

1

Digitalna vezja in sistemi

1.1 Elektronska vezja



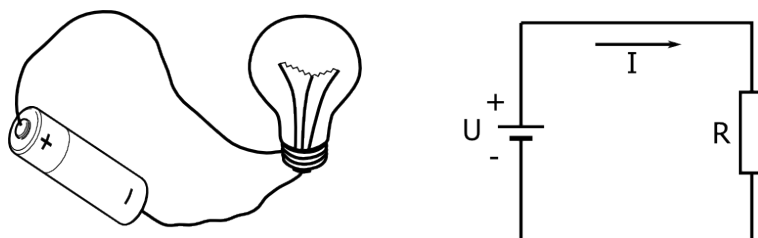
Električno vezje je povezava izvorov električne energije, vodnikov in komponent. Vezje imenujemo tudi tokokrog, saj v njem teče tok iz pozitivnega priključka napajalnega vira preko komponent proti negativnemu priključku vira. Če se ta povezava prekine, vezje ne more opravljati svoje naloge. Sodobna električna vezja vsebujejo veliko različnih vrst komponent, kot so npr: upori, kondenzatorji in tuljave, polprevodniške diode, transistorji in integrirana vezja, ter pretvorniki: mikrofoni, 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 $20.213657...^{\circ}\text{C}$), v praksi pa nas omejuje šum, ki je vedno prisoten. *Digitalna vezja* uporabljajo le nekaj napetostnih nivojev za prenos podatkov v številske oblike 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 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 bolj narediti analizo na modelu vezja.



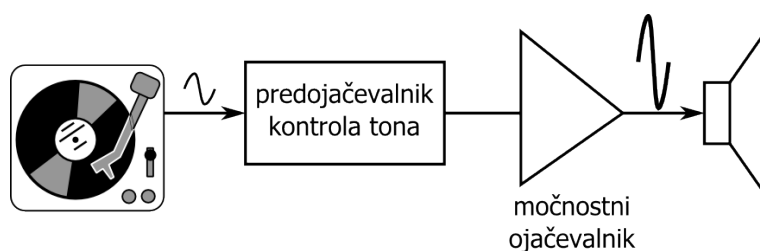
Slika 1.1: Vezje (tokokrog) in električna shema modela vezja

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 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.

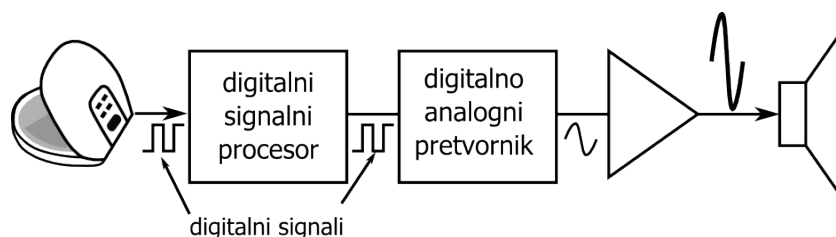
1.2 Analogni in digitalni vezji

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 pred-ojačevalnik in enoto za kontrolo tona, kot prikazuje slika 1.2, nato pa gre na močnostno ojačevalno stopnjo s katerim dobimo dovolj močan signal za predvajanje na zvočniku. Za kvalitetno predvajanje 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.

