

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet elektrotehnike i računarstva

Zavod za elektroničke sustave i obradbu informacija

KONSTRUKCIJA I PROIZVODNJA ELEKTRONIČKIH UREĐAJA

Ratko Magjarević

Zoran Stare

Mario Cifrek

Hrvoje Džapo

Matko Ivančić

Igor Lacković

Denis Voloder

UPUTE ZA VJEŽBE

Zagreb, 2004.

SADRŽAJ

1. TEHNOLOGIJA TISKANIH PLOČICA	3
1.1. Tiskane pločice	5
1.2. Izrada tiskanih pločica	4
1.3. Laboratorijska izrada tiskanih pločica	8
2. PROJEKTIRANJE TISKANIH PLOČICA	12
2.1. Ulazni zahtjevi i priprema procesa projektiranja	12
2.2. Projektiranje tiskanih veza	18
2.3. Izlazni podaci i projektna dokumentacija	28
3. TEHNIČKA DOKUMENTACIJA	29
3.1. Proizvodna dokumentacija	29
3.2. Korisnička dokumentacija	30
3.3. Servisna dokumentacija	32
4. AUDITORNE VJEŽBE	A-1
4.1. Pouzdanost elektroničkih komponenata	A-1
4.2. Toplinska svojstva elektroničkih komponenata	A-12
4.3. Elektronički izvori napajanja	A-25
4.4. Istosmjerno-istosmjerni pretvornici	A-36
4.5. Svojstva pasivnih elektroničkih komponenata	A-44
4.6. Zaštita od elektromagnetskih smetnji	A-51
5. NAPUTAK ZA IZRADU PROGRAMA	L-1
6. PRORAČUN IZVORA NAPAJANJA	IN-1

1. TEHNOLOGIJA TISKANIH PLOČICA

1.1. Tiskane pločice

Tiskanim pločicama se električki i mehanički povezuju komponente elektroničkih sklopova i uređaja. Električke veze se ostvaruju tankim kovinskim trakama smještenim s jedne ili s obje strane nosive podloge od izolacijskog materijala. Podloga mehanički povezuje elektroničke komponente, koje se na nju pričvršćuju lemljenjem kontaktnih izvoda s tiskanim vodovima.

Građa nosive podloge je slojevita (laminat). Temeljni materijal slojeva je papir ili staklo (staklena vlakna). Kao punilo (ljepilo) pri prešanju više slojeva na povišenoj temperaturi, najčešće se koriste fenolne ili epoksidne smole. Materijali na osnovi stakla (vitroplast, FR-4 i FR-5) imaju bolja izolacijska (dielektrična), kemijska (slabije upijaju vlagu), mehanička (čvršći su) i temperaturna (podnose više temperature) svojstva od materijala na osnovi papira (pertinaks, FR-2 i FR-3), ali su znatno skuplji.

0,8 mm	1,6 mm	2,4 mm
--------	--------	--------

Tablica 1.1. Normirane debljine nosive izolacijske podloge tiskanih pločica

Kao vodljivi sloj koristi se tanka bakrena folija, lijepljenjem pričvršćena na nosivu izolacijsku podlogu pločice.

17,5 μm	35 μm	70 μm
--------------------	------------------	------------------

Tablica 1.2. Normirane debljine bakrenog sloja tiskanih pločica

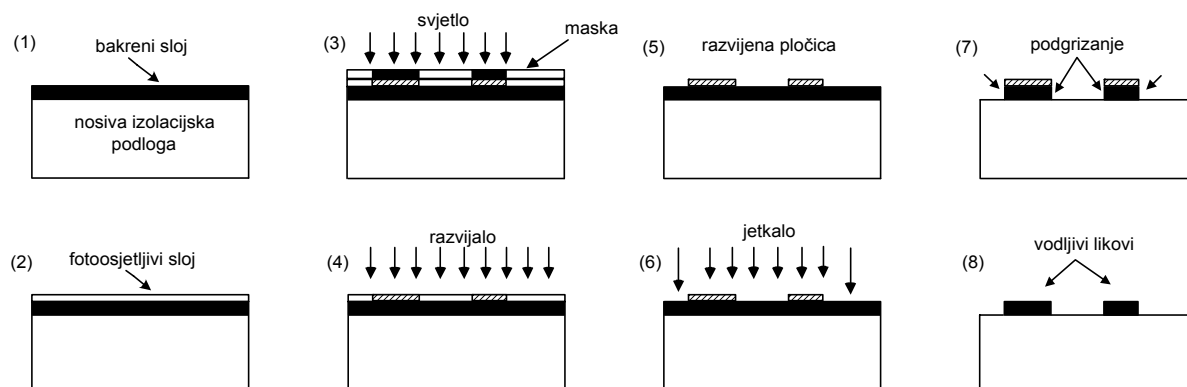
Tiskanje vodova je izrada vodljivih likova u vodljivom sloju na površini pločice

- ♦ subtraktivnim,
- ♦ aditivnim ili
- ♦ mješovitom postupkom,

a prema predlošku. Subtraktivnim postupkom se s pločice potpuno prekrivene vodljivim slojem uklanjaju suvišni dijelovi, dok se aditivnim likovi izrađuju selektivnim nanošenjem vodljivog materijala. Za izradu vodljivih likova na pločicama s bakrenim slojem redovito se koristi subtraktivni postupak. Prethodno se na bakreni sloj nanosi maska od materijala otpornog na jetkanje, i to najčešće

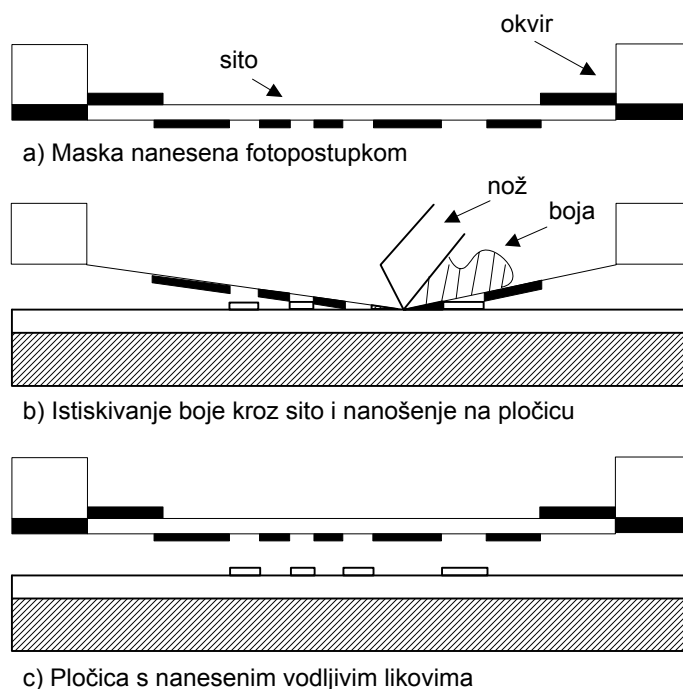
- ♦ fotopostupkom ili
- ♦ sitotiskom.

Fotopostupak omogućuje preciznu izradu vrlo uskih, gusto raspoređenih likova. Primjenjuje se u pojedinačnoj i serijskoj proizvodnji tiskanih pločica, a koriste ga i studenti u sklopu konstrukcijskih i diplomskih radova na Zavodu za elektroničke sustave i obradbu informacija.



Slika 1.1. Primjena fotopostupka u izradi tiskanih pločica

Sitotisak je tehnika protiskivanja boje kroz sito na podlogu. Sito (mreža od svile, najlona ili kovine) napeta je na okvir. S gornje strane sita stavlja se boja, a na donju stranu je prethodno fotografskim postupkom nanescena maska. Boja se zatim mehanički protiskuje kroz sito. Sito ne smije dodirivati podlogu da ne bi došlo do podlijevanja boje.



Slika 1.2. Primjena sitotiska u izradi tiskanih pločica

Kakvoća pločica dobivenih sitotiskom ovisi o finoći sita. Sitotiskom se ne mogu ostvariti male dimenzije vodljivih likova kao fotopostupkom, ali je postupak jeftin pa se često koristi u serijskoj proizvodnji tiskanih pločica.

Za nanošenje likova u proizvodnji tiskanih pločica koriste se i klasične tiskarske metode, litotisak i litooffset tisak. Tehnologija prešanja i isjecanja bakrenih likova primjenjuje se samo kod vrlo velikih serija, ukoliko dopustiva odstupanja dimenzija likova nisu premala. Te tehnologije zahtijevaju izradu posebnih mehaničkih alata što ih čini isplativima samo kod proizvodnje velikog broja tiskanih pločica.

Likovi se na pločice nanose prema predlošku ili filmu. Pravila za izradu predložaka opisuju dozvoljene postupke sukladno električkim značajkama sklopova i mehaničkim svojstvima komponenata. Predlošci za pločice s jednostranim i dvostranim vezama mogu se izrađivati ručno ili pomoću programa za projektiranje tiskanih pločica na računalima. Višeslojne tiskane pločice se isključivo projektiraju pomoću računala. Programi se mogu koristiti samo za crtanje vodljivih likova ili za sveukupno projektiranje tiskanih veza. Pod projektiranjem tiskanih veza podrazumijeva se smještaj (*placement*) i međusobno povezivanje komponenata (*routing*) na tiskanoj pločici. Veze između komponenata opisane su planom povezivanja (*netlist*), izvedenim iz električke sheme sklopa nacrtane primjenom odgovarajućeg programa. Danas programi za povezivanje (*router*) mogu ostvariti sve veze, ukoliko je gustoća komponenata predviđenih za smještaj na pločici manja od programom predviđene za izabrani broj slojeva (≥ 2). Gustoćom komponenata smatra se omjer zbroja efektivnih površina komponenata projiciranih na površinu pločice i površine pločice. Pri tome se podrazumijeva određena gustoća izvoda komponenata (broj izvoda po jedinici njene površine), obično ona svojstvena integriranim krugovima u DIL kućištu. Pravila za projektiranje tiskanih pločica navedena u nastavku uključena su dijelom i u programe na računalima.

1.2. Izrada tiskanih pločica

Tehnološki proces izrade tiskanih pločica uključuje tehnički vrlo zahtjevne mehaničke, kemijske i električke postupke. Broj i redoslijed tih postupaka te njihova složenost i kakvoća, odrednice su procesa iz kojih proizlaze granične ostvarive značajke proizvedenih tiskanih pločica. Proces mora osigurati:

- ♦ preciznu izvedbu likova (tiskanih veza) u tankom bakrenom sloju selektivnim uklanjanjem njegovih suvišnih dijelova,
- ♦ ostvarenje prospojnih rupa (rupe s vodljivim bočnim stijenkama, *plated through hole*) za električko povezivanje likova na dva (ili više) izolacijskim materijalom odvojenih bakrenih slojeva, te
- ♦ zaštitu bakrenih likova, poglavito od korozije.

Elementi vodljivih likova su vodovi (*track*) i lemne točke (*pad*). Lemne točke su kružni ili pravokutni prstenovi smješteni na prospojnim rupama. Prospojne rupe su i lemne rupe u koje se leme žičani izvodi elektroničkih komponenata, i prospoji (*via*, *via hole*) za električko povezivanje vodova na dva ili više izolacijskim

materijalom odvojenih bakrenih slojeva. Dimenzije vodljivih likova se redovito iskazuju u tisućinkama (*mil*, *mil*) inča ($1\text{ inch} = 25,4\text{mm}$), budući da takvu rasterizaciju koriste programi za projektiranje tiskanih veza na računalu, čemu i proizvođači prilagođuju dimenzije elektroničkih komponenata.

Ključni mehanički parametri kakvoće procesa su najmanje ostvarive dimenzije elemenata vodljivih likova, i to:

- ◆ širina tiskanih vodova (0,1mm - 0,3mm, odnosno 4mils - 12mils),
- ◆ razmak između električki odvojenih elemenata vodljivih likova (0,1mm - 0,3mm), i
- ◆ promjer prospojnih rupa (0,3mm - 0,6mm).

Projektant elektroničkog uređaja određuje zahtjeve na tehnološki proces, i to na temelju:

- ◆ sveukupnih električkih značajki sklopovlja koje se tom tehnologijom izrađuje,
- ◆ radne okoline uređaja (temperatura, tlak, vlažnost, elektromagnetske smetnje, ...)
- ◆ elektromehaničkih i toplinskih svojstava ugradbenih elektroničkih komponenata,
- ◆ veličine serije, te
- ◆ cijene izrade,

a za postupak izrade mora osigurati:

- ◆ nacrt tiskanih veza (vodljivih likova) na lemnjoj strani, strani komponenata (za dvostrane i višeslojne veze) te međuslojevima (za višeslojne veze) tiskane pločice,
- ◆ opis rupa (plan bušenja) koji sadrži podatke o položaju (koordinatama) i konačnim (nakon presvlačenja vodljivim slojem) promjerima rupa,
- ◆ nacrt lemne maske za nanošenje zaustavnog (zaštitnog) laka, i
- ◆ položajni nacrt komponenata (ugradbenu shemu).

1.2.1. Opis tehnološkog procesa (za dvostrane veze s prospojnim rupama)

Izrada tiskanih pločica (Slika 1.3.) započinje bušenjem rupa računalom upravljanom bušilicom. Promjer svrdala mora biti veći (70 do $100\mu\text{m}$) od zadanih konačnih promjera prospojnih rupa, zbog kasnijeg nanošenja vodljivog sloja (2×25 do $35\mu\text{m}$ Cu + 2×10 do $20\mu\text{m}$ Sn/Pb) na bočne stijenke rupa. Stijenke rupa trebaju biti ravne i glatke, pa se stoga primjenjuju bušilice s velikom brzinom vrtnje te oštra svrdla. Time se dodatno izbjegava pregrijavanje svrdla i pločice, te podizanje nalijepljenog bakrenog sloja s donje strane pločice. Redovito se buši više (3 do 5) pločica istovremeno, čime se ubrzava postupak, no i povećavaju položajne pogreške na donjim pločicama zbog savijanja svrdala.

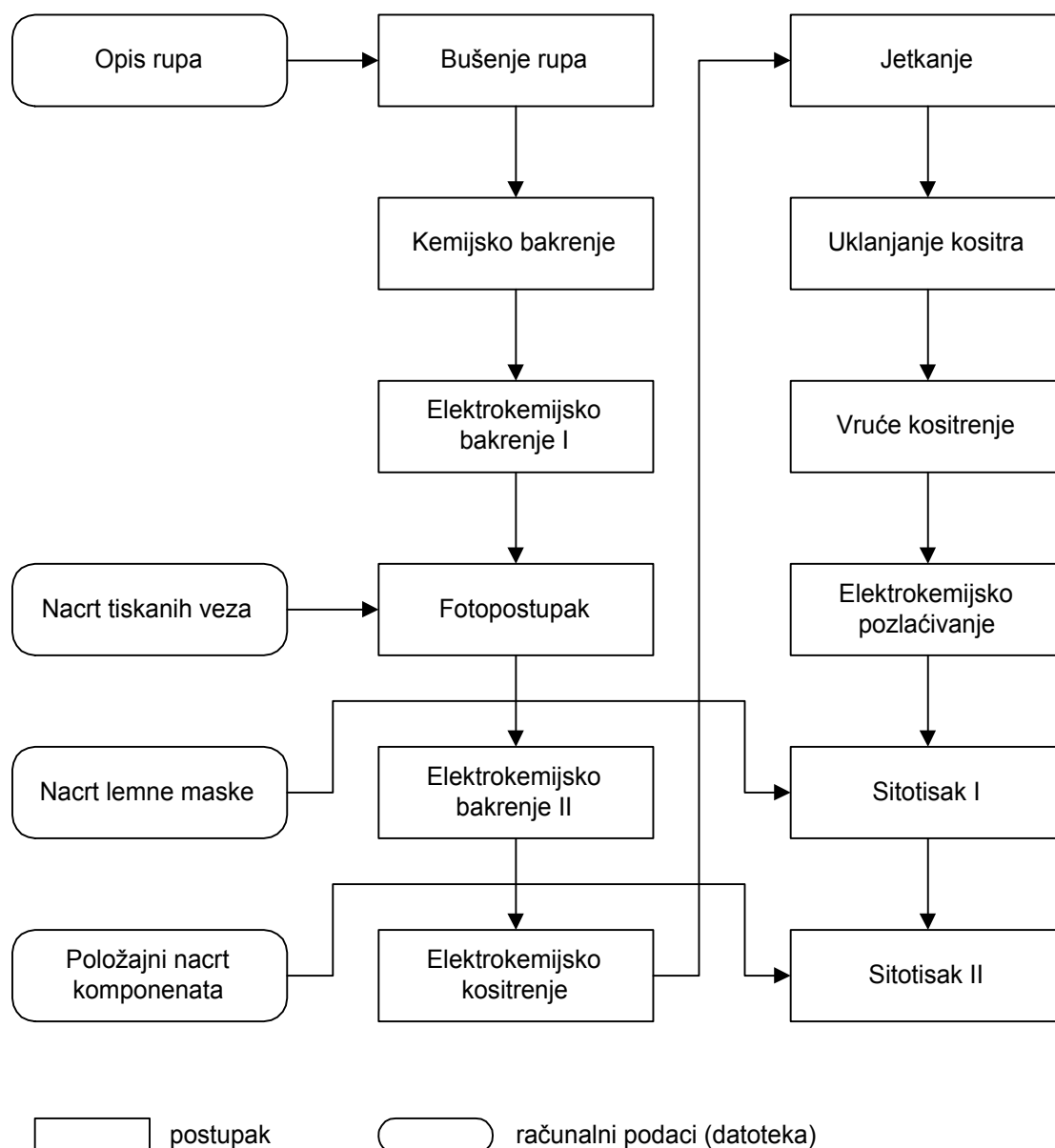
Nakon bušenja se bestrujnim redukcijskim postupkom (Kemijsko bakrenje) nanosi vrlo tanki (oko $0,5\mu\text{m}$) sloj bakra, budući da bi u tom trenutku elektrolitički postupak nanošenja bakra bio neučinkovit jer su bočne stijenke rupa još nevodljive. Potom se elektrolitičkim postupkom (Elektrokemijsko bakrenje I) nanosi tanki (oko $5\mu\text{m}$) sloj bakra na obje strane pločice i po stijenkama rupa. Anoda u elektrolizi je elektrolitički bakar 99,5%-tne čistoće, katoda je tiskana pločica (u tom trenutku su bakreni slojevi s obje strane pločice kratko spojeni tankim slojem bakra prethodno nanesenim na bočne stijenke rupa), a kao elektrolit se najčešće koristi sulfatna kiselina i bakreni sulfat. Nakon elektrokemijskog bakrenja rupe su električki vodljive, s dovoljno čvrstim slojem bakra na stijenkama, te se mogu izrađivati tiskane veze na obje strane pločice.

