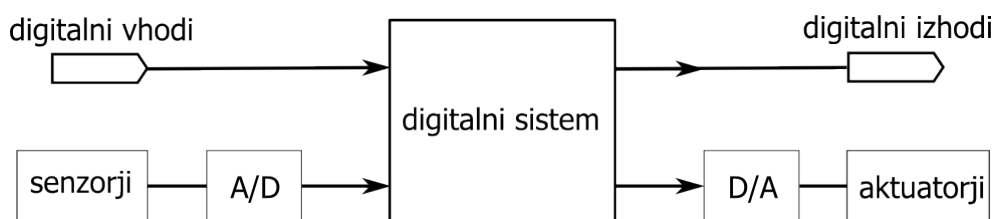


Slika 1.5: Primer digitalnega vezja

Signali v digitalnih vezjih predstavljajo vrednosti v dvojiškem sistemu: 0, ki je običajno napetost $0V$ in 1, ki je običajno kar napajalna napetost. Velikost napajalne napetosti je odvisna od tehnologije digitalnih vezij. Pri starejših tehnologijah z oznakami TTL ali CMOS je bila napajalna napetost $5V$, danes pa se predvsem uporabljajo komponente z nižjimi napetostmi, npr. LVCMOS z napetostjo $3.3V$.

1.5 Digitalni sistemi

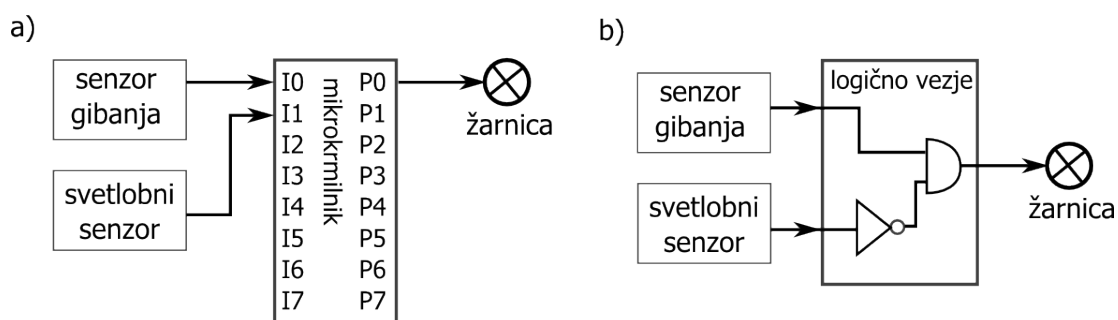
Digitalni sistem je sistem, ki izvaja funkcije z uporabo digitalne logike. Največ digitalnih sistemov je vgrajenih v različne naprave (angl. embedded system). Slika 1.6 prikazuje tipičen primer digitalnega sistema. Senzorji merijo fizikalne količine (npr. temperaturo, svetlost, jakost zvoka) in jih pretvarjajo v električni signal. Električni signal iz senzorjev je običajno analogni, zato ga najprej pretvorimo v digitalno obliko (A/D) in pošljemo na vhode sistema. Digitalni vhodi (npr. tipke) so lahko vezani neposredno na vhode digitalnega sistema.



Slika 1.6: Primer digitalnega sistema

Rezultat delovanja digitalnega sistema so digitalni izhodni signali, ki jih lahko večemo neposredno na digitalne izhode ali pa preko digitalno analogni pretvorbe (D/A) na analogne aktuatorje. Aktuatorji pretvorijo električni signal nazaj v neko fizikalno količino (toploto, svetlobo, zvok ipd.). Sistemi s takšno zgradbo lahko opravljajo najrazličnejše naloge in so vgrajeni v kopico sodobnih naprav. Digitalni sistemi so danes zgrajeni iz logičnih integriranih vezij in/ali mikroprocesorjev.