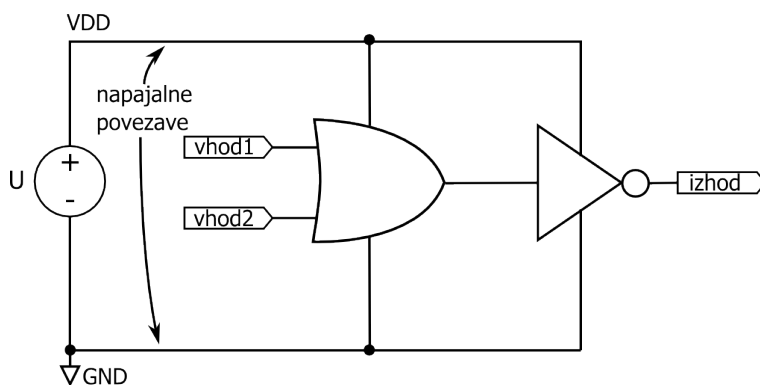


Slika 1.3: Digitalni predvajalnik glasbe

Digitalni predvajalnik zvoka ima zvok shranjen v obliki številskih podatkov. Prenosni digitalni predvajalnik glasbe bere podatke iz plošče (zgoščenke), jih preračunava v digitalnem signalnem procesorju in preko digitalno analognega pretvornika spremeni v zvočni signal, kot prikazuje slika 1.4. Na plošči ni zapisana amplituda zvočnega signala ampak matematična koda, ki jo *dekodira* digitalni procesor. Če je prišlo pri branju plošče do manjših napak, bo postopek dekodiranja še vedno uspešno določil shranjeno amplitudo zvoka. Kodirani podatki so lahko shranjeni v zgoščenki 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 iz plošče ali prenašanju prek spleta z ustrezno digitalno obdelavo poslušamo kvaliteten zvok.

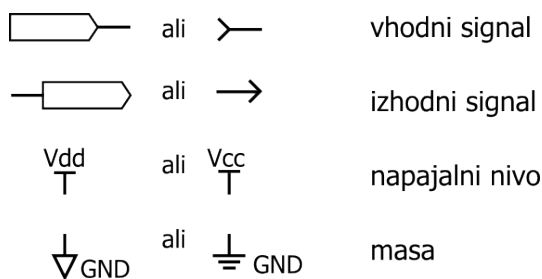
1.2.1 Shema digitalnega vezja

Digitalna vezja so sestavljena iz blokov oz. komponent, napajalnih povezav in signalnih povezav. Nekatere povezave predstavljajo vhode, ki pripeljejo v vezje zunanje signale. Na elektronski shemi so vhodi po dogovoru narisani na levi strani, izhodi vezja pa na desni. Vhodni in izhodni signali so označeni s simboli, ki so prikazani na sliki 1.5.



Slika 1.4: Primer digitalnega vezja

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 ali Vcc in GND (včasih tudi Vss). Napajalna povezava z oznako GND je univerzalna referenca proti kateri se v vezju merijo vse napetosti. Električna shema z veliko napajalnimi povezavami postane nepregledna, zato namesto sklenjenih povezav narišemo le označbe priključkov. Priključek na skupno maso označimo z besedo GND ali posebnim simbolom (npr. navzdol obrnjen trikotnik) in vsi takšni priključki se smatrajo vezani skupaj. Podobno velja za napajalni priključek Vdd.



Slika 1.5: Oznake posebnih povezav v digitalnih vezjih

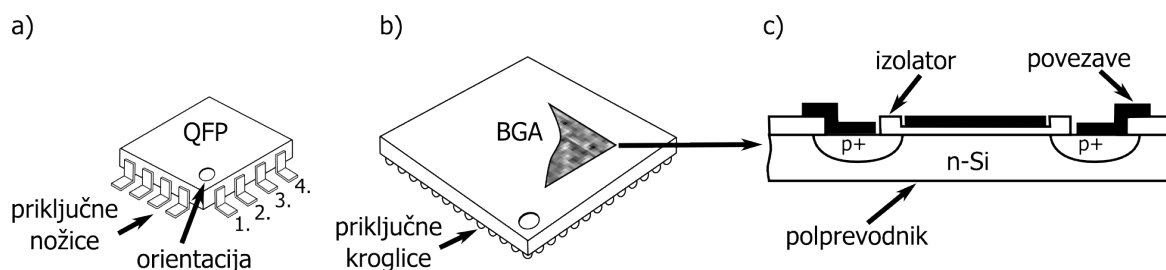
Poenostavljene sheme digitalnih vezij prikazujejo le povezavo logičnih gradnikov, brez napajalnih signalov. Poenostavljene sheme so bolj pregledne in jih bomo uporabljali v knjigi za prikaz osnovnih vezav logičnih elementov in gradnikov.



1.2.2 Digitalna integrirana vezja

Digitalna vezja so narejena iz komponent, ki so najpogostejše v obliki *integriranega vezja*. To je mikrovezje, sestavljeno iz množice elektronskih elementov narejenih na skupni polprevodniški osnovi oz. substratu. Integrirano vezje označujemo tudi z besedo čip, ki izhaja iz računalniškega slenga in pomeni silicijevo rezino. Silicij je najbolj pogosto uporabljen polprevodniški material na kateremu z dodajanjem primesi in plasti naredimo različne elektronske elemente. Z naprevanjem prevodnih plasti pa so narejene povezave med elementi v integriranem vezju.