Sljedeći korak je fotopostupak kojim se, pomoću filma izrađenog na temelju nacrt tiskanih veza, nanosi maska (negativ) koja omogućuje potrebnu selektivnost daljnjih postupaka. Kao fotoosjetljivi sloj koristi se suhi film, koji se na pločicu strojno lijepi na povišenoj temperaturi i tlaku.

Poslije fotopostupka se ponovo elektrolitičkim postupkom (Elektrokemijsko bakrenje II) nanosi sloj bakra, no sada je sloj deblji (oko $25\mu\text{m}$) i ne nanosi se po sveukupnoj površini pločice, već, zahvaljujući prethodno nanesej maski, samo po mjestima budućih tiskanih veza. Potom se također elektrolitičkim postupkom (Elektrolitičko kositrenje) kroz istu masku nanosi tanki (oko $10\mu\text{m}$) sloj slitine kositar-olovo (Sn/Pb) sastava 60% Sn i 40% Pb (lemna slitina). Taj sloj slitine kositar-olova je maska za jetkanje suvišnih dijelova bakrenih slojeva na obje strane pločice.

Nakon skidanja maske nanosene fotopostupkom, koja više nije potrebna, slijedi jetkanje u tekućini (željezni klorid, bakreni klorid, amonijak-persulfat, kromsumporna kiselina) koja nagriza bakar, a ne nagriza slitinu kositar-olovo. Poslije jetkanja na pločici preostaju upravo zadani bakreni vodljivi likovi. Prekriveni su tankim slojem slitine kositar-olovo, koji je povoljno ukloniti iako bi mogao poslužiti za zaštitu bakra od korozije, a zbog mogućih poteškoća pri lemljenju komponenata. Naime taj sloj je nanesen elektrolizom, a budući da nije čista kovina već slitina, to mu površinska debljina i postotak sastojaka (time i sveukupna, posebice kemijska svojstva) nisu jednoliki po cijeloj površini pločice. Dodatno, taj sloj je i oštećen u postupku jetkanja, a zbog načina nanošenja on ionako ne prekriva bočne stijenke bakrenih likova.

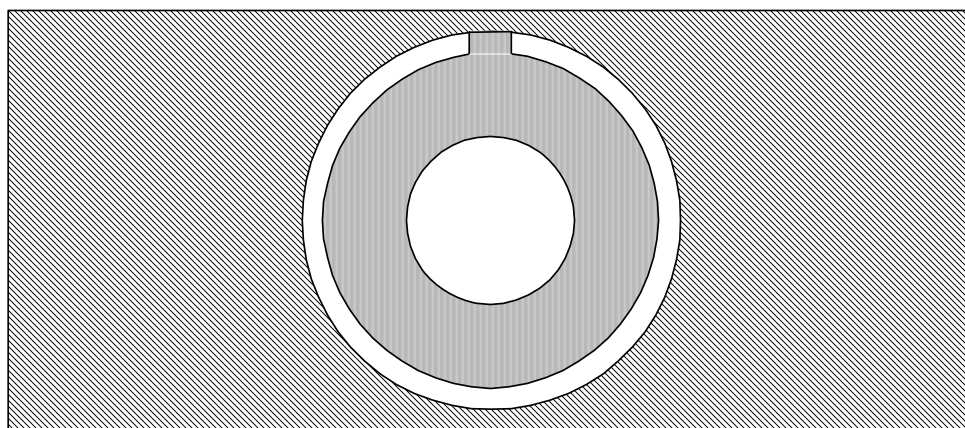
Poslije skidanja elektrolitičkog sloja kositar-olova, ta ista slitina se ponovo nanosi na bakrene likove u sloju debljine oko $10\mu\text{m}$, no ovaj puta provlačenjem kroz rastaljenu slitinu (vruće kositrenje) u posebnim kupkama (*HAL - Hot Air Leveling*) s toplom zračnom strujom pomoću koje se postiže jednolika debljina i sastav sloja po cijeloj površini te izbjegava zapunjavanje prospojnih rupa. Taj sloj u potpunosti prekriva vodljive bakrene likove i štiti ih od mehaničkih i kemijskih utjecaja, osobito korozije.



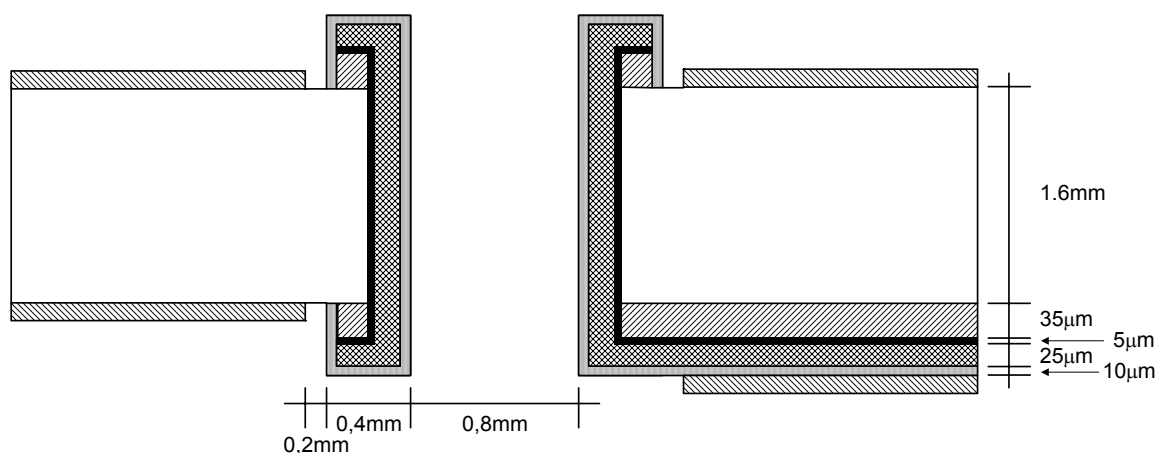
Slika 1.3. Skica tehnološkog procesa - redoslijed glavnih postupaka u proizvodnji dvostranih tiskanih pločica s prospojnim rupama

Time su završeni svi bitni postupci u izradi pločice te se već na tom stupnju ona može primjeniti. No redovito se izvode i daljnji postupci za dodatna poboljšanja. U slučaju da na pločici postoje rubni (*edge*) konektori (kao primjerice na utičnim pločicama osobnih računala), oni se pozlaćuju (Elektrokemijsko pozlaćivanje) zbog poboljšanja kemijskih, mehaničkih i električkih svojstava. Kao podloga za pozlatu nanosi se sloj (5 do 10 μm) nikla elektrolitičkim postupkom, čime se poboljšavaju površinska svojstva. Tako se izbjegava poroznost završnog, vrlo tankog (1 do 4 μm) sloja zlata, koji se također nanosi elektrolitičkim postupkom. Zlatu se prethodno u vrlo malom postotku (oko 1%) dodaju kobalt, nikal ili rodij zbog povećanja tvrdoće.

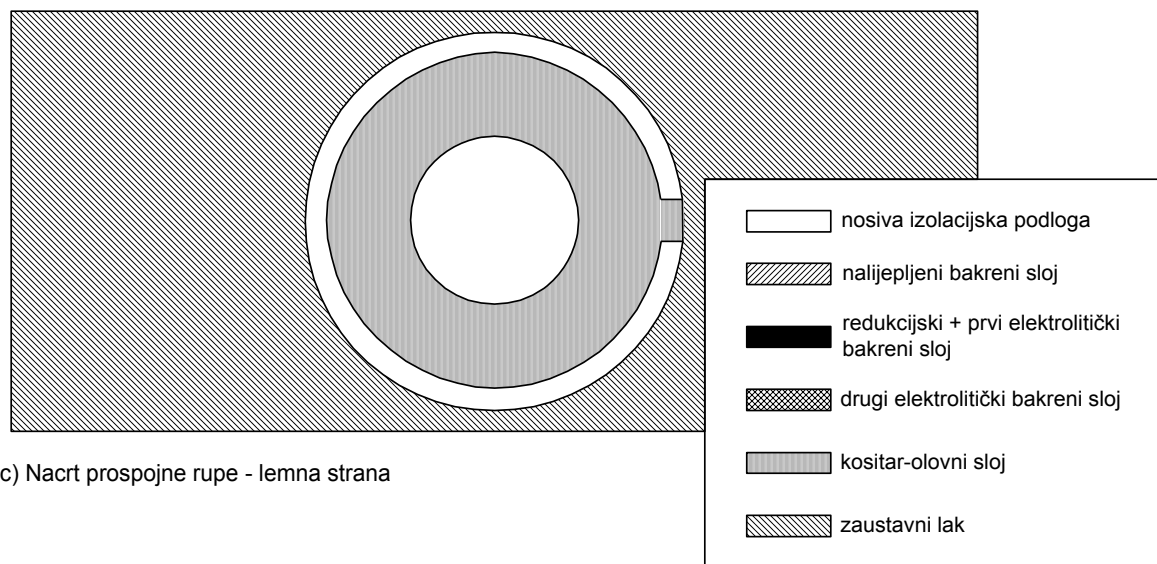
Naposlijetku se prema filmovima izrađenima na temelju nacrtu lemne maske i položajnog nacrtu komponenata, sitotiskom (Sitotisak I) prvo nanosi zaustavni (zaštitni) lak, a potom i otiskuje (Sitotisak II) položajni nacrt komponenata (ugradbena shema). Zaustavni lak se nanosi po cijeloj površini pločice, osim po lemnim točkama na prospojnim rupama. Temeljna funkcija mu je onemogućavanje nepotrebnog razlijevanja lema pri ugradnji komponenata, što je naročito važno kod lemljenja u lemnim kupkama zbog smanjenja potrošnje lemne slitine. Dodatno, zaustavni lak električki izolira tiskane vodove te im povećava otpornost na okolne, osobito kemijske utjecaje, zbog čega se i naziva zaštitnim.



a) Nacrt prosojne rupe - komponentna strana



b) Presjek prosojne rupe



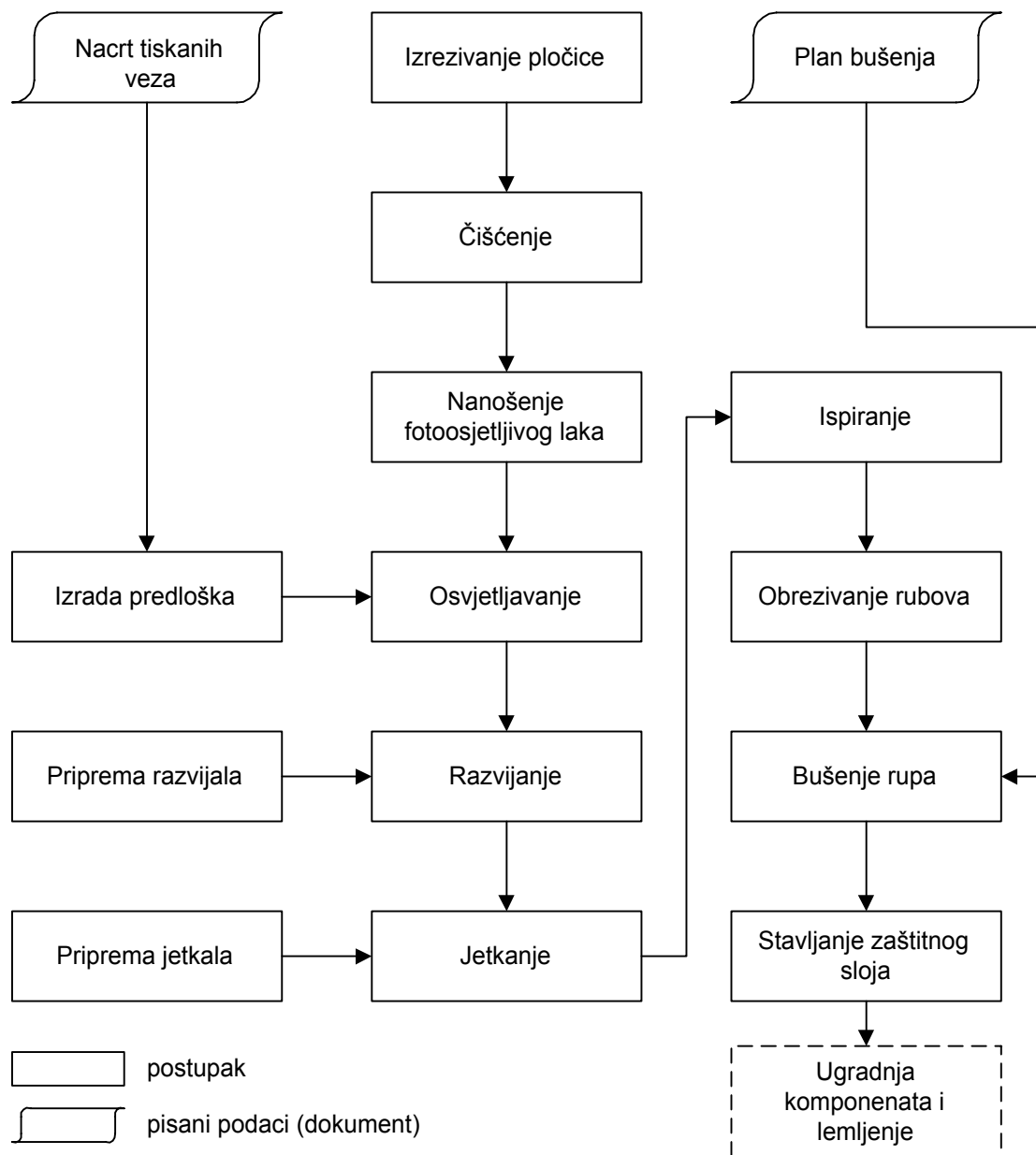
c) Nacrt prosojne rupe - lezna strana

Slika 1.4. Prikaz prosojne rupe na dvostranoj tiskanoj pločici

Položajni nacrt komponenata, osim slikovnog prikaza komponenata, sadrži i njihove slovno-brojevne oznake te druge korisne zapise. Otiskivanje tog nacrt na tiskanoj pločici omogućuje bržu, jednostavniju i pouzdaniju ugradnju komponenata (ako se radi ručno) te olakšava ispitivanje, umjeravanje i održavanje uređaja.

1.3. Laboratorijska izrada tiskanih pločica

Elektronički razvojni laboratoriji najčešće ne raspolažu vrlo složenom i skupom opremom (primjerice računalom upravljanim strojevima ili elektrolitičkim kupkama) neophodnom za u prethodnom poglavlju opisani tehnološki proces izrade dvostranih tiskanih pločica s prospojnim rupama. U znanstvenim istraživanjima i razvoju prototipova elektroničkih sustava česte su potrebe za izmjenama sklopovlja koje je redovito na takvoj razini složenosti da je uporaba žica i utičnih probnih pločica (*proto-board*) neprihvatljiva. Primjena pak jednostavne, pouzdane i jeftine tehnike omčastog povezivanja (*wire wrap*) prikladna je uglavnom za digitalno sklopovlje na niskim i srednjim frekvencijama.



Slika 1.5. Slijed postupaka u laboratorijskoj izradi jednostranih tiskanih pločica

Zbog svega toga povoljno je raspolagati opremom za izradu jednostranih tiskanih pločica, koja nije skupa niti su joj postupci primjene osobito složeni. Štoviše, uvježbani rukovatelj u takvim uvjetima može zadovoljavajuće dobro izraditi i dvostrane tiskane pločice bez prospojnih rupa. U tom se slučaju komponente moraju lemiti s obje strane tiskane pločice, a električka vodljivost prospoja se ostvaruje lemljenjem kratkospojnika također s obje strane pločice.

U nastavku je opisan proces izrade jednostranih tiskanih veza (Slika 1.5.), koji se primjenjuje na Zavodu za elektroničke sustave i obradbu informacija.

1.3.1. Priprema pločice

Proces izrade započinje pripremom pločice koja uključuje izrezivanje i čišćenje. Dimenzije pločice moraju biti 5 do 10mm veće od konačnih zbog narušavanja kemijskih i mehaničkih svojstava nezaštićenih bočnih rubova nosive izolacijske podloge pločice tijekom kasnijih postupaka. Bakreni površinski sloj pločice mora se očistiti od sloja oksida, masnoće i prašine, i to uporabom mehaničkih ili kemijskih sredstava za čišćenje. Pri tome je preporučljivo koristiti postupke i sredstva koja ne oštećuju ionako vrlo tanak (najčešće 35 μ m) bakreni sloj.

1.3.2. Fotopostupak

Fotopostupkom se na prethodno pripremljenu pločicu nanosi maska za selektivno jetkanje bakrenog sloja. Prvo se na pločicu nanosi fotoosjetljivi lak s pozitivnim djelovanjem, prskanjem s udaljenosti oko 20cm. U prostoriji treba biti što je moguće manje prašine (čestice prašine pri padu na lak prouzrokuju njegovo lokalno nakupljanje, čemu je posljedica prsten bez sloja laka u okolini te točke), svjetlo mora biti prigušeno, a nanese sloj laka što jednolikiji i tanji. Ravnomjerno razlijevanje laka može se postići prskanjem na hladnu pločicu (prethodno opranu u hladnoj vodi, a potom posušenu brisanjem papirom iza kojeg ne zaostaju sitne niti) te naknadnom polaganom trešnjom ako je potrebno. Potom se lak suši 10 do 15 minuta na temperaturi oko 70°C, obvezno u tamnom prostoru. Za sušenje na sobnoj temperaturi bilo bi potrebno oko 24 sata, no treba težiti što bržem sušenju zbog manje mogućnosti onečišćenja nanesenog sloja. Sušenje laka na temperaturi višoj od 70°C nije preporučljivo jer mu značajno pogoršava svojstva.