Verjetno vsi najboljše poznamo mikroprocesorje v osebnih računalnikih. Mikroprocesorji so možgani namiznih in prenosnih računalnikov, ter strežnikov, ki obdelujejo ogromne količine podatkov. Poznavanje delovanja digitalnih sistemov je pomembno za razumevanje delovanja mikroprocesorjev in celotnih računalnikov. Pri predmetu Programirljivi digitalni sistemi bomo razložili osnovne koncepte delovanja mikroprocesorja na primeru preprostega 8-bitnega procesorja.



Slika 1.7: Senzor gibanja v temi: a) z mikrokrmilnikom in b) z logičnim vezjem

Digitalni sistemi niso narejeni le v obliki računalnikov. Še bolj razširjeni so v obliki namenskih digitalnih vezij vgrajenih v prenosne telefone, avtomobilske kontrolne sisteme, dekodeerje za digitalno TV, glasbene inštrumente, digitalne kamere, igralne konzole itd. Vzemimo preprost primer digitalnega senzorja za prižig luči v temi, ki ga lahko naredimo na dva načina, kot prikazuje slika 1.7. Sistem ima na vhodu senzor gibanja in senzor svetlobe, na izhod pa je vezana žarnica. Žarnica naj se prižge le v primeru, ko prvi senzor zazna gibanje, senzor svetlobe pa javlja, da je noč.

1.5.1 Izvedba sistema z mikroprocesorjem

Opravlila, ki jih izvaja digitalni sistem, lahko napišemo v obliki programa za mikroprocesor. Načrtovalci digitalnih sistemov radi posegajo po mikroprocesorjih, ker so to zelo razširjene komponente in za večino opravil najdemo na tržišču primeren procesor.

Najbolj enostavni procesorji za vgrajene naprave so v obliki integriranega vezja z digitalnimi vhodnimi in izhodnimi vmesniki in se imenujejo *mikrokrmilniki*. Vsebujejo pomnilnik in različne vrste digitalnih vmesnikov, včasih tudi A/D in D/A pretvornike za enostavno povezavo s senzorji in aktuatorji. Vzemimo primer preprostega mikrokrmilnika, ki ima le en vhodni vmesnik z 8 priključki I0 do I7 in izhodni vmesnik s priključki P0 do P7, kot prikazuje shema na sliki 1.7a. Na vhod I0 je pripeljan digitalni signal iz senzorja gibanja, na vhod I1 pa digitalni signal svetlobnega senzorja. Izhod P0 krmili luč. Shema je poenostavljena, saj moramo v praksi vezati 220V žarnico preko močnostnega pretvornika, ker jo s 3V ali 5V izhodom pač ne moremo prižigati.

Delovanje digitalnega sistema opišemo s kratkim programom v jeziku C, ki je danes najbolj razširjen način opisa delovanja procesorjev. Program prevedemo v strojno kodo in ga naložimo v mikrokrmilnik. Po vklopu napajanja začne procesor izvajati ukaze, ki so zapisani med zavrtimi oklepaji znotraj funkcije `main()`. Prvi ukaz `while(1)` je preprosta zanka, ki neskončno

ponavlja ukaze zapisane med zavitimi oklepaji. Ob vsaki ponovitvi procesor preveri ali je vhod I0 postavljen na 1 in vhod I1 postavljen na 0; to pomeni da je senzor gibanja aktiviran, senzor svetlobe pa sporoča da je noč. V tem primeru postavimo izhod P0 na 1, kar prižge žarnico, v nasprotnem pa se žarnica ugasne.

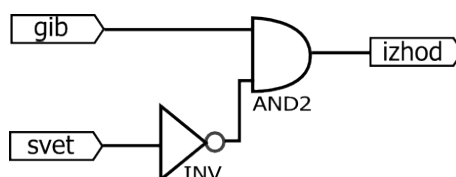
```
void main()
{
    while (1) {
        if (I0==1 && I1==0) P0 = 1;
        else P0 = 0;
    }
}
```

Če želimo narediti spremembo v delovanju, npr. dodati ugašanje luči z zakasnitvijo, moramo le popraviti, prevesti in na novo naložiti program. Izvedbe digitalnih sistemov s procesorji so zelo prilagodljive in zaradi tega tudi zelo popularne. Osnove programiranja mikrokontrolerov boste spoznali pri predmetu Programiranje II.

