

1

Uvod v digitalna vezja

1.1 Elektronska vezja



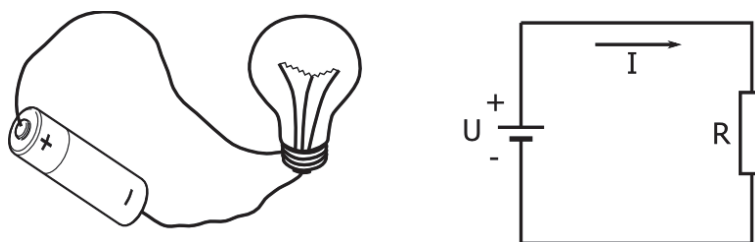
Električno vezje je povezava izvorov električne energije, vodnikov in komponent. Vezje imenujemo tudi tokokrog, saj v njem teče tok iz pozitivnega priključka napajalnega vira prek komponent proti negativnemu priključku vira. Če se ta povezava prekine, vezje ne more opravljati svoje naloge. Sodobna električna vezja vsebujejo veliko različnih vrst komponent, kot so upori, kondenzatorji, tuljave, polprevodniške diode, tranzistorji, integrirana vezja in pretvorniki, npr. mikrofon, senzorji, motorji, grelci, svetila.

Komponente so med seboj povezane z vodniki, ki prenašajo tok med posameznimi točkami v vezju. Električni vodnik, npr. bakrena žica, tvori skupaj s priključki komponent povezavo v vezju. Električna aktivnost na povezavi se prenese na vse komponente, priključene na to povezavo. Nekatere povezave so namenjene prenosu električne energije na komponente, druge pa prenašajo podatke. Povezave, ki prenašajo podatke, se imenujejo *signalne povezave*. Po njih tečejo majhni tokovi in so iz vodnikov majhnega preseka. Povezave za prenos električne energije imenujemo tudi *napajalne povezave* in so močnejše, ker morajo prenašati večje tokove.

Električna vezja izvajajo naloge 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 podatke v obliki napetostnega nivoja signala ali velikosti toka. Primer je temperaturni senzor, ki pretvarja temperaturo v padec napetosti. Analogne podatke teoretično določimo poljubno natančno (npr. temperatura $20.213657...^{\circ}C$), v praksi pa nas omejuje šum, ki je vedno prisoten. *Digitalna vezja* uporabljajo le nekaj napetostnih nivojev za prenos podatkov v številski obliki in so zaradi tega manj občutljiva na šum in motnje iz okolice.

Na podlagi proučevanja električnih pojavov so znanstveniki oblikovali fizikalne zakone. 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 elemente, ki pod določenimi pogoji dovolj dobro opisujejo dogajanje v električnih vezjih. Poenostavljeni ali abstraktni modeli omogočajo učinkovitejšo obravnavo električnih vezij.

Analiza delovanja modela vezja je hitrejša in cenejša kot izdelava fizičnega vezja. V nekaterih primerih lahko nepravilno delovanje vezja predstavlja nevarnost za človeka ali okolico, zato je pri razvoju novega vezja boljše narediti analizo na modelu vezja.



Slika 1.1: Vezje (tokokrog) in električna shema modela vezja.

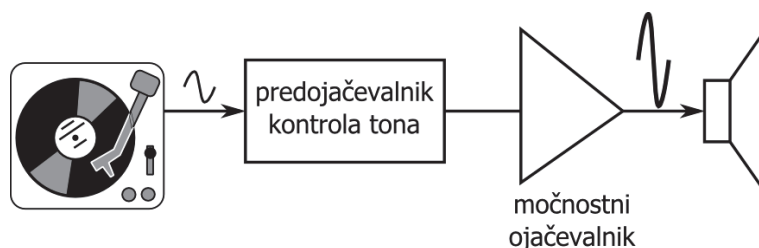
Slika 1.1 prikazuje preprosto vezje z baterijo in žarnico na levi strani ter elektrotehniški model vezja na desni strani. V modelu vezja smo uporabili več poenostavitev: baterijo predstavlja idealen vir napetosti, povezovalne žice so idealni prevodniki, žarnico pa smo predstavili z upornostjo. Osnovni 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 elemente, 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 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 točne 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 učinkovitejši pri kompleksnih vezjih in primeren za avtomatsko obdelavo v računalniku.