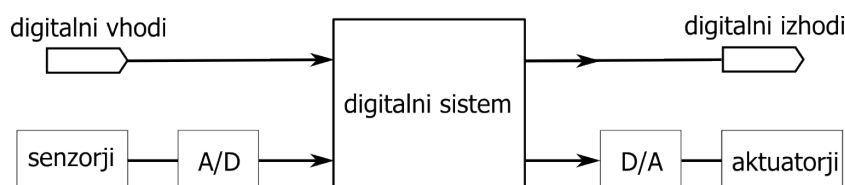
Vezje na substratu je vgrajeno v ohišje iz katerega izhajajo priključki za zunanje signale in je primerno za montažo na tiskanem vezju. Med različnimi izvedbami ohišij bomo pri digitalnih integriranih vezjih največkrat naleteli na takšne s priključki v dveh vrstah (DIL: Dual-in-line, slika 1.10), na vseh štirih straneh (QFP: Quad Flat Pack) in matriko priključnih kroglic (BGA: Ball Grid Array), kot prikazuje slika 1.6.



Slika 1.6: Integrirano vezje v ohišju QFP (a), BGA (b) in presek plasti na silicijevi rezini (c).

1.3 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 prenosne telefone, avtomobilske krmilne sisteme, naprave zabavne elektronike itd. Vgrajeni sistemi (angl. embedded system) vsebujejo tudi analogne gradnike, preko katerih komunicirajo z okolico, kot prikazuje slika 1.7.



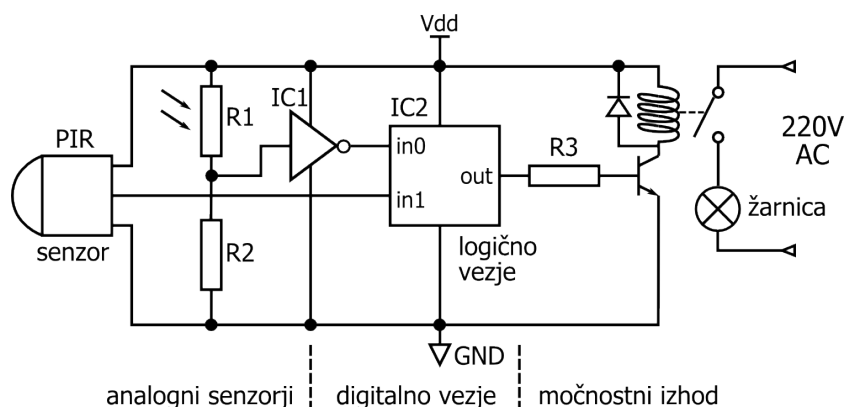
Slika 1.7: Vhodi in izhodi digitalnega sistema

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 preko 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 1.8. Sistem ima na vходу 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 1.8: Digitalni sistem za avtomatsko prižiganje luči

Nekateri senzorji, kot npr. senzor gibanja, že vsebujejo celotno vezje z merilno elektroniko in digitalnim izhodom. Signal iz preprostega svetlobnega senzorja - 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 vходу manjša od nastavljenega praga dobimo na izhod en logični nivo, sicer pa drugega.

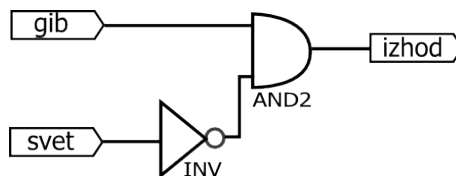
Žarnica potrebuje omrežno napetost 220 V, zato jo priključimo na izhod logičnega vezja preko močnostnega pretvornika. Pretvornik lahko naredimo kot elektronsko stikalo z vezavo tranzistorja in releja.

1.3.1 Izvedba sistema z logičnim vezjem

Pri izdelavo 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 pripra-

vimo na računalniku, ga prevedemo in naložimo v vezje. Slika 1.9 prikazuje shematski načrt logičnega vezja, ki je pripravljen za prevajanje v tehnologijo programirljivih vezij.