1.5.2 Izvedba sistema z logičnim vezjem

Senzor gibanja lahko naredimo precej bolj preprosto z logičnim vezjem, ki vsebuje le negator in logična vrata (slika 1.7b). Tudi posamezne logične komponente so na tržišču zelo razširjene, za velikoserijsko proizvodnjo pa je najugodnejša izdelava namenskih integriranih vezij v tovarni polprevodnikov.

Če želimo spremeniti delovanje vezja, moramo dodati nove komponente in jih ponovno povezati, kar utegne biti precej zamudno. Tukaj nam rešitev ponujajo *programirljiva logična vezja*, ki so podobna kot procesorji, univerzalni gradniki. Načrt vsebine programirljivega vezja pripravimo na računalniku, ga prevedemo in naložimo v vezje. Slika 1.8 prikazuje shematski načrt logičnega vezja, ki je pripravljen za prevajanje v tehnologijo programirljivih vezij.



Slika 1.8: Shema logičnega vezja za senzor gibanja

Zgradbo in delovanje vezja lahko opišemo tudi s kodo, ki je podobna programom za mikroprocesorje. Kodo napišemo v enem izmed jezikov za opis strojne opreme (npr. VHDL ali Verilog), jo prevedemo in naložimo v programirljivo vezje. Primer opisa senzorja gibanja v jeziku VHDL:

```
entity senz is
    port ( gib      : in      std_logic;
```

```
        svet  : in      std_logic;  
        izhod : out     std_logic);  
end senz;  
  
architecture opis of senz is  
begin  
    izhod <= gib and (not svet);  
end opis;
```

1.5.3 Logična vezja v primerjavi s procesorji

Delovanje mikroprocesorjev temelji na zaporednem izvajanju ukazov. Mikroprocesor mora za izvršitev neke naloge digitalnega sistema izvesti veliko število strojnih ukazov. Kadar digitalni sistemi obdelujejo velike količine podatkov in se morajo odzivati zelo hitro je lahko mikroprocesor prepočasen.

Logično vezje izvaja operacije z logičnimi gradniki, ki delujejo vsi hkrati, tako da je lahko precej hitrejša. Obstajajo sicer tudi zelo hitri procesorji in takšni z več hkrati delujočimi jedri, kot so v osebnih računalnikih, vendar imajo druge slabe lastnosti: so veliki, dragi in porabijo veliko energije. V vseh teh primerih je smotrna izdelava namenskega digitalnega vezja.

Pri predmetu Programirljivi digitalni sistemi bomo spoznali osnovne komponente digitalnih vezij in grafične postopke načrtovanja vezij. Grafično načrtovanje poteka s sestavljanjem sheme vezja iz vnaprej pripravljenih komponent ali pa z risanjem diagrama poteka, ki ga programska oprema prevede v logično shemo. Za realizacijo vezij bomo uporabili programirljive razvojne sisteme, ki omogočajo hitro izdelavo prototipov vezij in preizkus delovanja z vgrajenimi vhodnimi in izhodnimi enotami.

1.6 Naloge

1. Poišči kakšno elektronsko vezje brez ohišja (če ne najdeš drugega si oglej razvojni sistem na laboratorijskih vajah) in določi komponente vezja. Ugotovi od kod prihaja napajanje in kje potekajo na vezju napajalne povezave. Poišči integrirana vezja in pasivne komponente, kot so upori ali kondenzatorji. Ali vezje vsebuje kakšne digitalne vhode in izhode? Ali so na vezju kakšni senzorji in izhodi za aktuatorje?
2. Preglej shemo razvojnega sistema Coolrunner-II in ugotovi, kako so priključene vhodne tipke in izhodne LED. Ugotovi kakšna je napetost na vhodu vezja ob ugasnjeni in pritisnjeni tipki. Kakšna napetost mora biti na izhodu digitalnega vezja, da bo LED svetila?
3. Ugotovi, kako bi sestavil vezavo tipke in svetleče diode, da bi ob pritisku na tipko LED ugasnila, hkrati pa bi na vhodu digitalnega vezja bila napetost GND?