1.2 Analogni in digitalni vezja

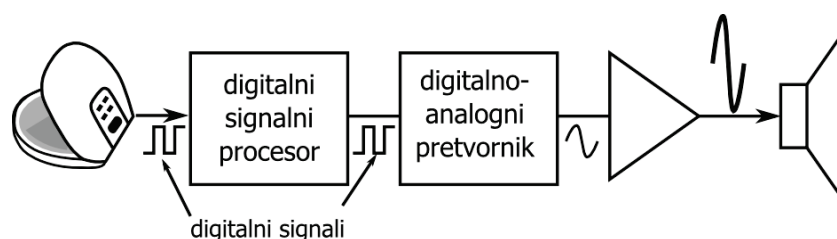


Električni signali, ki predstavljajo fizikalne količine, so večinoma analogni in lahko zavzamejo poljubno vrednost znotraj nekega območja. Primer takšnega signala je električna napetost na mikrofону, ki je sorazmerna pritisku zvočnih valov. Zvočni (avdio) signal prenašamo in obdelujemo v analogni ali digitalni obliki, ki ima pred analogno več prednosti.



Slika 1.2: Analogni predvajalnik glasbe: klasični gramofon.

Klasični gramofon je primer analognega predvajalnika glasbe. Avdio signal zajemamo z iglo, ki drsi po gramofonski plošči in pretvarja nihanje v majhno električno napetost. Analogni električni signal najprej potuje na predojačevalnik in enoto za kontrolo tona, nato pa na močnostno ojačevalno stopnjo, s katero dobimo dovolj močan signal za predvajanje na zvočniku. Za kvaliteto predvajanja zvoka na analognem gramofonu je zelo pomembno, da se plošča vrti enakomerno, da ni napak ob zajemu signala in da se čim manj šuma pojavi v vezju ter prevaja skozi ojačevalnik. Šum je v električnih vezjih vedno prisoten in predstavlja največjo težavo pri načrtovanju analognih elektronskih naprav.

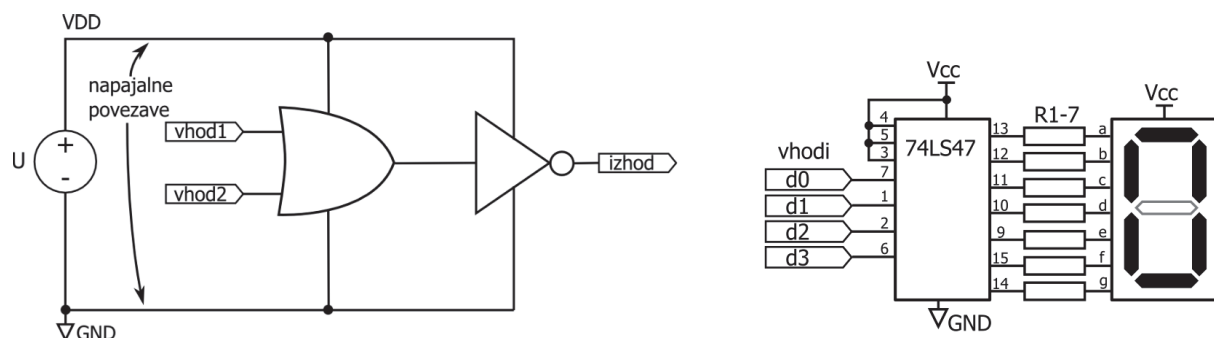


Slika 1.3: Digitalni predvajalnik glasbe.

Digitalni predvajalnik glasbe ima shranjen zvok v obliki številskih podatkov na zgoščenki ali v elektronskem pomnilniku. Podatke sprejme in obdelata digitalni signalni procesor. Na izhodu procesorja dobimo digitalne vzorce zvoka, ki jih preko preko digitalno-analognega pretvornika spremenimo v zvočni signal, ojačimo in predvajamo na zvočniku, kot prikazuje slika 1.3.

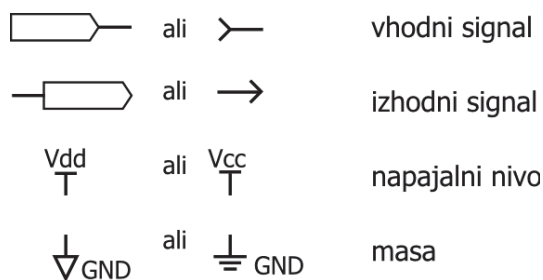
Na zgoščenki ni zapisana amplituda zvočnega signala, ampak matematična koda, ki jo *dekodira* digitalni procesor. Če je prišlo pri branju do manjših napak, bo postopek dekodiranja še vedno uspešno določil shranjeno amplitudo zvoka. Kodirani podatki so lahko shranjeni v zgoščeni obliki (npr. mp3), kar omogoča zapis daljših posnetkov na ploščo. Digitalni signal ni občutljiv na šum in ga enostavno shranjujemo, tako da tudi ob neenakomernem branju podatkov s plošče ali prenašanju prek spleta z ustrežno digitalno obdelavo poslušamo kvaliteten zvok.