Za selektivno osvjetljavanje fotolaka poželjan je pozitiv fotografskog filma nacrtat tiskanih veza, no zadovoljavajuća je i primjena predloška otisnutog laserskim pisačem na prozirnom papiru. Predložak, s likovima otisnutim na strani okrenutoj prema pločici, mora dobro nalijegati na površinu pločice. U protivnom rubovi maske nakon razvijanja neće biti oštri zbog ogiba svjetlosti, te će podgrizanje vodljivih likova tijekom jetkanja biti izraženije. Trajanje osvjetljavanja ovisi o vrsti i snazi izvora svjetlosti, debljini fotoosjetljivog sloja i kontrastnosti predloška. Vrijeme osvjetljavanja jakim izvorom ultraljubičaste svjetlosti je 40 do 50 sekundi, a grafoskopom 5 do 10 minuta.

Nakon selektivnog osvjetljavanja lak se razvija u 7%-tnoj vodenoj otopini natrijeve lužine. Preporučljivo je koristiti mlaku otopinu temperature oko 20°C. Ako je postupak osvjetljavanja uspio, dovoljno je pločicu razvijati oko pola minute. Brzina razvijanja razmjerna je koncentraciji i temperaturi lužine. Natrijeva lužina je otrovna i nagrizi kožu pa ju treba koristiti oprezno. Kristali (u tom obliku se kupuje) natrijeve lužine ne smiju se dirati rukama jer su vro higroskopni, zbog čega se na mjestu dodira stvara lužina vrlo velike koncentracije i prodornosti. U slučaju dodira s kožom lužinu treba što prije isprati tekućom vodom.

Nakon razvijanja i ispiranja pločice mlazom vode, bakreni sloj pločice prekriven je fotoosjetljivim slojem samo po dijelu površine na kojem se trebaju nalaziti vodljivi likovi - tiskane veze.

1.3.3. Jetkanje

Pločica se može jetkati bilo kojom otopinom koja nagrizi bakar (željezni klorid, bakreni klorid, amonijak-persulfat, kromsumporna kiselina). Najčešće se koristi željezni klorid zbog mirne reakcije, zadovoljavajućeg stupnja nagrizanja, brzine reakcije i cijene. Brzina reakcije ovisi o koncentraciji i temperaturi otopine. Tako pri koncentraciji 40% Be i temperaturi 25°C nezasićena otopina željeznog klorida može prihvatiti 75 grama bakra po litri. Preračunato za 1m² jednostrane bakrene ploče debljine 35 μ m (uz pretpostavku da se jetkanjem skida 50% bakrene površine), potrebno je oko dvije litre otopine takve koncentracije. Jetkanje u navedenim uvjetima traje 5 do 10 minuta, a može se ubrzati strujanjem otopine, odnosno lokalnim izmjenama zasićene otopine s nezasićenom. Primjena jetkalica koje proizvode otopinu željeznog klorida u obliku pjene ubrzava postupak, budući da je koncentracija otopine na mjehurićima velika. Otopina se na nižim temperaturama lakše pjeni, ali je manje agresivna. Optimalno je zagrijavanje na temperaturu između 25 i 35°C.

Čim je jetkanje završeno, pločicu treba izvaditi iz otopine i temeljito isprati tekućom vodom. Pretjerano zadržavanje pločice u otopini je nepovoljno budući da željezni klorid bočno nagrizi bakar ispod fotopostupkom nanese zaštitne maske, čime se smanjuje efektivna površina vodova. Kod vrlo tankih vodova to čak može prouzročiti potpuni prekid. Nadalje, predugim jetkanjem otopina prodire u podlogu (osobito kroz bočne stijenke) te joj pogoršava izolacijska svojstva. Zaostajanje pak željeznog klorida na pločici može izazvati i naknadno pojačano oksidiranje bakra.

1.3.4. Završna obrada pločice

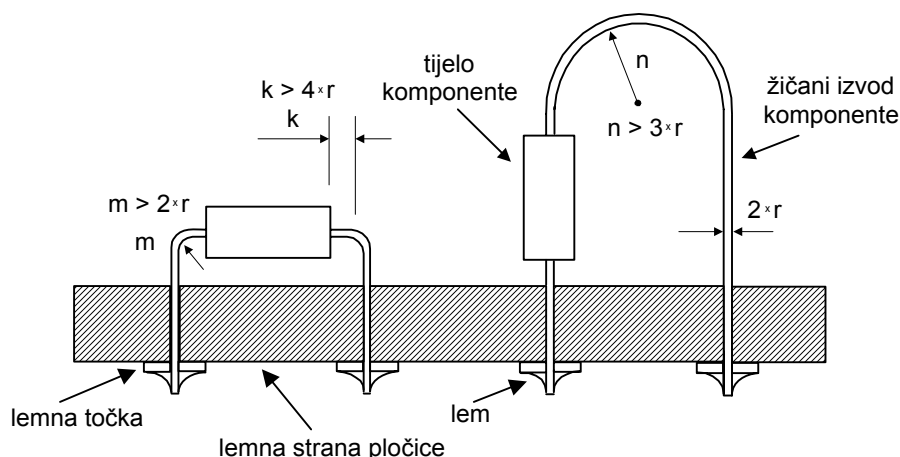
Po završetku jetkanja preostali fotolak (maska) se s bakrenih likova može ukloniti mehanički, otapalom (acetom) ili, nakon ponovnog osvjetljavanja, u lužini preostaloj nakon razvijanja. Potom se obrezuju (5 do 10mm predviđenih pri postupku pripremnog izrezivanja) rubovi pločice sa svojstvima degradiranim tijekom prethodnih postupaka. Mehanička obrada završava se ručnim bušenjem rupa prema planu bušenja. Plan bušenja je slikovni prikaz rupa u mjerilu (položajni nacrt rupa), s jasno naznačenim promjerom svrdla za svaku rupu.

Budući da je profesionalna izvedba zaštite tiskanih vodova (opisana u prethodnom poglavlju) presvlačenjem kovinskim slojem i zaustavnim lakom neprimjerena laboratorijskim uvjetima, primjenjuje se jednostavno i redovito dovoljno učinkovito premazivanje tekućim kalofonijem. Kalofonij je ujedno i sredstvo za snižavanje tališta lemne legure, što je povoljno.

1.3.5. Ugradnja komponenata sa žičanim izvodima

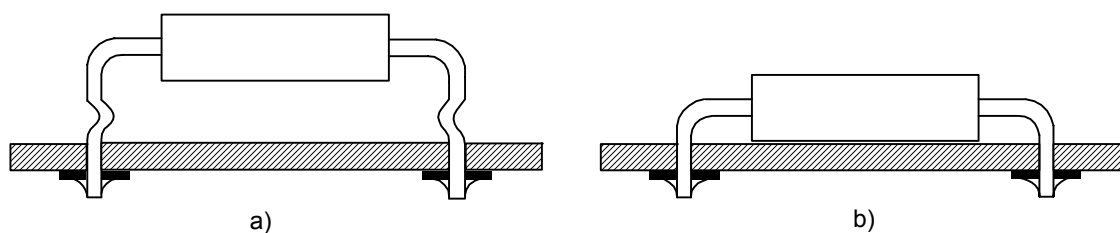
Ugradnja komponenata je postupak postavljanja komponenata na tiskanu pločicu prema položajnom nacrtu komponenata (ugradbenoj shemi) te potom lemljenje njihovih izvoda s lemnim točkama tiskanih vodova.

Prvi korak je savijanje izvoda komponenata na razmak određen predviđenim položajem lemnih točaka. Izvodi se savijaju na udaljenosti (od ruba tijela komponente) većoj od dvostrukog promjera izvoda. Najmanja duljina polumjera zakrivljenosti savinutih priključaka za vodoravnu ugradnju je dvostruki, a za okomitu trostruki polumjer izvoda (Slika 1.6.).



Slika 1.6. Pravilno smještanje komponenata i savijanje njihovih žičanih izvoda

Potom se komponente ugrađuju prema visini, počevši s najnižima. Nakon postavljanja komponenata iste ili približne visine u rupe na pločici, na njih se stavlja spužva da bi se pločica mogla okrenuti bez ispadanja komponenata. Prije lemljenja preporučljivo je, zbog smanjenja nepotrebnog odvođenja topline, skratiti izводе tako da im duljina na lemnj strani pločice bude oko 5mm.

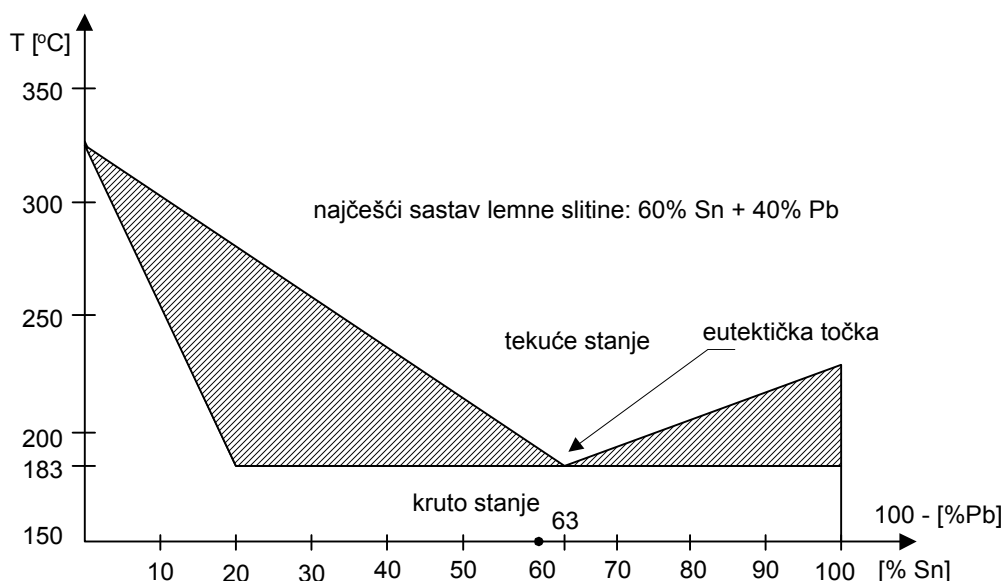


Slika 1.7. Pravilna a) i nepravilna b) ugradnja komponente koja se zagrijava tijekom rada

Izuzetak takvog načina ugradnje pri kojem komponente naliježu na tiskanu pločicu su komponente koje se tijekom rada sklopovlja zagrijevaju zbog disipacije snage (Slika 1.7.). Njih je potrebno ugraditi izdignute nekoliko milimetara do centimetar iznad pločice, da bi se poboljšalo odvođenje topline i izbjeglo zagrijavanje tiskane pločice. Nosive podloge na osnovi stakla trajno podnose temperature do oko 130°C, a one na osnovi papira do oko 110°C. Pri višim temperaturama mehaničke značajke im se bitno i nepovratno narušavaju.

1.3.6. Lemljenje

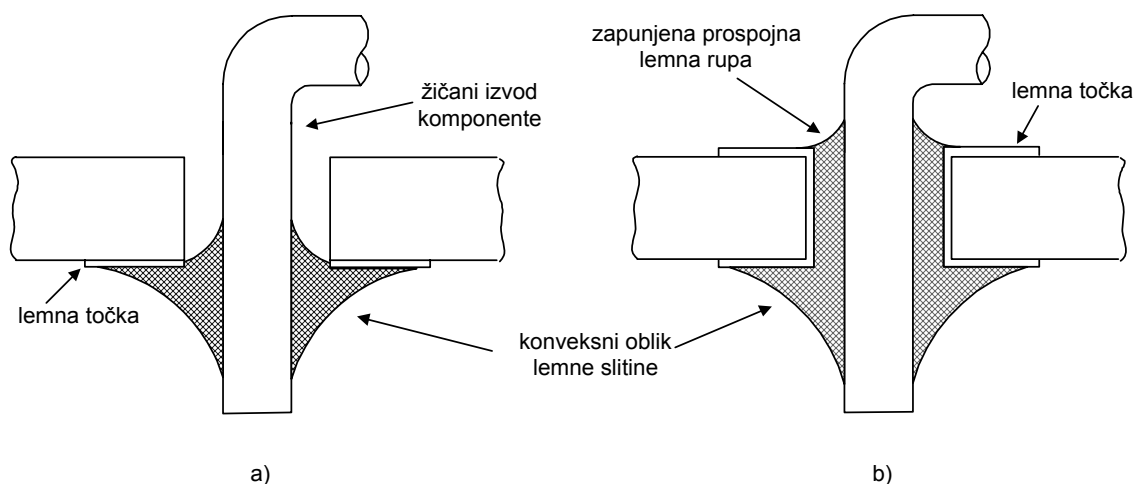
Lemljenje je metalurško povezivanje kovina, pri kojem lemna slitina (lem) služi i kao punilo i kao vodič, čime se istovremeno ostvaruju i mehanička i električka veza. Temeljni sastojci lemne slitine su kositar i olovo najčešće u omjeru 60:40 (od 55:45 do 70:30), a dodaju se bakar i zlato u manjim postocima. Temperatura tališta lemne slitine ovisna je o postotnim udjelima sastojaka (Slika 1.8.), a u primjenama joj je vrijednost oko 200°C. Tinol je lemna slitina izvedena u obliku šuplje žice čije središte je ispunjeno punilom koje služi za čišćenje lemnih mjesta.



Slika 1.8. Ovisnost temperature tališta slitine kositar-olovo (Sn/Pb) o postotnom sastavu

Strojno se tiskane pločice leme potapanjem (u lemnu slitinu), na lemnom valu ili u pećima uz primjenu posebnih lemnih pasta. Pri lemljenju potapanjem važno je nadzirati trajanje postupka, tako da se lemnja mjesta dovoljno zagriju te time izbjegnu hladni lemovi, a da se istovremeno komponente ne pregrijevaju. Tijekom potapanja pločica se mora protresati da bi se oslobodili plinovi koji nastaju na njenoj poledini i onemogućuju dobro lemljenje. Pločice koje se namjeravaju lemiti tim postupkom preporučljivo je izraditi sa slojem zaustavnog laka, zbog ograničavanja potrošnje lemne slitine.

Električke i mehaničke značajke lemnog spoja ostvarenog ručnim lemljenjem ovisne su o temperaturi vrha lemila, odvođenju topline (preko izvoda komponente i tiskanih vodova), trajanju lemljenja te vrsti primjenjenog sredstva (aditiva) za snižavanje tališta lemne slitine.



Slika 1.9. Izgled pravilno zalemljenog lemnog mjesta na jednostranoj **a)** i dvostranoj **b)** tiskanoj pločici

Kakvoća izvedbe lemnog spoja može se provjeriti pregledom. Pravilno zalemljeno lemno mjesto je srebrnog sjaja, a lemnja slitina konveksno prijanja uz žičani izvod komponente (Slika 1.8.). Zagasiti lemnji spoj i kuglasti oblik lemne slitine značajke su hladnog lema, koji je posljedica nedovoljnog zagrijavanja lemnog mjesta zbog preniske temperature vrha lemilice ili prekratkog trajanja zagrijavanja. Na mjestu hladnog lema je slaba električka i mehanička veza lemne točke (tiskanog voda) i izvoda komponente, pa je velika vjerojatnost slabljenja i potpunog prekida električke veze zbog utjecaja okoline tijekom rada sklopovlja. Zlatni sjaj lemnog spoja (pregrijani lem) ukazuje na previsoku temperaturu vrha lemila. Pretjerano zagrijavanje može prouzročiti odvajanje tiskanih vodova i vodljivih slojeva prospojnih rupa od nosive podloge pločice. Osobito to vrijedi za

prospojne rupe, budući da je toplinsko istezanje nosive podloge znatno veće od toplinskog istezanja bakrenog sloja (za podloge na osnovi stakla je taj omjer oko 3:1, a za one na osnovi papira oko 12:1).

Lemni aditivi omogućuju kemijsko uklanjanje oksida s lemnog mjesta, bolji spoj kovina-lem i učinkovitiji prijenos topline. Temeljni sastojak im je ili kalofonij ili kiseline. Kalofonij se proizvodi iz smola crnogoričnog drveća. Dobro čisti okside kovina, a zbog kemijske neutralnosti ne nagriza bakrene površine. Aditivi na osnovi kiselina koriste se pri lemljenju velikih površina i debljih žica.

Preporuke za lemljenje

- ♦ Izabrati vrh lemila prikladne veličine, ovisno o debljini izvoda komponente te veličini površine tiskanog voda na koji se lemi. Postaviti temperaturu vrha lemilice na oko 350°C.
- ♦ Skratiti izvode komponenata da bi se smanjilo nepotrebno odvođenje topline.
- ♦ Lemilom zagrijati lemno mjesto. Tek potom dodati tinol koji se mora razliti i pravilno oblikovati (Slika 1.8.), te brzo podići lemilo. Nosive podloge na osnovi stakla je primjerice na temperaturi 260°C dopustivo zadržati do 20 sekundi, a one na osnovi papira do 5 sekundi.
- ♦ Pregledati lemni spoj. Ako je nepravilan (hladni ili pregrijani lem, premalo ili previše lemne slitine) zagrijati ga te ukloniti lemnu slitinu pumpicom. Ovisno o vrsti nepravilnosti izmijeniti temperaturu (od 300°C do 400°C) vrha lemilice ako je potrebno. Nakon toga ponoviti postupak lemljenja.
- ♦ Nakon uspješnog lemljenja potrebno je tiskanu pločicu očistiti da bi se uklonio zaostali aditiv i spriječila korozija. Taj korak se preskače ukoliko su i aditiv i zaustavni lak izrađeni na osnovi kalofonija. Pločica se čisti kistom, 80%-tnom otopinom izopropilnog alkohola. Nakon čišćenja pločicu isprati vodom i potom osušiti. Ne preporuča se brisanje papirom ili tkaninom, jer preostaju sitne niti i vlakna.