Slika 1.9: 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;
```

1.3.2 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.

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 iz 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);
}

```

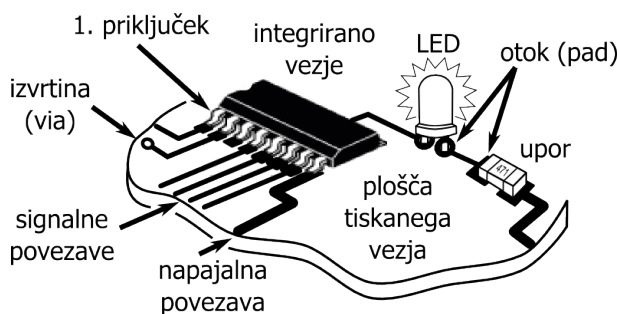
Če želimo narediti spremembo v delovanju, npr. dodati ugašanje luči z zakasnitvijo, moramo le dopolniti, prevesti in na novo naložiti program. Izvedbe digitalnih sistemov s procesorji so zelo prilagodljive in zaradi tega tudi zelo popularne.



1.4 Izdelava tiskanega 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.

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. vitroplast plošče iz epoksi in steklenih vlaken) z bakrenimi povezavami. Komponente so pritrjene in povezane s postopkom spajkanja.



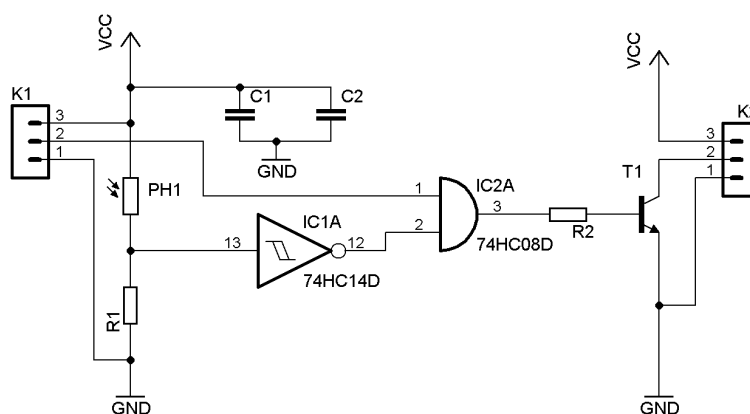
Slika 1.10: Tiskano vezje s površinsko montiranimi elektronskimi elementi

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 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

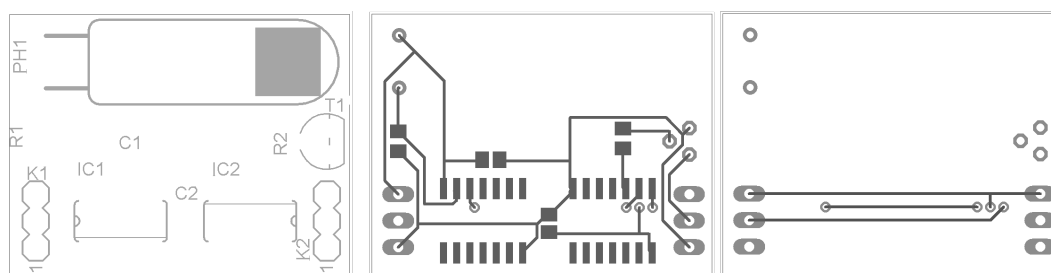
naredimo izvrtine, novejšje komponente pa so pritrjene kar na površini tiskanega vezja (angl. *Surface Mount Devices*). Tiskana vezja imajo eno, dve ali več bakrenih plasti ali slojev. Večslojna tiskana vezja so narejena z lepljenjem izdelanih dvoplastnih vezij v sendviče. Preprosta elektronska vezja so dvo ali štiriplastna, zapletena računalniška plošča pa ima tudi več kot 20 plasti.

Nekatere izvrtine v vezju so namenjene za povezave med plastmi (angl. *via*) zato so prekrita 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.



Slika 1.11: Shema vezja za avtomatsko prižiganje luči v programu Eagle.



Slika 1.12: Načrt tiskanega vezja: sitotisk, zgornja in spodnja plast.

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.

Naloga

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?