Digitalna vezja so sestavljena iz logičnih elementov, blokov, napajalnih povezav in signalnih povezav. Vhodni logični elementi in bloki so po dogovoru postavljeni na levi strani simbola, izhodni priključki pa so na desni strani. Posamezne vhode logičnih elementov lahko povežemo skupaj, če prihaja signal na več vhodov iz istega vira. Spoji med povezavami so na shemi označeni s polnimi črnimi krožci. Povezav z izhodov logičnih elementov ne smemo vezati skupaj, ker bi naredili kratek stik. Vhodni in izhodni priključki celotnega vezja so označeni s posebnimi simboli, ki so prikazani na sliki 1.5.



Slika 1.4: Primer digitalnega vezja z logičnimi elementi in bloki.

Digitalno vezje potrebuje napajanje s konstantnim in stabilnim napetostnim virom za vse elemente. Pozitivni napajalni priključek ima v shemah digitalnih vezij oznako V_{dd} ali V_{cc} . Drugi pol je napajalna masa z oznako GND (angl. ground) in predstavlja referenco, proti kateri izmerimo vse napetosti v vezju. Električna shema z večjim številom elementov in posledično veliko napajalnih povezav postane nepregledna, zato prikažemo le oznake za napajanje in maso na ustreznih priključkih. Priključek mase označimo z navzdol obrnjenim trikotnikom in oznako GND, priključek pozitivnega pola pa s kratko črto, nad katero je oznaka.



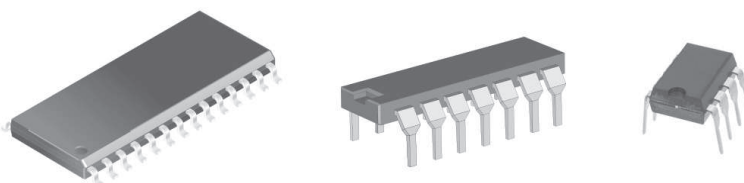
Slika 1.5: Oznake posebnih povezav na shemah digitalnih vezij.

Poenostavljene logične sheme prikazujejo le povezavo logičnih gradnikov, brez napajalnih signalov. Poenostavljene sheme so preglednejše in jih bomo uporabljali v knjigi za prikaz osnovnih vezav logičnih elementov in gradnikov.

1.3 Digitalna integrirana vezja

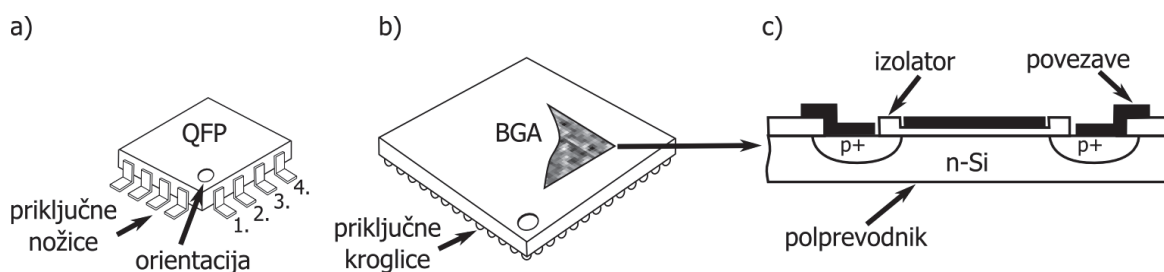


Digitalna vezja so narejena iz komponent, ki so najpogosteje v obliki *integriranega vezja*. Integrirano vezje je miniaturno elektronsko vezje, narejeno na skupni osnovi (substratu) iz polprevodniškega materiala. Označujemo ga tudi z besedo čip, ki izhaja iz računalniškega slenga in pomeni silicijevo rezino. Silicij je polprevodniški material, na katerem z dodajanjem primesi naredimo različne elektronske komponente, npr. upore, kondenzatorje, tranzistorje in jih z narparjenimi prevodnimi plastmi povežemo med seboj. Digitalni čipi opravljajo različne logične funkcije, delimo pa jih tudi glede na obliko ohišja in tehnološko izvedbo.