2. PROJEKTIRANJE TISKANIH PLOČICA

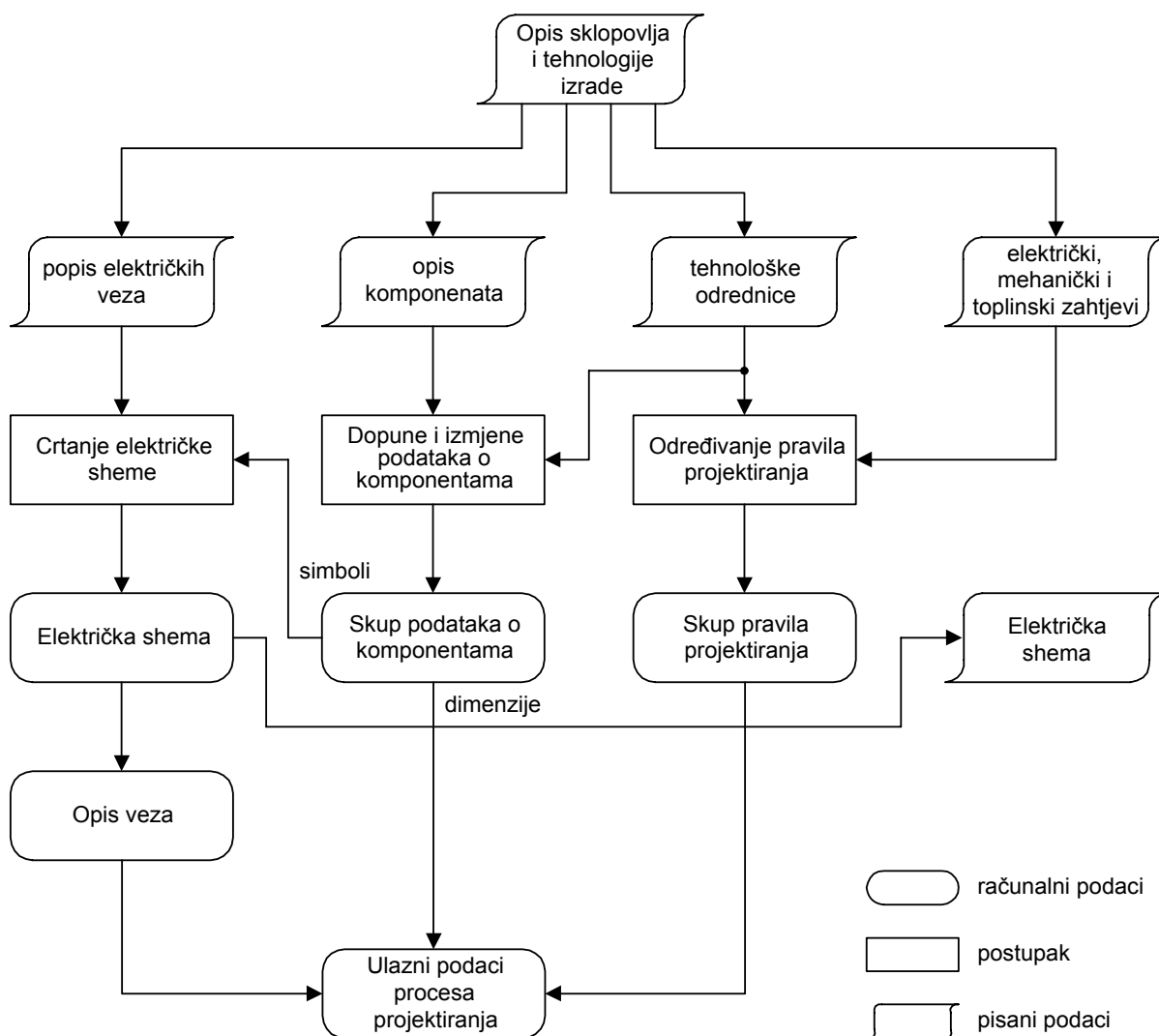
Projektiranje tiskane pločice je završni dio procesa električkog, mehaničkog i toplinskog projektiranja sklopovlja jedne zasebne cjeline elektroničkog uređaja. Električko i mehaničko povezivanje elektroničkih komponenata tiskanom pločicom nije puko smještanje komponenata na što manjoj površini i međusobno spajanje njihovih izvoda tiskanim vezama proizvoljnog oblika u što je moguće manje vodljivih slojeva.

Tiskana pločica je skup međusobno odvojenih vodljivih likova - tiskanih veza smještenih na nosivoj izolacijskoj podlozi. Tijekom rada sklopa tim likovima teče električna struja, a između njih postoji razlika potencijala. Vodljivi likovi nisu savršeno električki vodljivi, niti su neizmjerljivo malih geometrijskih dimenzija, niti su međusobno neizmjerljivo udaljeni, niti im je podloga savršeni električki izolator. Stoga je tiskana pločica skup električkih vodova s prostorno raspodijeljenim parametrima, međusobno povezanih elektromagnetskim putem. Nadomjesna električka shema (s elementima sa zgusnutim parametrima) voda je otporno-induktivno-kapacitivni (RLC) dvopol koji je kapacitivno-međuinuktivno-vodljivim (CMG) dvopolima povezan sa svima ostalima na tiskanoj pločici. Prema tome tiskana pločica iako nevidljiva u električkoj shemi sklopa, u njoj je sveprisutna, unoseći RLC dvopol u svaki čvor (spoj dvije ili više komponenata) te CMG dvopol između čvorova svih parova čvorova. Vrijednosti svojstvenih veličina elemenata tih dvopola su funkcije geometrije vodljivih likova, čije određivanje stoga nije crtanje već projektiranje.

Tiskane pločice projektiraju se primjenom dijelova sveobuhvatnih elektroničkih CAD programa koji podržavaju sve razine projektiranja sklopovlja, od određivanja električke sheme i njene provjere (simulacija) do projektiranja tiskanih veza i njihovog ispitivanja.

2.1. Ulazni zahtjevi i priprema procesa projektiranja

Glavni postupci u procesu projektiranja tiskanih veza su smještaj komponenata na pločicu i njihovo povezivanje. Sukladnost izvedbe tih postupaka s ulaznim zahtjevima omogućuje se pravilnom i potpunom pripremom (Slika 1.10.).



Slika 1.10. Priprema ulaznih podataka procesa projektiranja tiskanih veza


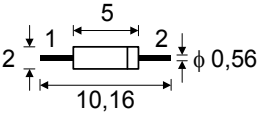

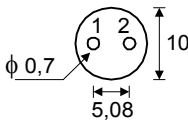


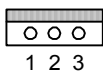
Cilj pripreme je pretvorba ulaznih zahtjeva (Opis sklopovlja i tehnologije izrade) najčešće u pisanom obliku, u računalne ulazne podatke za glavne postupke projektiranja. Opis sklopovlja i tehnologije izrade obuhvaća

- ◆ opis komponenata,
- ◆ popis električkih veza (spojeva),
- ◆ tehnološke odrednice, te
- ◆ dodatne električke, mehaničke i toplinske zahtjeve.

2.1.1. Opis komponenata

Opis komponenata sadrži njihove mehaničke značajke bitne za pravilno postavljanje i ugradnju na tiskanu pločicu, te temeljni električki opis neophodan za uspostavljanje veze s popisom električkih spojeva, odnosno električkom shemom. U njemu je za sve grupe istovrsnih komponenata potrebno navesti (Tablica 1.3.)

- ◆ vrstu, naziv (tip) te oznaku na električkoj shemi,
- ◆ popis komponenata te vrste,
- ◆ električki simbol s upisanim rednim brojevima izvoda,
- ◆ tehnički crtež (najčešće je dovoljan samo tlocrt) s upisanim dimenzijama vanjskih rubova, kotiranim položajima lemnih rupa za žičane izvode i rupa za učvršćenje ako postoje, upisanim rednim brojevima i promjerima priključnih izvoda te promjerima rupa ili izvoda za učvršćenje, i
- ◆ izgled na položajnom nacrtu komponenata, koji je stvarni izgled komponente pri pogledu odozgo (tlocrt) s dodatnim oznakama korisnima za ugradnju (primjerice znak + na mjestu izvoda elektrolitskog kondenzatora na koji se priključuje pozitivniji potencijal ili brojka 1 uz prvi izvod rednog konektora koji je simetričan oko poprečne osi).

A	B	C	D
DIODA (1N4148) V1, V7 - V10, V14			podrazumijeva se tlocrt
ELEKTROLITSKI KONDENZATOR (100u / 63V) C7, C8			
TRANZISTOR (BDX53) T1, T2			poznato
INTEGRIRANI KRUG (74HCT245) D1 - D4	poznato	DIP-20	poznato
<p>A: vrsta, (naziv) komponente i popis komponenata te vrste u električkoj shemi</p> <p>B: električki simbol s upisanim rednim brojevima izvoda</p> <p>C: tlocrt s upisanim rednim brojevima izvoda</p> <p>D: izgled na položajnom nacrtu komponenata</p>			

Tablica 1.3. Primjeri opisa komponenata u sklopu ulaznih zahtjeva procesa projektiranja tiskanih pločica

Svi ti podaci se, ukoliko već ne postoje, unose u računalni skup podataka o komponentama (baza podataka, biblioteka) primjenom pripadajućeg dijela izabranog CAD programa.

2.1.2. Popis električkih veza (spojeva)

Popis električkih veza se najčešće zadaje električkom shemom u pisanom obliku, pa ju je potrebno ucrtati preinačivši je sukladno simbolnom dijelu primjenjenog računalnog skupa podataka o komponentama te značajkama samog shematskog dijela programa.

2.1.3. Tehnološke odrednice

Temeljne značajke tehnološkog procesa koji se namjerava primjeniti za izradu tiskane pločice, a koje utječu na postupke projektiranja tiskanih veza, opisuju se ostvarivim brojem vodljivih slojeva te najmanjim geometrijskim dimenzijama elemenata vodljivih likova (uključujući navode graničnih odstupanja od nazivnih vrijednosti - tolerancije), i to

- ◆ širine vodova,
- ◆ razmaka između vodova i
- ◆ promjerima prospojnih rupa.

Dodatno je potrebno navesti i konačnu debljinu bakrenog sloja i nosive izolacijske podloge, te nanose li se završni slojevi kositar-olova i zaustavnog laka, budući da ti podaci znatno utječu na vrijednosti električkih parametara tiskanih veza. Iz predviđenog postupka ugradnje i posebice lemljenja proizlaze zahtjevi za najmanjom potrebnom širinom prstena lemnih točaka, te geometrijom tiskanih vodova u neposrednoj okolini spoja s lemnom točkom (da bi se spriječilo pretjerano ili nepravilno odvođenje topline s lemnog mjesta).

2.1.4. Dodatni električki, mehanički i toplinski zahtjevi

Za potpunost ulaznih zahtjeva potrebno je odrediti još i mehaničke, toplinske i poglavito električke uvjete i ograničenja na položaj komponenata i izgled vodljivih likova na tiskanoj pločici. Slijedi pregled najvažnijih zahtjeva iz kojih se, zajedno s prethodno opisanim tehnološkim odrednicama, izvodi skup pravila projektiranja tiskanih veza (Slika 1.10.).

- ◆ Geometrijski oblik i dimenzije pločice te položaji i promjeri rupa za njeno učvršćenje.
- ◆ Smještaj komponenata kojima je položaj predodređen mehaničkom konstrukcijom cjelokupnog uređaja, pa se ne smije mijenjati. Takve komponente su primjerice konektori, prikazne i signalizacijske komponente te potenciometri, preklopke i tipke.
- ◆ Položaj komponenata kao što su promjenjivi otpornici i kondenzatori, pomoću kojih se namještaju vrijednosti parametara sklopovlja tijekom umjeravanja, pa im se mora osigurati prikladan pristup.

- ♦ Smještaj komponenata koje se zagrijavaju tijekom rada, zajedno s pripadajućim hladilima i opisom načina pričvršćenja. Naime njihov bi proizvoljni smještaj mogao utjecati na električke značajke temperaturno osjetljivih dijelova sklopa poput mjernih pojačala ili analogno-digitalnih pretvornika.
- ♦ Podjela komponenata u grupe prema frekvencijskim značajkama i osjetljivosti na elektromagnetske smetnje dijela sklopa kojem pripadaju, te položaj tih grupa na pločici.
- ♦ Geometrijske i topološke (način razvođenja) značajke vodova napajanja, osobito ukoliko ih postoji više i ako su međusobno galvanski odvojeni (gotovo uvijek kod sklopova koji sadrže i analogne i digitalne dijelove). To je posebno važno za vod napajanja referentnog potencijala (masu), čija izvedba bitno utječe na sveukupne električke značajke sklopovlja, poglavito analognog.
- ♦ Posebna geometrijska izvedba pojedinih signalnih vodova, najčešće zbog vrlo visokih frekvencija (analogni sklopovi) odnosno vrlo kratkih vremena porasta i pada (digitalni sklopovi), koji se u tim uvjetima ponašaju kao električne linije.
- ♦ Električke veze kojima tijekom rada teku struje veće od nekoliko desetaka mA i one između kojih je tijekom rada razlika potencijala veća od nekoliko desetaka V. Tiskani vodovi kojima se ostvaruju takve veze moraju biti širi (električki vodljiviji) s povećanim međusobnim razmakom.

Česta posljedica ispunjavanja navedenih zahtjeva glede položaja komponenata i izvedbe pojedinih vodljivih likova je nepovoljni smještaj s motrišta povezivanja i smanjeni raspoloživi dio površine pločice za preostale tiskane veze.

2.1.5. Električka shema

Ispravno nacrtana električka shema električki potpuno i jedinstveno opisuje sklopovlje jedne zasebne cjeline elektroničkog uređaja, koja se izvedbeno najčešće smješta na jednu tiskanu pločicu. Sadrži simbole svih komponenata, te sve njihove međusobne električke veze. Za svaku komponentu obvezno je upisati njenu slovnu-brojni oznaku, primjerice D7, koja ju jedinstveno opisuje i ujedno povezuje sa skupom podataka o komponentama u kojem su pohranjene njene sveukupne značajke.

OZNAKA	VRSTA KOMPONENATA
A	analogni integrirani sklopovi
B	pretvornici neelektričnih veličina u električne
C	kondenzatori i promjenljivi kondenzatori
D	digitalni integrirani sklopovi
E	komponente za rasvjetu i grijanje
F	komponente za zaštitu (osigurači, VDR-otpornici)
G	izvori (generatori)
H	komponente za svjetlosnu i zvučnu signalizaciju (svjetleće diode, zvučnici, zvonca, zujala)
K	releji
L	induktivne komponente, zavojnice
M	motori
P	mjerni uređaji (instrumenti, brojila, satovi)
Q	kristali i kristalni filtri
R	otpornici, promjenljivi otpornici (trimeri i potencijometri), otporničke mreže
S	sklopke, preklopke, tipkala
T	transformatori
U	modulatori
V	diskretne poluvodičke komponente
W	prijenosni putovi (žice, sabirnice, antene, kratkospojnici)
X	priključne komponente (konektori, utičnice, stezaljke, ispitni šiljci)

Tablica 1.4. IEC normama preporučene slovne oznake za pojedine vrste elektroničkih komponenata

Za postupak projektiranja tiskanih veza, kojem je električka shema tek slikovni način unosa opisa veza (*netlist*), takva električka shema može se smatrati potpunom. No budući da je električka shema ujedno i temeljni dio tehničke dokumentacije neophodne tijekom razvoja, ispitivanja, umjeravanja i održavanja elektroničkih uređaja, preporučljivo je, zbog učinkovitosti tih postupaka, upotrijebiti njen sadržaj. Tako se uz oznake upisuju i

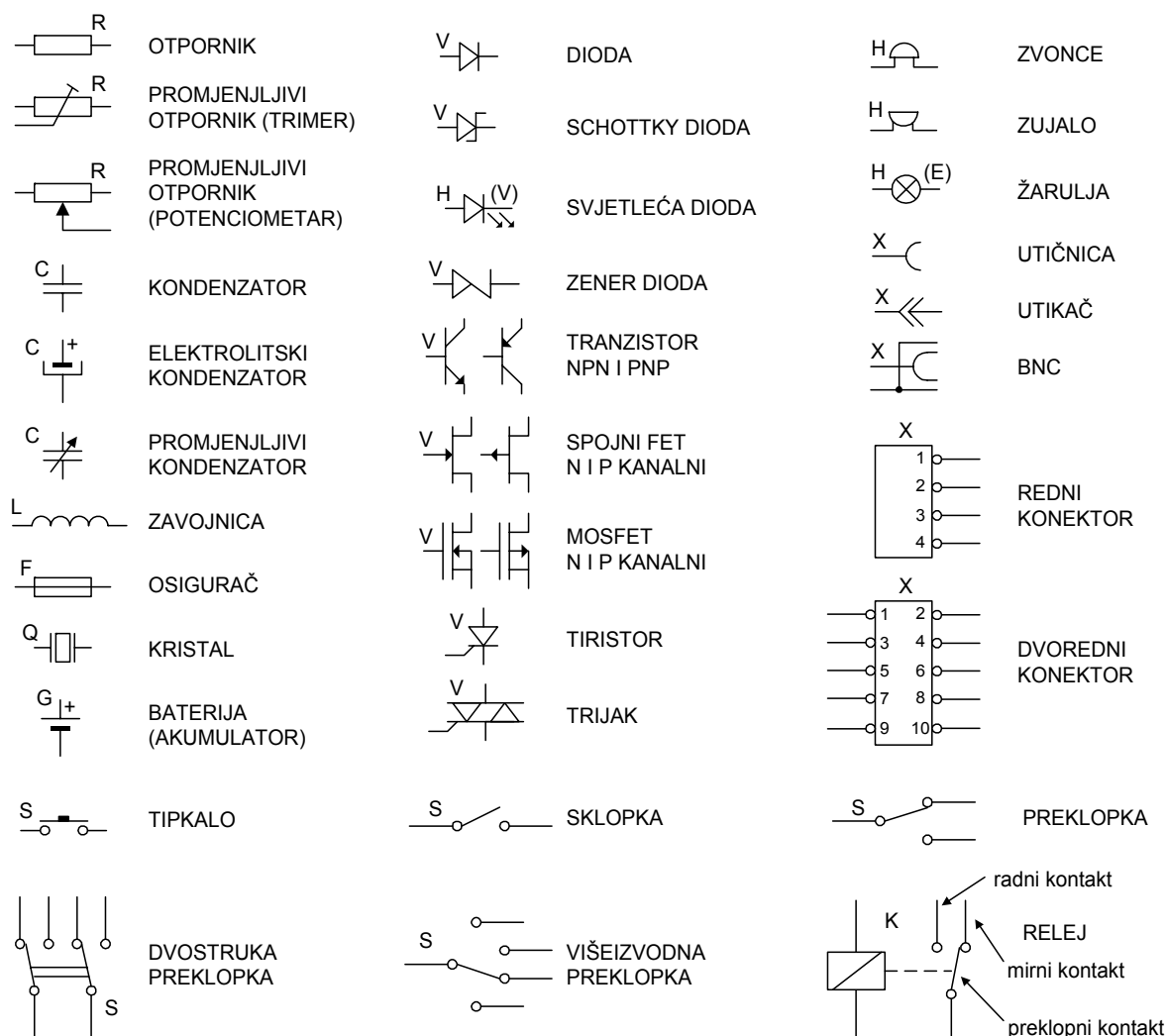
bitne električke i mehaničke značajke komponenata, iako se one u potpunosti navode u zasebnom dijelu tehničke dokumentacije. Za integrirane krugove i diskretne poluvodičke komponente prikladni dodatni podaci su naziv i vrsta kućišta, a za pasivne nazivna vrijednost svojstvene (otpor, induktivitet, kapacitet) i utjecajnih (napon, struja, snaga) električnih veličina (Tablica 1.5.). Količinu tih podataka potrebno je odmjeriti sukladno raspoloživom prostoru, tako da ne utječu na preglednost električke sheme.