Slika 1.6: Integrirana vezja v ohišju s priključki v dveh vrstah.

Integrirano vezje je precej manjše od vezja, sestavljenega iz posameznih diskretnih komponent. Vezje na substratu je vgrajeno v ohišje, iz katerega izhajajo priključne nožice (angl. pin) za zunanje signale in je primerno za montažo na tiskanem vezju. Manjša integrirana vezja imajo zunanje priključke razporejene v dveh vrstah. Takšna ohišja so označena s kratico DIL (angl. Dual In-Line) ali SO (angl. Small Outline).



Slika 1.7: Integrirano vezje v ohišju QFP (a), BGA (b) in presek plasti na silicijevi rezini (c).

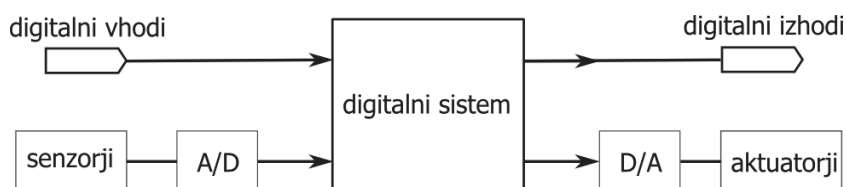
Digitalna integrirana vezja imajo lahko zelo veliko zunanjih priključkov, ki so razporejeni na vseh štirih straneh (QFP, angl. Quad Flat Pack) ali pa v obliki matrice kroglic pod integriranim vezjem (BGA, angl. Ball Grid Array).

Vezja z enako logično funkcijo in ohišjem imajo lahko različno tehnološko izvedbo, ki vpliva na lastnosti zunanjih signalov, porabo vezja in hitrost delovanja. V naslednjem poglavju bomo spoznali lastnosti signalov dveh danes najpogostejših tehnoloških izvedb digitalnih vezij: CMOS in LVCMOS.

1.4 Digitalni sistemi



Digitalni sistemi so elektronski sistemi, ki izvajajo funkcije z uporabo digitalne logike. Na tej temeljijo današnji računalniki in mikroprocesorji, ki jih najdemo vgrajene v v prenosne telefone, avtomobilske krmilne sisteme, naprave zabavne elektronike itd. Vgrajeni sistemi (angl. embedded system) vsebujejo tudi analogne gradnike, prek katerih komunicirajo z okolico.

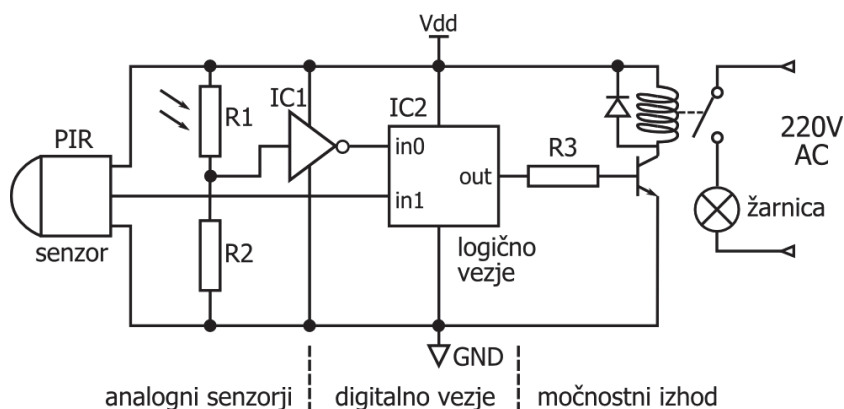


Slika 1.8: Vhodi in izhodi digitalnega sistema.

Vhodi v digitalni sistem prihajajo iz senzorjev, ki merijo fizikalne količine (npr. temperaturo, svetlost, jakost zvoka) in jih pretvarjajo v električni signal. Analogno digitalni pretvornik (A/D) pretvori ta signal v obliko, primerno za vhode digitalnega vezja. Tipke ali stikala pa povežemo neposredno na digitalne vhode.

Z digitalnimi izhodi krmilimo prikazovalnike in indikatorje, analogni izhod za aktuatorje pa dobimo prek digitalno analognega pretvornika (D/A). Aktuatorji pretvorijo električni signal nazaj v neko fizikalno količino (toploto, svetlobo, zvok ipd.).