VRSTA	OZNAKA	NAZIV	KUĆIŠTE	*	***
Integrirani krug	D7	74HCT573	DIP-20	-	-
Tranzistor	V3	BD136	TO-126	-	-
Otpornik	R13	-	-	10k	1W
Kondenzator	C4	-	-	100n	250V

* : nazivna vrijednost svojstvene električne veličine, *** : nazivna vrijednost utjecajnih električnih veličina

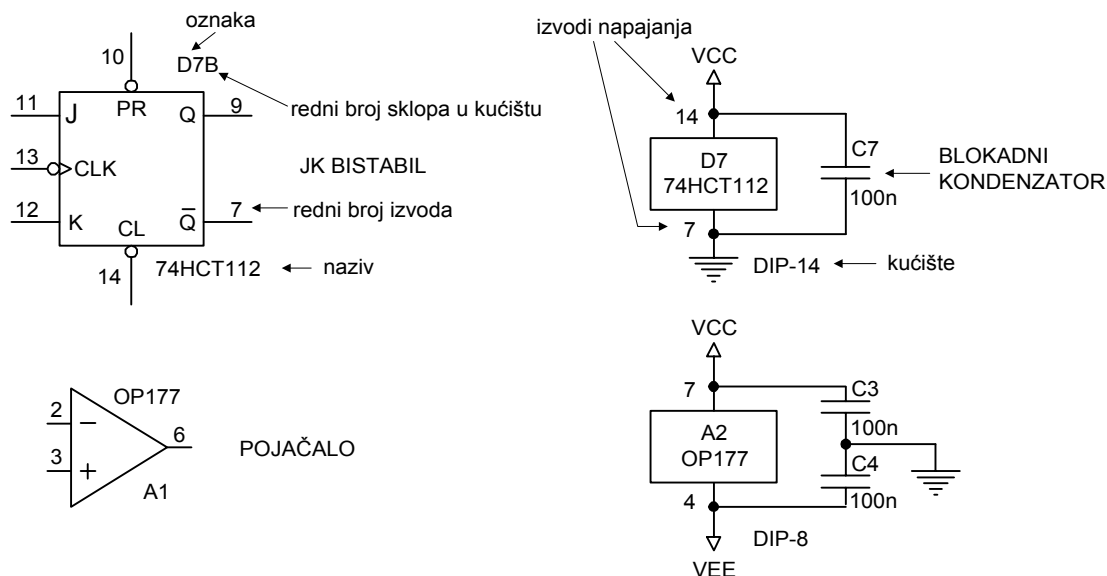
Tablica 1.5. Primjeri opisa komponenata u električkoj shemi

Kao i za navedene oznake (Tablica 1.4.), postoje također i IEC preporuke za simbole elektroničkih komponenata (posebice digitalnih integriranih krugova) u električkim shemama, no vrlo se rijetko primjenjuju, iako su podržani u glavnini novijih elektroničkih CAD programa. Stoga je prikazan (Slika 1.11.) pregled simbola koje se, uz primjenu IEC oznaka, preporučuje studentima tijekom izrade programa u sklopu laboratorijskih vježbi.



Slika 1.11. Simboli i oznake često primjenjivanih diskretnih elektroničkih i elektromehaničkih komponenata

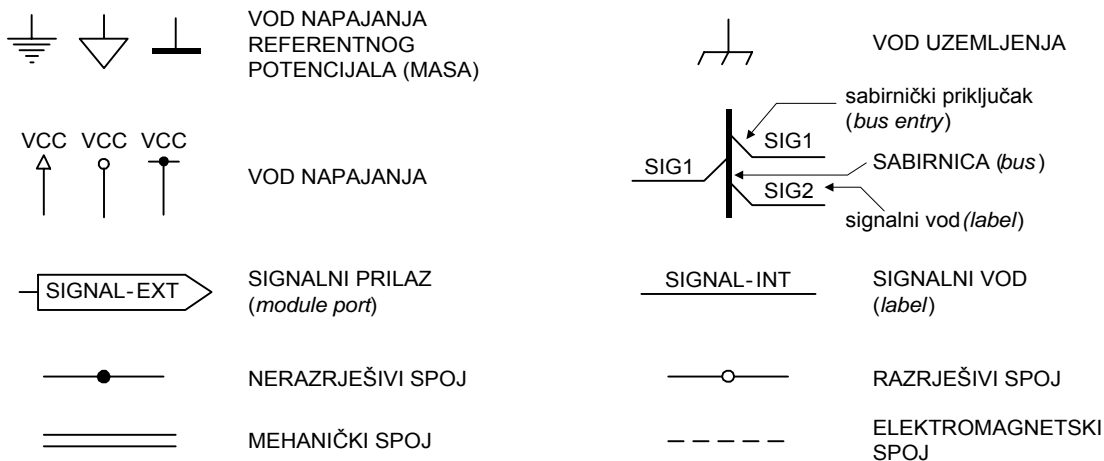
Povrh toga prikazan je mogući način upotpunjavanja električke sheme s motrišta učinkovitijeg projektiranja tiskanih veza i preglednosti tehničke dokumentacije. Odnosi se na izvode napajanja integriranih krugova i njima pridružene blokadne kondenzatore.



Slika 1.12. Predloženi opis digitalnih i analognih integriranih krugova u električkim shemama

U shematskim dijelovima glavnine elektroničkih CAD programa izvodi napajanja integriranih krugova su skriveni unutar simbola, te se ne vide na električkoj shemi. To nije zapreka potpunosti opisa veza koji se iz sheme izvodi (ukoliko se program ispravno primjenjuje), a opravdano je zbog povećane preglednosti. Naime u okolini integriranih krugova, zbog velikog broja njihovih izvoda po jedinici površine simbola, ionako je povećana gustoća vodova, a vodovi napajanja nemaju funkcijski značaj i njihovo postojanje se podrazumijeva. S druge pak strane povoljno je istaknuti izvode napajanja posebice zbog projektiranja odgovarajućih vodova na tiskanoj pločici, koje se gotovo uvijek izvodi ručno jer su to redovito presudni vodovi za sveukupne značajke sklopovlja.

Stoga je ponuđen mogući način (Slika 1.12.) kojim se može uskladiti oba zahtjeva te dodatno i predodrediti položaj blokadnih kondenzatora na tiskanoj pločici, a koji bitno utječe na pouzdanost rada sklopovlja. Dodatno se za složenije sklopove preporučuje hijerarhijsko (modularno, u više povezanih datoteka) ucrtavanje električke sheme. Time se poboljšava funkcijska preglednost, a simboli i oznake su krupniji (ista količina na više papira) što povećava čitkost. Zbog istih razloga povoljno je izbjegavati dugačke neravne vodove i njihova pretjerana međusobna križanja, koristeći posebne simbole (Slika 1.13.) vodova napajanja, signalnih vodova, signalnih prilaza (između modula hijerarhijske sheme) te sabirnica. Posebice je to značajno za vodove napajanja.



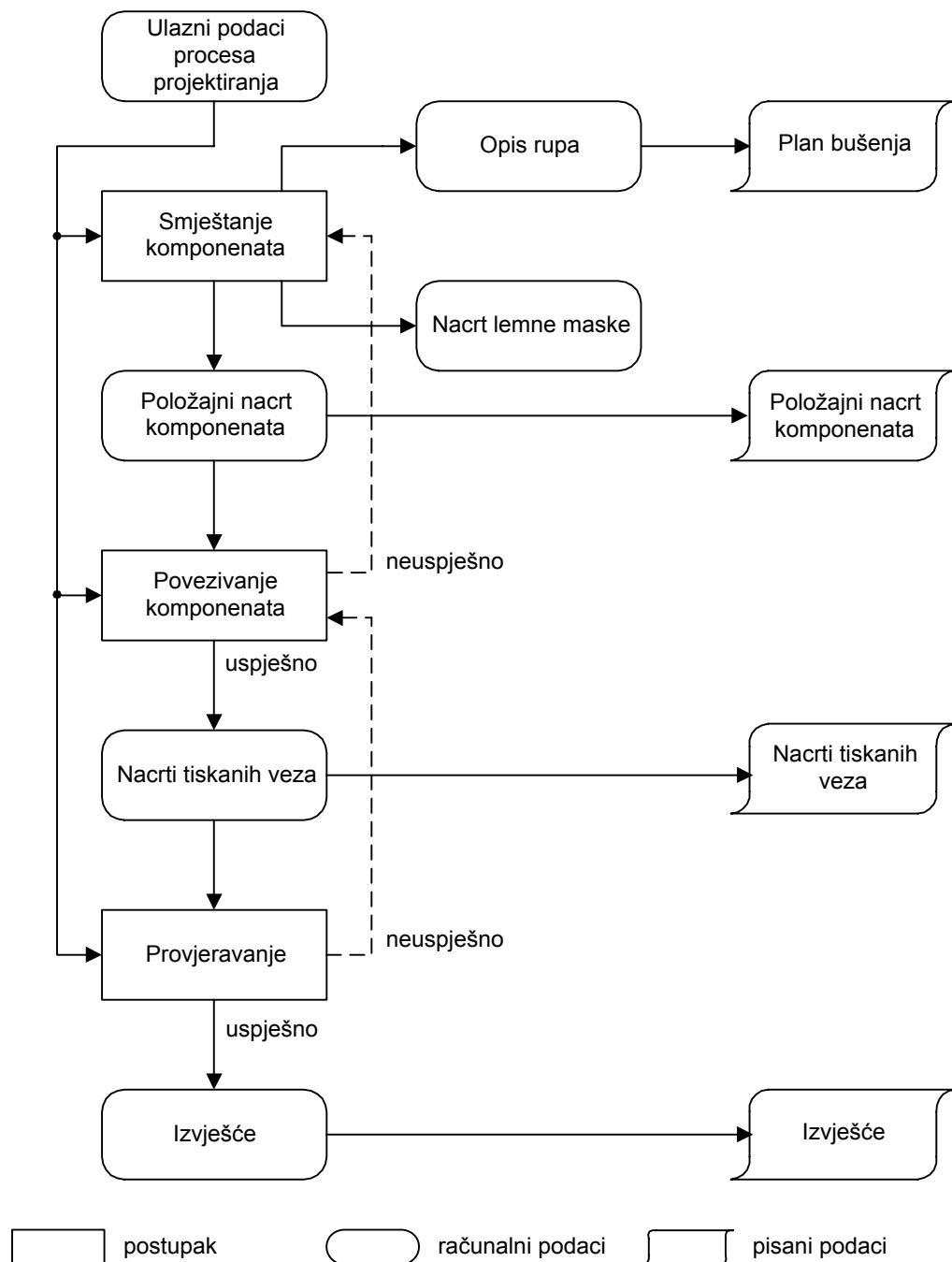
Slika 1.13. Posebni simboli u električkim shemama

Na ispravno nacrtanoj električkoj shemi trebali bi se dakle vidjeti i raspoznavati **svi izvodi svih komponenata** koje se u izvedbi ugrađuju na tiskanu pločicu, uključujući elektromehaničke (konektori, podnožja, zaštitni oklopi, ispitni šiljci) i elektrotermičke (hladila, ventilatori). Diskretnim komponentama se obično ne prikazuju redni brojevi (nazivi) izvoda, budući da ih je malo, a oblik simbola ih nedvosmisleno funkcijski određuje (primjerice izvodi baze, emitera i kolektora bipolarnog tranzistora). Štoviše za neke je, poput otpornika, redoslijed izvoda i nebitan jer su jednakovrijedni.

Iz električke sheme se izvodi opis veza (*netlist*), koji zajedno sa skupom podataka o komponentama te skupom pravila projektiranja (Slika 1.10.) tvori skup računalnih ulaznih podataka procesa projektiranja tiskanih veza. Time je postupak obrade ulaznih zahtjeva i pripreme procesa okončan.

2.2. Projektiranje tiskanih veza

Projektiranje tiskanih veza je iterativni proces koji obuhvaća smještanje komponenata na tiskanu pločicu i njihovo povezivanje, te naposljetku provjeru sukladnosti obaju postupaka s ulaznim podacima (Slika 1.14.).



Slika 1.14. Projektiranje tiskanih veza

Podrazumijeva se cjelovitost ulaznih podataka, dakle potpuni opis ugradbenih elektroničkih komponenata i električkih veza između njih (*netlist*) te određena pravila projektiranja.

Glavnina izlaznih podataka uspješno izvedenog procesa projektiranja tiskanih veza su nacrti različitih maski za selektivne zahvate na tiskanoj pločici tijekom tehnološkog procesa njene izrade. Utoliko je i samo projektiranje po načinu izvedbe zapravo tehničko crtanje primjenom računala. **Sve se crta u mjerilu, gledano sa strane komponenata, po rasteriziranoj površini.** Programi za projektiranje tiskanih veza koriste inčni raster (*grid*), kojem su prilagođene i geometrijske dimenzije (razmaci između izvoda) glavnine elektroničkih komponenata.

2.2.1. Smještanje komponenata na tiskanu pločicu

U sklopu dodatnih ulaznih elektroničkih, mehaničkih i toplinskih zahtjeva (poglavlje 2.1.4.) procesa projektiranja tiskanih veza predodređen je položaj dijela komponenata na tiskanoj pločici. Te komponente postavljaju se prve na zadana mjesta i to redovito ručno. Smještanje ostatka komponenata može se prepustiti računalnom programu (*autoplacement*). Usprkos vrhunskim nazivnim značajkama matematičkih algoritama koji se za to primjenjuju, zbog osobitosti ulaznih zahtjeva svake primjene, rezultati najčešće nisu u potpunosti zadovoljavajući, ali su prihvatljivo polazište za završne ručne zahvate.

Izlazni podaci postupka sadržani su u položajnom nacrtu komponenata koji prikazuje tiskanu pločicu nakon ugradnje komponenata, zajedno s ucrtanim lemnim točkama na mjestima izvoda komponenata. Ti podaci ujedno su i ulazni za postupak povezivanja, te svojim značajkama predodređuju njegovu uspješnost i uopće ostvarivost.

Pravila smještanja komponenata

- ◆ Komponente pravokutnog tlocrta postavljaju se međusobno ili usporedno ili okomito, a ukoliko je tiskana pločica pravokutnog oblika onda i usporedno s njenim rubovima.
- ◆ Komponente s osnim izvodima, poput otpornika, namijenjene su vodoravnoj ugradnji te ih je tako potrebno i smjestiti na pločicu. U slučaju pomanjkanja prostora te ako je k tome prihvatljiva i povećana osjetljivost sklopa na mehanička naprezanja, iznimno je dopustiva i okomita ugradnja.
- ◆ Osigurati potrebni razmak između komponenata, ovisno o tolerancijama njihovih geometrijskih dimenzija te načinu njihove ugradnje na tiskanu pločicu.
- ◆ Istovrsne komponente i komponente u istovrsnim kućištima (primjerice integrirani krugovi u DIL kućištu) postavljaju se u istom smjeru i s istom orijentacijom, čime se smanjuje mogućnost pogrešaka tijekom njihove ugradnje.