Vzemimo preprost primer digitalnega sistema za avtomatsko prižiganje luči v temi, ki ga prikazuje slika 1.9. 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.



Slika 1.9: Digitalni sistem za avtomatsko prižiganje luči.

Nekateri senzori, kot npr. senzor gibanja, že vsebujejo celotno vezje z merilno elektroniko in digitalnim izhodom. Signal iz preprostega svetlobnega sensorja, fotoupora, pa moramo pretvoriti v digitalno obliko. V vezju smo uporabili napetostni delilnik in logična vrata IC1, ki delujejo kot

primerjalnik. Kadar je na napetost na vhodu manjša od nastavljenega praga, dobimo na izhod en logični nivo, sicer pa drugega.

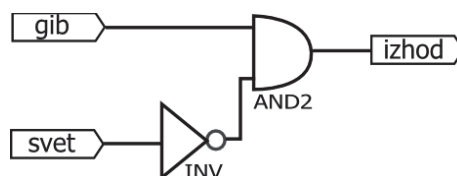
Žarnica potrebuje omrežno napetost 220 V, zato jo priključimo na izhod logičnega vezja prek močnostnega pretvornika. Pretvornik lahko naredimo kot elektronsko stikalo z vezavo tranzistorja in releja.

1.5 Izvedba sistema



Pri izdelavi digitalnega vezja sistema za avtomatsko prižiganje luči potrebujemo dve logični komponenti: logični negator (IC1) in logična vrata AND (IC2). Logične komponente dobimo v obliki digitalnih integriranih vezij, ki izvajajo eno ali več osnovnih logičnih operacij. Digitalno vezje naredimo s povezavo več integriranih vezij. Digitalna integrirana vezja za osnovne logične operacije so zelo razširjena in jih dobimo v različnih tehnoloških izvedbah.

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, podobno kot procesorji, univerzalni gradniki. Načrt vsebine programirljivega vezja pripravimo na računalniku, ga prevedemo in naložimo v vezje. Slika 1.10 prikazuje shematski načrt logičnega vezja, ki je pripravljen za prevajanje v tehnologijo programirljivih vezij.



Slika 1.10: 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;
```

Mikroprocesor

Opravila, 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. Najenostavnejši procesorji za vgrajene naprave so v obliki integriranega vezja z digitalnimi vhodnimi in izhodnimi vmesniki in se imenujejo *mikrokrmilniki*. Vsebujejo pomnilnik, različne vrste digitalnih vmesnikov in analognih pretvornikov za enostavno povezavo s senzorji in aktuatorji.

Mikrokrmilnik je na shemi predstavljen kot gradnik IC2 z dvema digitalnima vhodoma in0 in in1 ter enim izhodom (out). Na vhod in0 je pripeljan digitalni signal iz svetlobnega senzorja, na in1 pa signal iz senzorja gibanja. 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. Naredimo preprost program, ki postavi izhod na 1, ko sta oba vhoda in0 in in1 postavljena na 1, sicer pa naj bo izhodni signal 0. Program se izvaja v neskončni zanki `while (1)`, v kateri najprej preberemo vrednosti z vhodov, nato pa izračunamo in nastavimo izhod:

```
while (1) {
    gib = digitalRead(in0);
    svet = digitalRead(in1);