Predloženi postupak smještanja komponenata

- ◆ Ucrtati rubove pločice i rupe za njeno učvršćenje.
- ◆ Postaviti komponente kojima je položaj predodređen mehaničkom konstrukcijom uređaja.
- ◆ Razmotriti električku shemu (i zbog toga je bitna njena preglednost) te ju razdijeliti na grupe komponenata prema električkim (zajedničko napajanje, male vrijednosti analognih signala, osjetljivost na smetnje, velike vrijednosti napona ili struja, visoka frekvencija rada ili vrlo kratka vremena porasta i pada, izvori elektromagnetskih smetnji) i elektrotermičkim (podložnost temperaturnim utjecajima, izvori zagrijavanja) značajkama. Grupe najčešće sadrže po nekoliko integriranih krugova kojima se glavnina signalnih veza zatvara unutar same grupe, te tim integriranim krugovima električki bliske diskretne komponente.
- ◆ Skicirati raspored grupa na pločici nastojeći zadovoljiti sljedeće zahtjeve.
 - Udaljiti komponente koje proizvode elektromagnetske smetnje od komponenata koje su na njih osjetljive.
 - Smjestiti komponente koje se zagrijavaju tijekom rada iznad (uz gornji rub pločice ako je pločica predviđena za okomitu ugradnju u uređaju) temperaturno osjetljivih komponenata.
 - Osigurati mogućnost pravilnog razvođenja napajanja posebice za integrirane krugove.
 - Omogućiti pravilni pristup komponentama za namještanje (promjenljivi otpornici ili kondenzatori) ovisno o načinu ugradnje pločice u uređaju.
 - Prostornim položajem komponenata slijediti električki put signala. Time se pojednostavljuje povezivanje komponenata te postižu bolja električka svojstva sklopa.
 - Pravilno rasporediti masivne komponente (transformatori, releji, hladila) zbog mogućih mehaničkih naprezanja pločice ili konektora. Ako je potrebno, predvidjeti prostor za njihovo dodatno učvršćivanje vijcima ili obujmicama.
- ◆ Postavljati komponente po veličini, od najvećih (integrirani krugovi) prema najmanjima (diskretne komponente) tako da se što veći broj veza može ostvariti što kraćim i ravnijim tiskanim vodovima.
- ◆ Blokadne kondenzatore postaviti u neposrednoj blizini izvoda napajanja pripadajućih integriranih krugova.

Preporuke pri smještanju komponenata

- ◆ Postavljati komponente pri grubljoj rasterizaciji površine pločice (100 ili 50mila) od predviđene za postupak povezivanja komponenata (50 ili 25mila). Time se znatno olakšava pravilno povezivanje, posebice ako se izvodi ručno.
- ◆ Komponente odmaknuti barem 2mm od rubova tiskane pločice, te međusobno razmaknuti barem 1mm.
- ◆ Pokušati ostvariti što jednolikiju površinsku gustoću i komponenata i njihovih izvoda.
- ◆ Razmatrati moguće poteškoće pri projektiranju vodova napajanja, posebice sklopovlja u frekvencijski ili mjeriteljski zahtjevnim primjenama.

2.2.2. Povezivanje komponenata na tiskanoj pločici

Nakon smještanja komponenata slijedi povezivanje njihovih izvoda tiskanim vodovima prema opisu veza izvedenom iz električke sheme sklopovlja, a sukladno pravilima projektiranja. Taj postupak je najvažniji i najteži u cjelokupnom procesu projektiranja tiskanih pločica. Izlazni podaci su nacrti tiskanih veza svih vodljivih slojeva pločice.

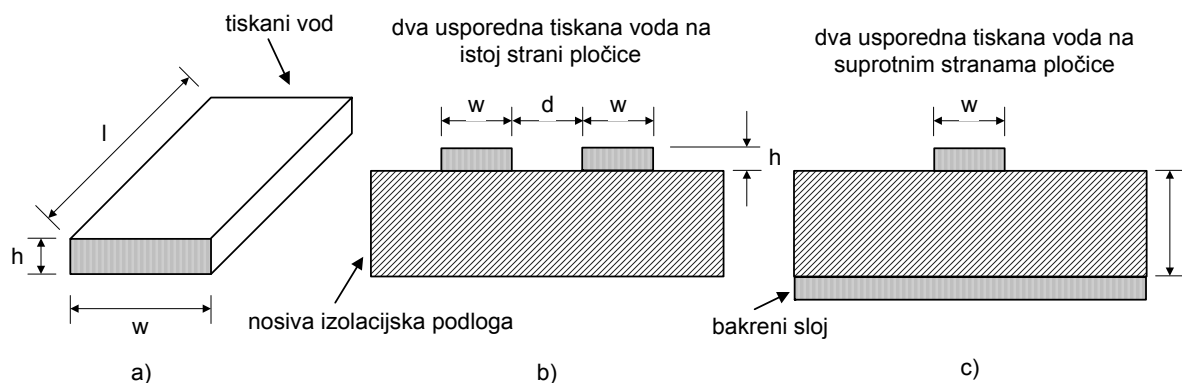
Redoslijed i način projektiranja pojedinih vodova određen je utjecajem njihove izvedbe na sveukupne značajke sklopovlja. Stoga se prvo, dok je još cjelokupna površina pločice raspoloživa, projektiraju vodovi napajanja počevši s vodom referentnog potencijala, i to redovito ručno. Nakon toga postavljaju se signalni vodovi s posebnim električkim značajkama (visoke frekvencije, vrlo kratka vremena porasta i pada, analogni signali vrlo malih vrijednosti) također najčešće ručno. Ostvarivanje preostalih signalnih veza može se prepustiti računalnom programu (*autorouting*), čiji rezultati (kao i pri smještanju komponenata) nisu u potpunosti prihvatljivi te zahtijevaju ručnu doradu. U slučaju postojanja velikog broja signalnih vodova bez osobitih električkih zahtjeva, primjena automatskog računalnog povezivanja može znatno olakšati i ubrzati cjelokupni proces projektiranja tiskanih veza. Ukoliko nije moguće ostvariti sve električke veze u zadanom broju vodljivih slojeva, potrebno je načiniti ispravke položajnog nacrtu komponenata te ponoviti postupak ili (ako je broj neostvarenih veza značajan) povećati broj slojeva.

Povezivanje komponenata izvodi se sukladno pravilima projektiranja, koja određuju potrebne geometrijske značajke vodljivih likova u ovisnosti o

- ◆ vrijednostima njihovih (parazitnih) električkih parametara,
- ◆ radnim naponsko-strujnim uvjetima i
- ◆ toplinskim svojstvima lemnih mjesta na spojevima lemnih točaka i tiskanih vodova.

Električki parametri tiskanih vodova

Najmanje ostvarive dimenzije elemenata vodljivih likova određene su mogućnostima izabranog tehnološkog postupka izrade tiskane pločice. Potrebne su pak dimenzije funkcija dopuštenih vrijednosti njihovih (parazitnih) električkih parametara i radnih naponsko-strujnih uvjeta.



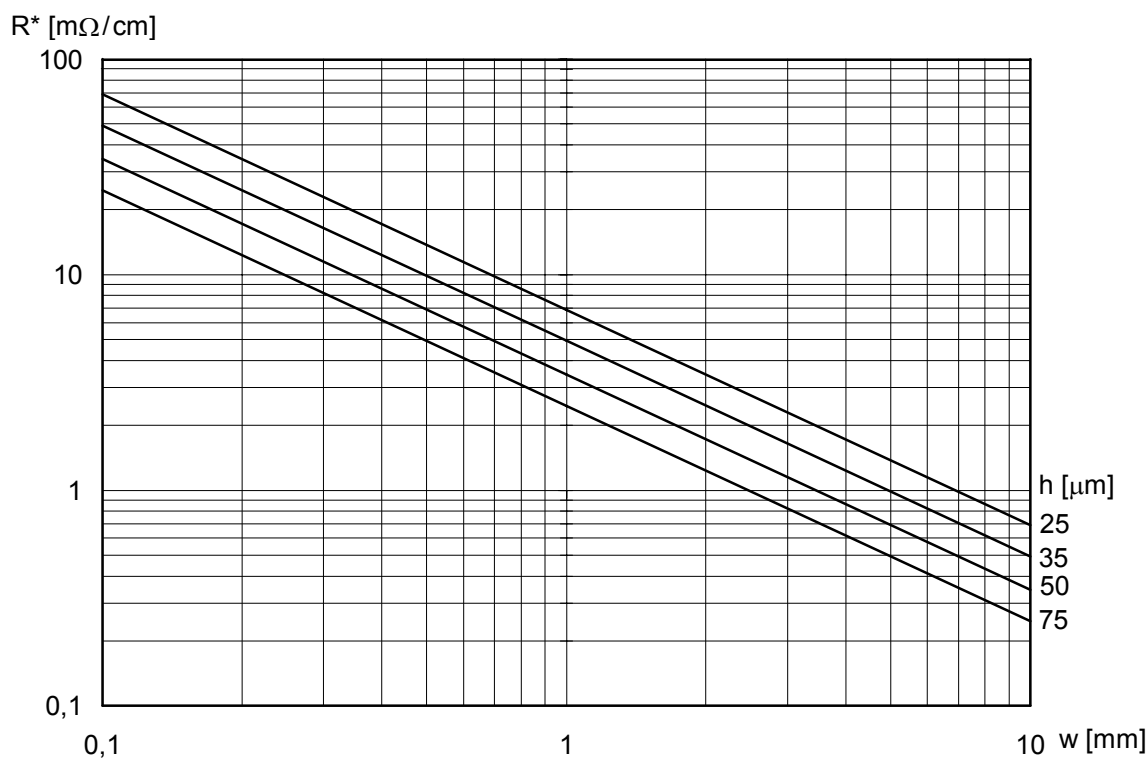
Slika 1.15. Geometrijski oblici i dimenzije tiskanih veza za koje su iskazane vrijednosti električkih parametara

Otpor tiskanih vodova R obično se iskazuje normirano R^* na jediničnu duljinu voda (specifični linijski otpor).

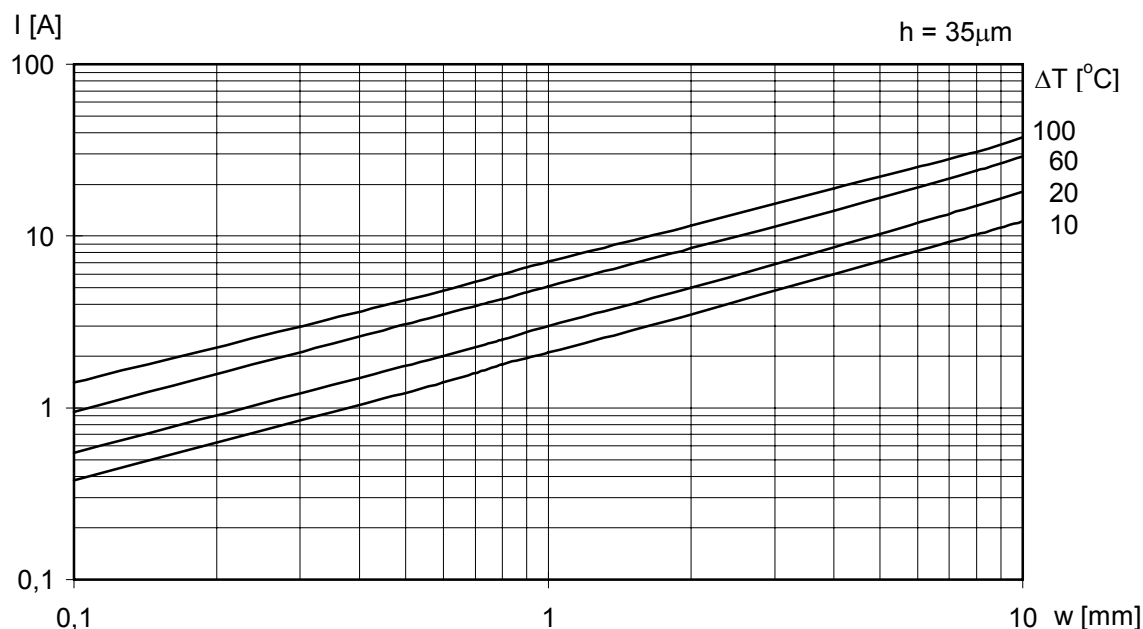
$$R_0^* = \frac{R_0}{l} = \frac{172,41}{w \cdot h}; R_0^* [\text{m}\Omega / \text{cm}]; l [\text{cm}]; w [\text{mm}]; h [\mu\text{m}] \quad (1.1.)$$

$$R^* = R_0^* \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T); \Delta T = T - 20; T [^\circ\text{C}]; \alpha = 0,0039^\circ\text{C}^{-1} \quad (1.2.)$$

Ovisnost otpora o temperaturi nije značajna (povećanje otpora manje od 4% za povećanje temperature 10°C), te se uglavnom može zanemariti.



Slika 1.16. Ovisnost specifičnog linijskog otpora R^* ravnoga tiskanog voda o njegovoj širini w , za različite debljine h bakrenog sloja



Slika 1.17. Dopuštena jakost struje kroz tiskani vod debljine h u ovisnosti o njegovoj širini w , za različite vrijednosti njegove nadtemperature ΔT

Posljedica protjecanja električne struje tiskanim vodom vrijednosti otpora različitom od ništice je njegovo zagrijavanje. Da to zagrijavanje ne bi bilo pretjerano potrebno je osigurati odgovarajuću širinu voda (debljina se

smatra predodređenom). Preporuča se vodove projektirati tako da im nadtemperatura (razlika njihove temperature i temperature okoline) ne bude veća od 10°C, te potom i dodatno proširiti u ovisnosti o tehnološkoj izvedbi. Po primjerice normi MIL-STD-275C neophodna su strujna podopterećenja (*derating*)

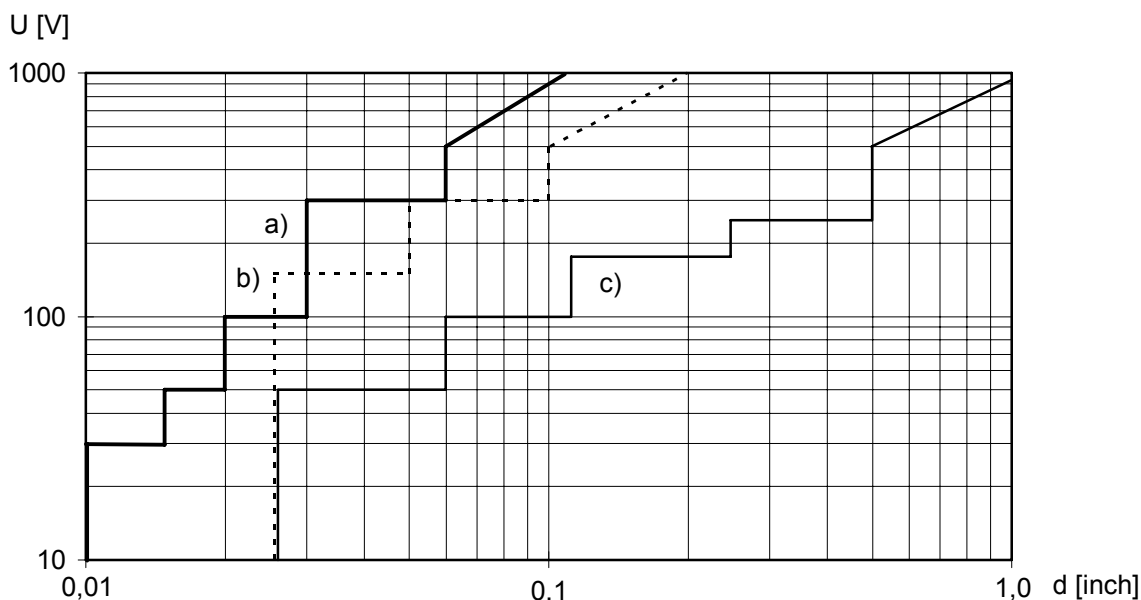
- ♦ 30% ako se na vodove nanosi zaštitni sloj kositar-olova,
- ♦ 15% ako se na pločicu nanosi zaustavni (zaštitni) lak,
- ♦ 15% ako je debljina t nosive izolacijske podloge manja ili jednaka 0,8mm i
- ♦ 15% ako je debljina h bakrenog sloja veća ili jednaka 105μm,

pa bi se dakle širina tiskanog voda sa svim prethodno navedenim izvedbenim značajkama određivala (Slika 1.17.) za jakost struju koja je 2,33 puta veće vrijednosti od stvarne.

$$\frac{1}{1-0,3} \cdot \frac{1}{1-0,15} \cdot \frac{1}{1-0,15} \cdot \frac{1}{1-0,15} = 2,33$$

Za debljine bakrenog sloja različite od $h_0=35\mu\text{m}$ potrebno je vrijednost širine w_0 voda određene za debljinu h_0 pomnožiti s omjerom h_0/h .

Najmanji dopušteni razmak d između dvaju električki odvojenih elemenata vodljivih likova funkcija je dielektričke čvrstoće izolacijskog sloja između njih (zaštitni lak i zrak), koja pak ovisi o tehnološkoj izvedbi (nanosi li se zaštitni lak ili ne) i okolnim uvjetima rada (tlak, vlažnost, temperatura, prašina). Postoje brojne norme i preporuke različitih nacionalnih i međunarodnih strukovnih udruga kojima se propisuje taj razmak.

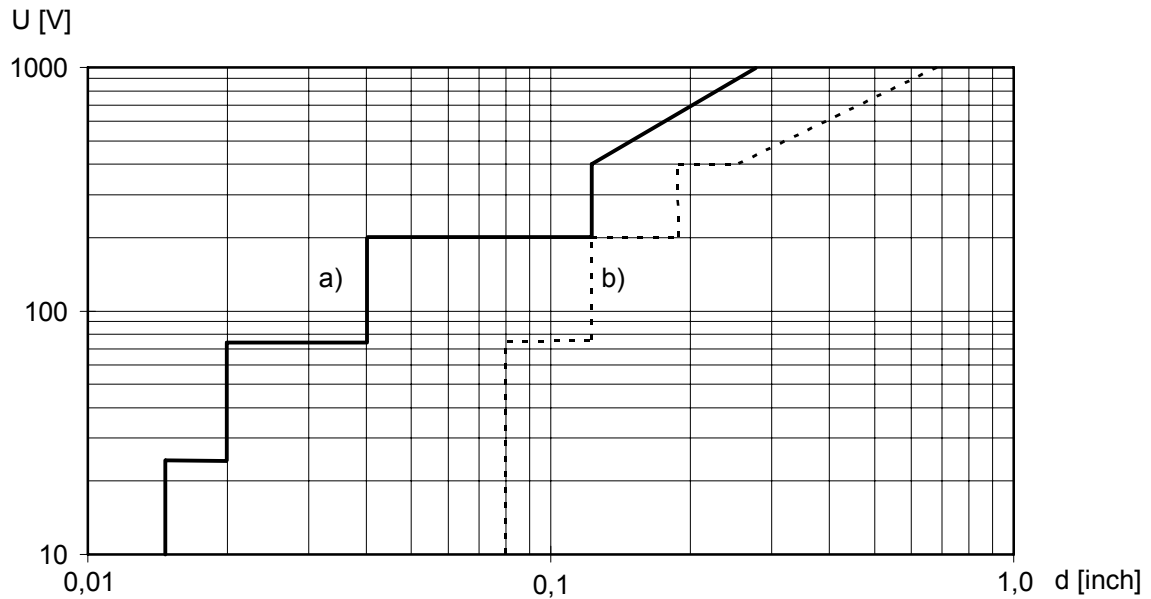


Slika 1.18. Potrebni razmak d između električki odvojenih elemenata vodljivih likova u ovisnosti o naponu U (podrazumijeva se vršna vrijednost ako je napon vremenski promjenljiv) između njih u laboratorijskim uvjetima po MIL-STD-275C za **a)** pločicu sa zaštitnim lakom, **b)** pločicu bez zaštitnog laka do 3000m nadmorske visine i **c)** pločicu bez zaštitnog laka iznad 3000m nadmorske visine

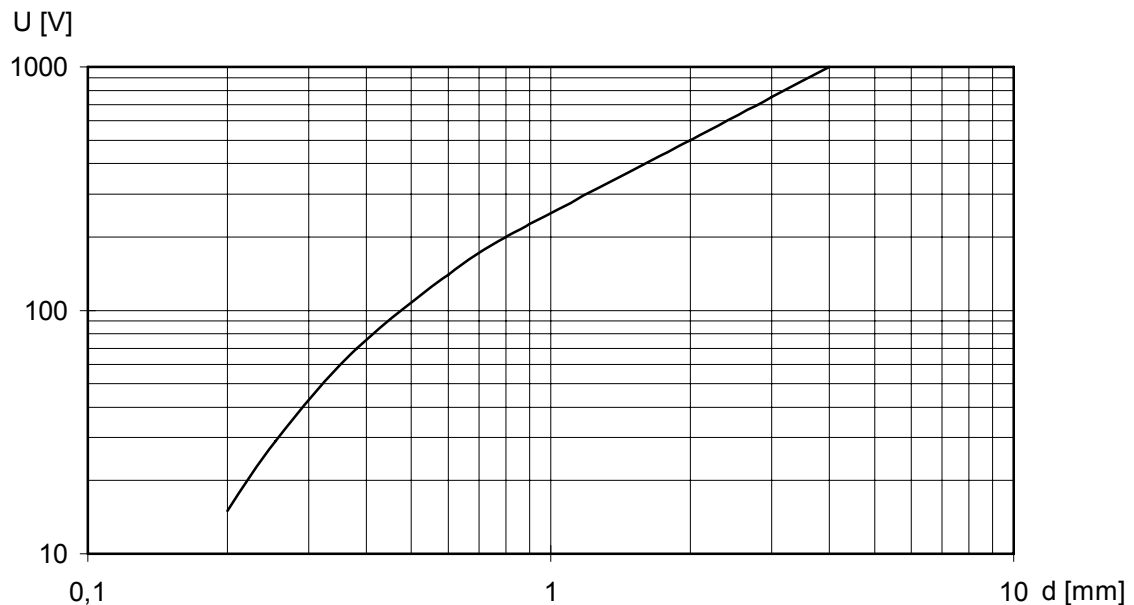
MIL-STD-275C (Slika 1.18.) primjer je vrlo zahtjevnih norme za vojne primjene, a prikladan je zbog uočavanja bitne ovisnosti potrebnog razmaka između vodova (pri istom naponu između njih i u istim laboratorijskim uvjetima) o postojanju sloja zaštitnog laka te nadmorskoj visini na kojoj se sklopovlje primjenjuje. Iz starije inačice iste norme MIL-STD-275B (Slika 1.19.) uočljiv je vrlo veliki utjecaj prisutnosti čestica krutih tvari u okolini tiskane pločice, ako pločica nije zaštićena izolacijskim slojem.

Za glavninu primjena, posebice komercijalnih, te su norme pretjerano zahtjevnih, ali ističu znatno manji utjecaj okolnih uvjeta na potrebnih izolacijskih razmak ako se na pločicu nanosi zaštitni lak. Zbog toga se, podrazumijevajući postojanje sloja zaštitnog laka na tiskanoj pločici, za određivanje potrebnog izolacijskog razmaka između vodova preporuča primjena IEC-28 preporuke (Slika 1.20.).

Sve navedeno glede izolacijskih razmaka odnosi se na tiskane veze koje su tijekom rada galvanski odvojene od elektroenergetske mreže. Ukoliko pak postoji galvanska veza, IEC-348 preporuka o sigurnosnim zahtjevima na elektroničke mjerne uređaje određuje izolacijskih razmak duljine 3mm za napone do 250V_{RMS} između pojedinih dijelova uređaja. U slučaju pak tiskanih veza koje su nepomične, dopušteno je smanjenje izolacijskog razmaka na 2mm, no ne preporuča se.



Slika 1.19. Potrebni razmak d između električki odvojenih elemenata vodljivih likova u ovisnosti o naponu U (podrazumijeva se vršna vrijednost ako je napon vremenski promjenljiv) između njih po MIL-STD-275B za **a)** pločicu bez zaštitnog laka u laboratorijskim uvjetima i **b)** pločicu bez zaštitnog laka u prljavoj i prašnjavoj okolini, oboje do 3000m nadmorske visine



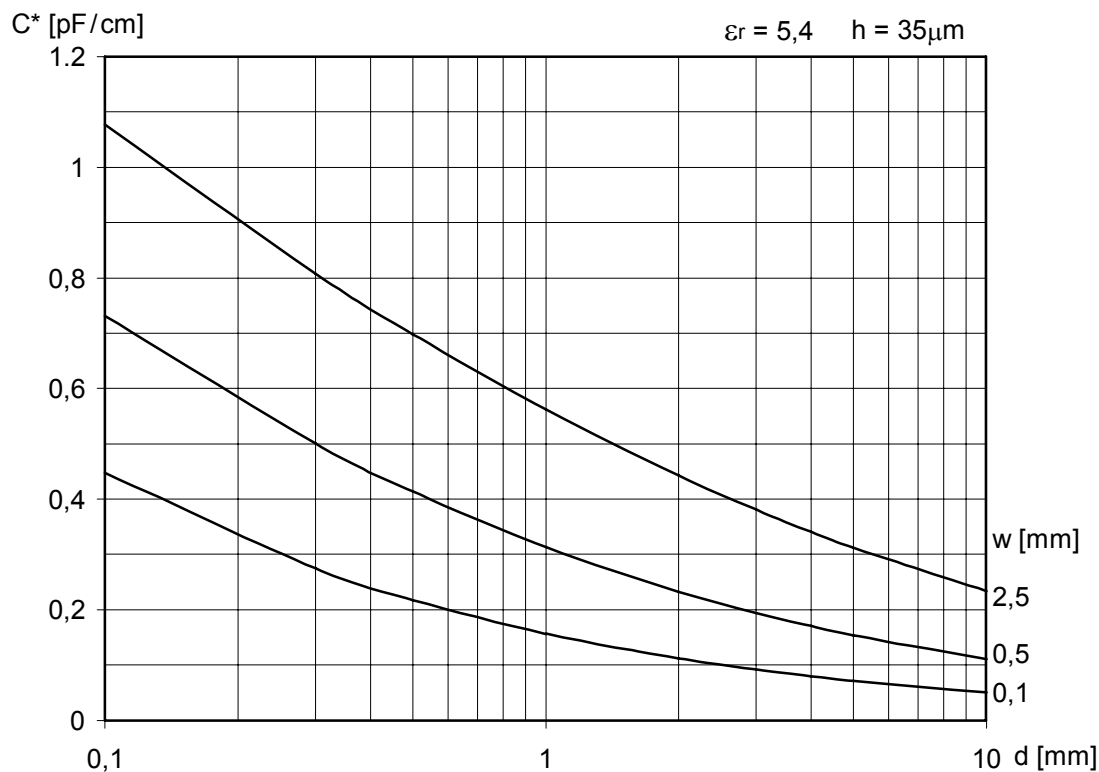
Slika 1.20. Potrebni razmak d između električki odvojenih elemenata vodljivih likova u ovisnosti o naponu U (podrazumijeva se vršna vrijednost ako je napon vremenski promjenljiv) između njih u laboratorijskim uvjetima po IEC-28 preporuci

Sljedeći bitni električki parametar tiskanih veza je kapacitet između elemenata vodljivih likova. Vrijednost mu je ovisna o geometrijskom obliku likova te se za pojedine pravilne oblike (Slika 1.15.) može jednostavno analitički odrediti. Iako su stvarni oblici likova redovito složeni i nepravilni, izvedene jednadžbe prihvatljiv su temelj za zadovoljavajuću okvirnu procjenu i njihova kapaciteta. Tako se kapacitet između dvaju usporednih ravnih vodova na istoj strani tiskane pločice (Slika 1.15.b) može izračunati iz jednadžbe

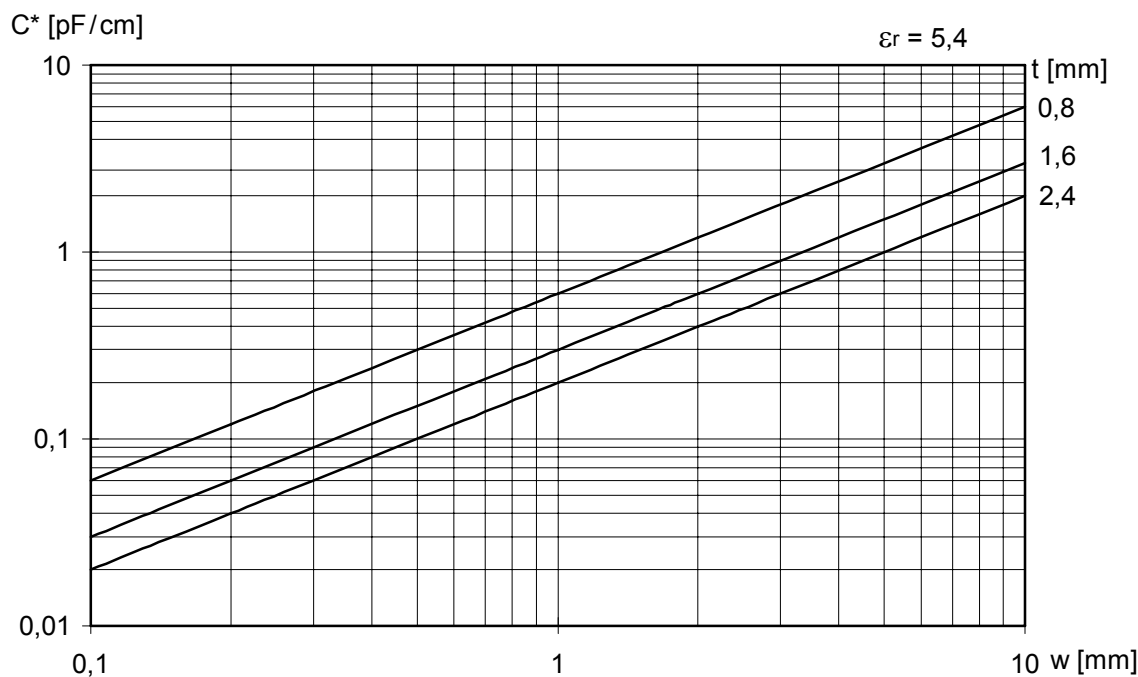
$$C^* = \frac{C}{l} = 0,000122 \cdot \frac{h}{d} + 0,0905 \cdot (1 + \epsilon_r) \cdot \log \left(1 + \frac{2 \cdot w}{d} + 2 \cdot \sqrt{\frac{w}{d} + \frac{w^2}{200}} \right) \quad (1.3.a)$$

$$C^* \text{ [pF / cm]}; l \text{ [cm]}; d, w \text{ [mm]}; h \text{ [}\mu\text{m]} \quad (1.3.b)$$

gdje je ϵ_r relativna dielektrička konstanta nosive podloge tiskane pločice vrijednosti 5,4 za materijale na osnovi stakla (FR-4, FR-5), odnosno 4,8 za materijale na osnovi papira (FR-2, FR-3).



Slika 1.21. Ovisnost specifičnog linijskog kapaciteta C^* između dvaju usporednih ravnih tiskanih vodova na istoj strani tiskane pločice o njihovoj širini w i međusobnom razmaku d , uz debljinu bakrenog sloja h i nosivu podlogu relativne dielektričke konstante ϵ_r



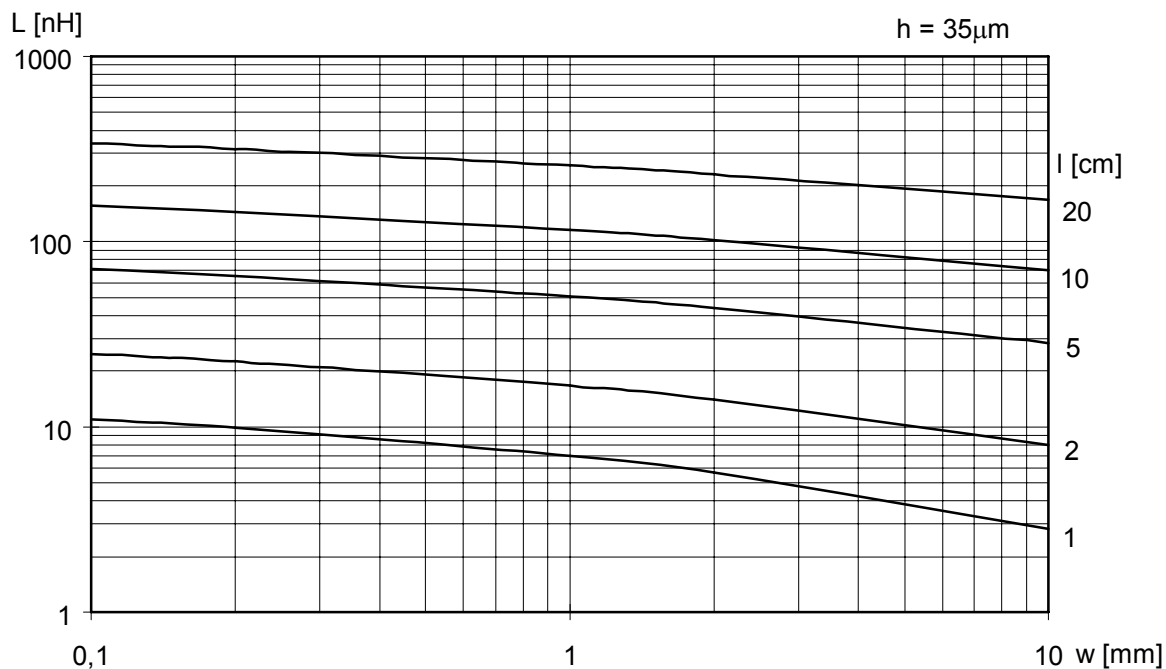
Slika 1.22. Ovisnost specifičnog linijskog kapaciteta C^* ravnog tiskanog voda prema bakrenom sloju na suprotnoj strani tiskane pločice o njegovoj širini w i debljini t nosive podloge relativne dielektričke konstante ϵ_r

Kapacitet ravnog tiskanog voda prema bakrenom sloju na suprotnoj strani tiskane pločice (Slika 1.15.c) određen je jednačbom

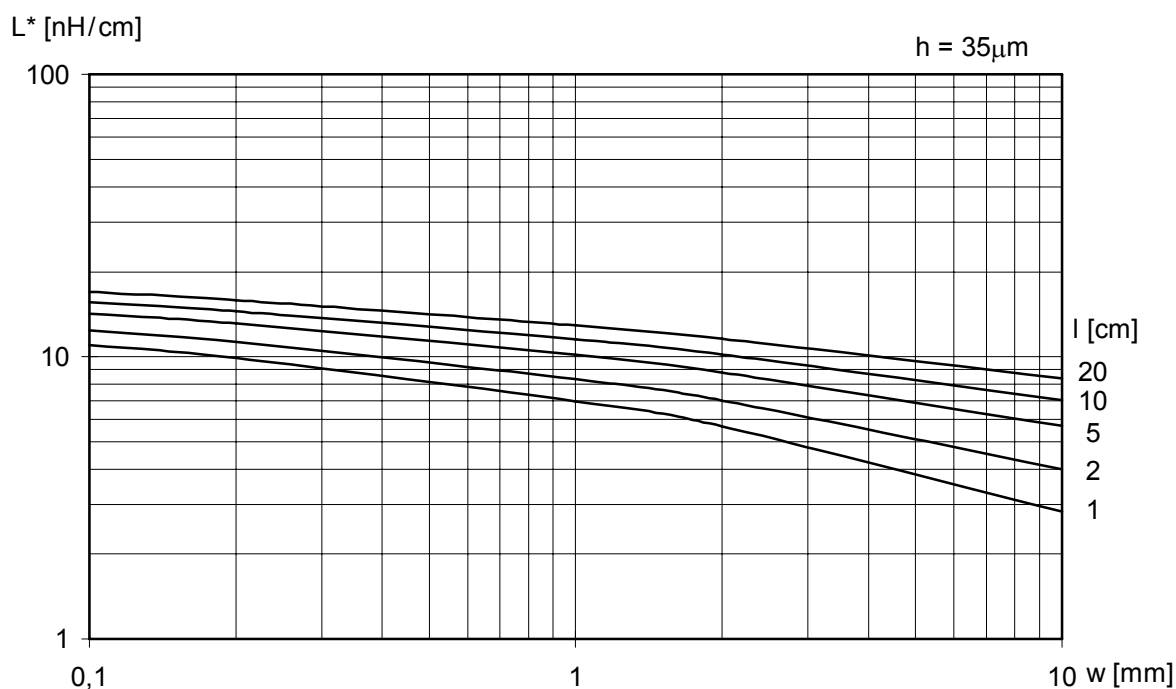
$$C^* = \frac{C}{l} = 0,0886 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{w}{t}; \quad C^* [\text{pF} / \text{cm}]; l [\text{cm}]; w, t [\text{mm}] \quad (1.4.)$$