    if (gib & svet) digitalWrite(out, 1);
    else digitalWrite(out, 0);
}
```

Če želimo narediti spremembo v delovanju, npr. dodati ugašanje luči z zakasnitvijo, moramo dopolniti, prevesti in na novo naložiti program. Izvedbe digitalnih sistemov s procesorji so zelo prilagodljive in zaradi tega tudi zelo popularne.

Razvojni sistemi

Razvojni sistemi so vnaprej pripravljena vezja s komponentami, ki jih oblikujemo s postopkom programiranja. Mikroprocesorski razvojni sistemi vsebujejo mikroprocesor s pomnilnikom in vmesnikom za prenos programske kode iz računalnika v pomnilnik procesorja.

Programirljivi razvojni sistemi 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.

1.6 Tiskano vezje

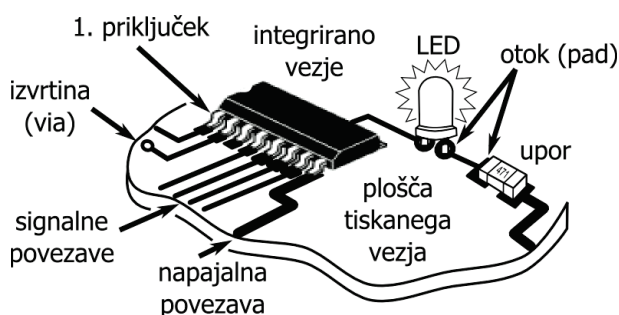
Čeprav lahko komponente elektronskega vezja med seboj povežemo s prevodnimi žicami, je to le redko praktičen in primeren način izdelave vezja. Integrirana vezja v ohišju DIL povezujemo na prototipni plošči z luknjicami. Takšen način povezovanja se uporablja predvsem za prototipno

izdelavo manjših vezij, kjer na vezju izvajamo testiranja in meritve v procesu načrtovanja. Vezja na prototipni plošči niso primerna 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.

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

Proizvodnja tiskanih vezij se začne z 1–2 mm debelimi ploščami, ki so iz obeh strani prevlčene 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 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, novejša 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 elektronska vezja so dvo- ali štiriplastna, zapletena računalniška plošča pa ima tudi več kot 20 plasti.



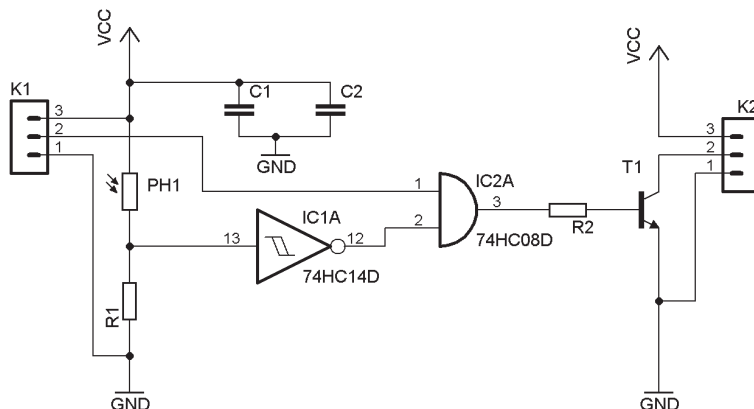
Slika 1.11: Tiskano vezje s površinsko montiranimi elektronskimi elementi.

Nekatere izvrtine v vezju so namenjene za povezave med plastmi (angl. *via*), zato jih v postopku galvanizacije prekrijemo s tankim kovinskim slojem. Zunanje bakrene plasti zaščitimo pred oksidacijo z lakom, spajkalni otoki pa morajo ostati odkriti. Tej plasti pravimo maska za spajkanje ali stop maska. Bakrene spajkalne otoke zaščitimo pred oksidiranjem s postopkom kositriranja, na koncu pa natisnemo napise na tiskani plošči s sitotiskom. 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).

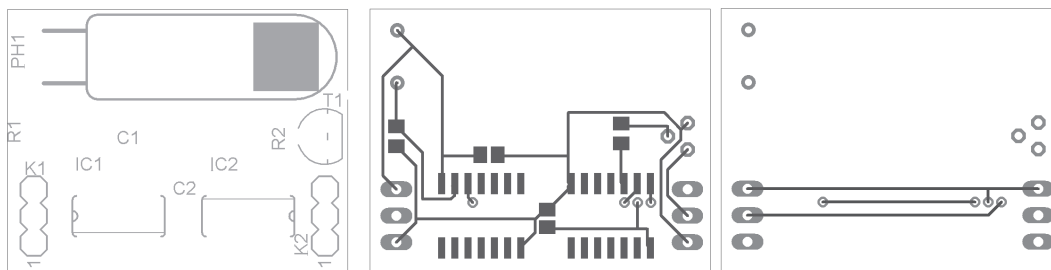
Elektronske komponente imajo izpostavljene kovinske priključke, s katerimi jih pritrdimo na tiskano vezje, tako da je komponenta mehansko pritrjena in električno povezana. To storimo v procesu spajkanja, pri katerem s staljeno kovino (spajko) oblijemo priključek na komponenti in na tiskanem vezju. Ko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

Naloga

1. Preglej shemo vezja za avtomatsko prižiganje luči in določi digitalne elemente, napajalne povezave in signalne povezave. Poišči na načrtu tiskanega vezja vsa 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?



Slika 1.12: Shema vezja za avtomatsko prižiganje luči v programu Eagle.



Slika 1.13: Načrt tiskanega vezja (sitotisk, zgornja in spodnja plast).