Induktivitet ravnog tiskanog voda (Slika 1.15.a) može se izračunati primjenom jednačbe

$$L^* = \frac{L}{l} = 2 \cdot \left[\ln \left(\frac{20 \cdot l}{w + 0,001 \cdot h} \right) + 0,02235 \cdot \left(\frac{w + 0,001 \cdot h}{l} \right) + 0,5 \right] \quad (1.5.a)$$



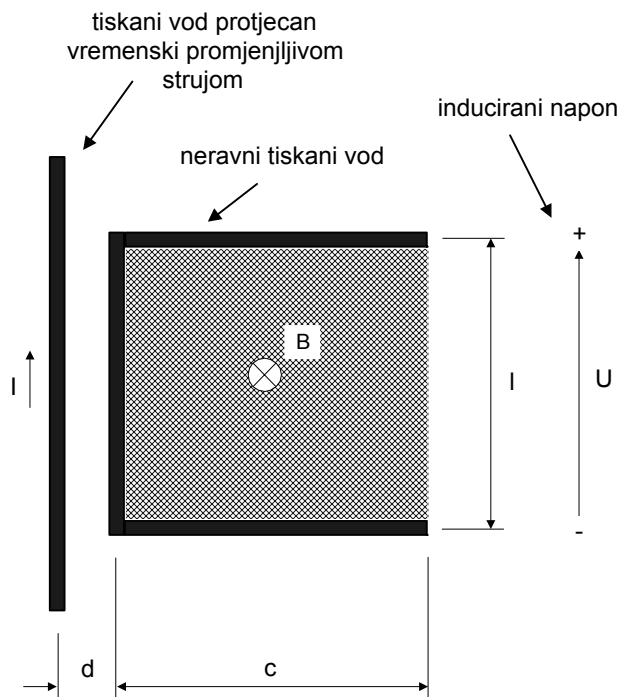
Slika 1.23. Ovisnost induktiviteta L ravnog tiskanog voda o njegovoj širini w i duljini l , uz debljinu h bakrenog sloja



Slika 1.24. Ovisnost specifičnog linijskog induktiviteta L^* ravnog tiskanog voda o njegovoj širini w i duljini l , uz debljinu h bakrenog sloja

$$L^* [\text{nH} / \text{cm}] ; l [\text{cm}] ; w [\text{mm}] ; h [\mu\text{m}] \quad (1.5.b)$$

Svako dodatno odstupanje oblika tiskanog voda od pravca povećava mu induktivitet. Povrh toga neravni tiskani vod između svojih krajeva zatvara površinu (Slika 1.25.) kroz koju se zatvaraju silnice i vanjskih magnetskih polja i magnetskih polja prouzročenim protjecanjem struja kroz ostale vodove na tiskanoj pločici.



Slika 1.25. Inducirani napon U na krajevima neravnog tiskanog voda kao posljedica protjecanja vremenski promjenljivog magnetskog polja B (prouzročenog protjecanjem struje I susjednim tiskanim vodom) kroz površinu koju zatvara između svojih krajeva

Posljedica vremenskih promjena tih magnetskih polja je inducirani napon

$$U = \mu_0 \cdot \frac{l \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot \left(d + \frac{c}{2}\right)} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} ; \text{ za: } d \ll \frac{c}{2} \Rightarrow \frac{U}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} = 4 \text{ nH} / \text{cm} \quad (1.6.)$$

između krajeva razmatranog voda, koji po vrijednosti može biti znatno veći od napona prouzročenih vlastitim induktivitetom i vremenskim promjenama vlastite struje.

Razmatrajući navedene jednačbe i prikazane krivulje funkcijskih ovisnosti električkih parametara tiskanih veza o njihovim geometrijskim oblicima, mogu se odrediti njihove orijentacijske vrijednosti i značajke, korisne prilikom projektiranja.

Signalni vodovi - vodovi širine nekoliko desetinki milimetra (0,2 do 0,4mm, najčešće 0,3mm \approx 12mila)

- ♦ Vrijednosti otpora R^* oko **10m Ω /cm**. Povoljno je smanjiti duljinu vodova.
- ♦ Vrijednosti kapaciteta C^* oko **1pF/cm**, s pretežitim utjecajem kapaciteta između vodova na istoj strani tiskane pločice (jednačba 1.3.). Povoljan je što veći međusobni razmak i što kraći zajednički usporedni put susjednih vodova, te udaljšavanje vodova digitalnih od vodova analognih signala.
- ♦ Vrijednosti induktiviteta L^* reda **10nH/cm**. Povoljni su što kraći i ravniji vodovi, sa što manjom površinom koju zatvaraju između svojih krajeva, te udaljšavanje vodova digitalnih od vodova analognih signala.

Vodovi napajanja - vodovi širine nekoliko milimetara (1 do 5mm, najčešće 1,5mm \approx 60mila)

- ♦ Vrijednosti otpora R^* oko **1m Ω /cm**. Povoljno je povećati širinu i smanjiti duljinu vodova.
- ♦ Vrijednosti kapaciteta C^* oko **1pF/cm**, s pretežitim utjecajem kapaciteta između vodova na suprotnim stranama tiskane pločice (jednačba 1.4.). Povoljna je što veća širina vodova.
- ♦ Vrijednosti induktiviteta L^* reda **10nH/cm**. Povoljni su što kraći, širi i ravniji vodovi.

Za sveukupne električke značajke tiskanih vodova povoljni su što kraći i ravniji oblici, a za vodove napajanja i što širi. Osobito je značajna duljina vodova, budući da o njenom odnosu prema frekvencijskim

značajkama pripadajućih signala ovisi utjecaj pojava svojstvenih električnim linijama (posebice refleksija). Ukoliko nije zadovoljen približni uvjet (za okvirnu procjenu)

$$l < t_r, t_f; l[\text{cm}]; t_r, t_f[\text{ns}] \quad (1.7.a)$$

za digitalne (vremenski diskretne) signale (t_r i t_f su vremena porasta i pada), odnosno

$$l < \frac{300}{f_g}; l[\text{cm}]; f_g = f_{-3\text{dB}} [\text{MHz}] \quad (1.7.b)$$

za analogne (vremenski kontinuirane) signale (f_g je granična frekvencija), tiskani vodovi duljine l ponašaju se kao električne linije sa svojstvenom impedancijom kao ključnim parametrom. Za takve tiskane veze primjenjuju se posebne (primjerice mikrostrip) tehnike projektiranja i tehnologije izrade.

Pravila povezivanja komponenata

- ◆ Nacrti tiskanih veza (kao i nacrti svih preostalih maski tehnološkog procesa izrade) na svim vodljivim slojevima izrađuju se gledano s komponentne (gornje) strane.
 - ◆ Na svim nacrtima ucrtavaju se rubovi tiskane pločice.
 - ◆ Na svim nacrtima tiskanih veza obavezno je upisati slovno-brojevni natpis na propisni način. Budući da se nacrti izrađuju gledano s komponentne strane, filmove donjih slojeva (za dvostrane veze to je samo lemnna strana, a za višeslojne svi donji slojevi) potrebno je u postupcima izrade pločice okrenuti zrcalno. Da bi se na prozirnom filmu znalo što je normalna a što zrcalna orijentacija, dogovorno se slovno-brojevni natpis upisuje na sve gornje slojeve normalno, a na sve donje zrcalno. Tada je prava orijentacija filma ona pri kojoj je slovno-brojevni natpis čitak gledano sa strane pločice na koju se film postavlja.
 - ◆ Širine vodova i razmaci između elemenata vodljivih likova moraju se prilagoditi stvarnim radnim strujno-naponskim i okolnim uvjetima.
 - ◆ Vanjske promjere lemnih točaka (podrazumijevaju se kružni oblici) potrebno je prilagoditi promjerima lemnih rupa u koje se lemljenjem ugrađuju izvodi komponenata. Vanjski promjer d_{LT} lemne točke treba biti oko dva puta veći od promjera d_{LR} lemne rupe (a koji treba biti barem 0,1mm veći od promjera d_I pripadajućeg izvoda komponente), uz širinu lemnog prstena vrijednosti barem 0,3mm. Za pravokutne oblike lemnih točaka promjerom d_{LT} može se smatrati aritmetička sredina duljine duže stranice i duljine dijagonale, uz uvjet da je kraća stranica barem 0,4mm veća od promjera lemne rupe.
- $$d_{LT} \approx 2 \cdot d_{LR} \quad \& \quad d_{LT} - d_{LR} \geq 0,6 \text{ mm}; d_{LR} - d_I \geq 0,1 \text{ mm} \quad (1.8.)$$

Predloženi postupak povezivanja komponenata

- ◆ Odrediti širinu voda napajanja referentnog potencijala (masa) ukoliko se za tu svrhu ne namjerava koristiti posebni sloj (*ground plane*) tiskanih veza, i to na temelju strujnog opterećenja i osjetljivosti sklopovlja na smetnje prouzročene strujama kroz zajedničke impedancije. Za struje do stotinjak miliampera preporuča se širina barem 60mila ($\approx 1,5\text{mm}$), a za veće struje i razmjerno veća.
- ◆ Odrediti širinu preostalih vodova napajanja ako se za tu namjenu ne primjenjuje posebni (*power plane*) sloj tiskanih veza, a iz istih uvjeta kao za vod mase. Za struje do stotinjak miliampera preporučljiva širina je barem 40mila ($\approx 1,0\text{mm}$), a za veće struje i razmjerno veća.
- ◆ Odrediti širinu signalnih vodova. Preporučljiva širina za vodove kojima teku struje do desetak miliampera je 12mila ($\approx 0,3\text{mm}$), a za veće struje i razmjerno veća.
- ◆ Ovisno o naponskim radnim uvjetima odrediti potrebne razmake između vodova. Za razlike potencijala između elemenata vodljivih likova do desetak volta preporučljivi razmak je 12mila ($\approx 0,3\text{mm}$), a za veće napone i razmjerno veći.
- ◆ Provjeriti usklađenost predviđenih širina svih vodova s jakostima struja koje kroz njih teku (Slika 1.17.), posebice za signalne vodove protjecane vrlo velikim strujama u sklopovima snage.
- ◆ Provjeriti usklađenost predviđenih razmaka između elemenata vodljivih likova s vrijednostima napona između njih (Slika 1.20.). Osobitu pozornost posvetiti udaljenostima od likova izravno galvanski povezanih s elektroenergetskom mrežom, te razmacima između tiskanih veza u galvanski odvojenim električnim krugovima sklopovlja.
- ◆ Odrediti potrebne vanjske promjere lemnih točaka i promjere lemnih rupa (ako to već nije učinjeno tijekom izrade položajnog nacrtu komponenata) ovisno o promjerima pripadajućih izvoda komponenata, a sukladno pravilima.
- ◆ Ukoliko se projektiraju dvostrane ili višeslojne veze potrebno je odrediti i vanjske promjere lemnih točaka na prospojima. Budući da se u prospeje ne ugrađuju izvodi komponenata, oni se redovito buše svrdlom najmanjeg promjera (najčešće 0,5mm) kojeg dopušta tehnološki proces izrade (na njihove bočne stijenke potrebno je nanijeti vodljivi sloj). Preporučljiva vrijednost vanjskog promjera takvih lemnih točaka je 50mila ($\approx 1,3\text{mm}$).

- ◆ Povezivanje izvoda komponenata prema opisu veza započeti s vodovima napajanja, i to s vodom referentnog potencijala.
- ◆ Spojiti signalne veze s posebnim električkim zahtjevima (vrlo visoke frekvencije odnosno vrlo kratka vremena porasta i pada pripadajućih signala, osjetljivost na elektromagnetske smetnje).
- ◆ Povući preostale signalne vodove počevši od najkraćih.
- ◆ Kratkospojnike koristiti na jednostranim pločicama ako bez njih ostvarenje svih zadanih veza nije moguće, a nema opravdanja za povećanje broja slojeva. Svi kratkospojnici trebaju biti iste duljine.

Preporuke pri povezivanju komponenata

- ◆ Vodove udaljiti barem 1mm od rubova pločice.
- ◆ Kose vodove crtati pod kutem 45° (135°).
- ◆ Izbjegavati šiljaste unutarnje kuteve pri promjeni smjera vodova (savijanju) te pri njihovom međusobnom spajanju (križanju).
- ◆ Izbjegavati velike vodljive površine oko lemnih mjesta s ciljem ograničavanja nepotrebnog i nepravilnog odvođenja topline tijekom lemljenja.
- ◆ Na jednostranim tiskanim vezama usporedno voditi vodove mase i napajanja, a na dvostranim jedno iznad drugoga (masa s lemne, a preostali vodovi napajanja s komponentne strane). Na višeslojnim vezama povoljno je jedan od slojeva koristiti isključivo kao vod mase te još jedan sloj samo za ostale vodove napajanja. Za primjerice četveroslojne veze preporučljivo je glavninu signalnih vodova smjestiti na četvrti (lemnina strana), vod mase na treći, preostale vodove napajanja na drugi, a ostatak signalnih vodova na prvi (komponentna strana) sloj. Izvedba vodova napajanja, osobito mase, u zasebnim slojevima optimalna je za sveukupne električke značajke sklopovlja, no nije moguća na jednostranim i dvostranim vezama. U tom je slučaju osobito važan način razvođenja (topologija) vodova napajanja. Povoljno je razvođenje po vanjskim rubovima pločice s mjestimičnim grupnim (i masa i ostali potrebni vodovi napajanja) grananjem prema unutrašnjosti njene površine, tako da svi vodovi napajanja tvore strukture u obliku češlja. Posebnu pozornost potrebno je posvetiti vodovima između izvoda napajanja integriranih krugova i pridruženih im blokadnih kondenzatora.
- ◆ Signalne veze, posebice one s posebnim električkim zahtjevima, ostvarivati što kraćim i ravnijim vodovima uz što veće međusobne razmake.
- ◆ Glavninu vodova nastojati povući na lemnjnoj strani, a na komponentnoj strani izbjegavati vodove ispod integriranih krugova te između njihovih izvoda.
- ◆ Izbjegavati lokalna gomilanja vodova.

2.2.3. Provjeravanje rezultata projektiranja

Po završetku smještanja i povezivanja komponenata provjerava se sukladnost sveukupnih značajki tiskane pločice i ulaznih zahtjeva procesa projektiranja. Računalnim programom provjerava se (*Design Rule Check - DRC*) jesu li tiskanim vodovima u potpunosti i ispravno ostvarene sve električke veze iz opisa veza izvedenog iz električke sheme sklopovlja, te je li ispunjen uvjet najmanjeg dopuštenog razmaka između elemenata električki odvojenih vodljivih likova. Provjera zadovoljenosti ostalih pravila i zahtjeva izvodi se uglavnom ručno. Ukoliko je provjera prolazna, pohranjuju se izlazni računalni podaci te izrađuje projektna dokumentacija. U protivnom je potrebno izmijeniti ili dopuniti nacрте tiskanih veza.

2.3. Izlazni podaci i projektna dokumentacija

Izlazne računalne podatke procesa projektiranja tiskanih pločica (slike 1.10. i 1.14.), ujedno i ulazne podatke tehnološkog procesa njihove izrade, tvore

- ◆ električka shema sklopovlja,
- ◆ opis veza,
- ◆ položajni nacrt komponenata i
- ◆ nacrti tiskanih veza svih vodljivih slojeva pločice,

koji su opisani u prethodnim poglavljima, te

- ◆ nacrt lemne maske (*solder mask*) i
- ◆ opis rupa (*NC drill*).

Nacrt lemne maske (maske za nanošenje zaustavnog laka) zapravo je negativ nacрта lemnih točaka (Slika 1.4.) uvećanih promjera za nekoliko desetinki milimetra (0,1 do 0,3mm). Izbor razmaka od vanjskog ruba lemne točke do zaustavnog laka funkcija je preciznosti tehnološkog postupka nanošenja laka te najmanjih udaljenosti vanjskih rubova lemnih točaka od najbližih električki odvojenih vodljivih likova. U slučaju premalog razmaka, a zbog položajnih tolerancija postupka nanošenja, zaustavni lak bi otežavao lemljenje. U slučaju pak prevelikog razmaka vodljivi bi likovi u neposrednoj blizini lemnih točaka mogli biti djelomično neprekriveni lakom, te

prilikom lemljenja s njima kratkospojeni lemnom slitinom. Nacrt lemne maske isti je i za lemnu i za komponentnu stranu, samo se u postupku nanošenja laka na lemnu stranu film okreće zrcalno.

Opis rupa sadrži podatke o koordinatama i promjerima svih rupa na pločici, u obliku prikladnom za računalom upravljane bušilice.

Projektna dokumentacija je dio izlaznih računalnih podataka procesa projektiranja u pisanom obliku, a sadrži

- ◆ električku shemu sklopovlja,
- ◆ položajni nacrt komponenata,
- ◆ nacрте tiskanih veza svih vodljivih slojeva pločice i
- ◆ plan bušenja (*drill drawing*).

Ukoliko je projektirana pločica namijenjena izradi laboratorijskim postupkom, kojem je nacrt tiskanih veza otisnut na prozirnom papiru ujedno i maska za fotopostupak i u kojem se podrazumijeva ručno bušenje rupa, lemne točke trebaju imati proziran unutarnji krug koji pri bušenju rupa služi kao vodilica za svrdlo. Za strojno bušenje rupa unutarnji krug lemne točke mora biti zacrnjen jer u protivnom može prouzročiti savijanje i pucanje svrdla tijekom bušenja.

Plan bušenja je zapravo opis rupa prilagođen ručnom bušenju, a koristan je i pri ručnom provjeravanju ispravnosti njihovih predviđenih promjera. Na svim koordinatama rupa sadrži oznaku (simbol) svrdla s kojim tu rupu treba probušiti, te legendu oznaka (primjerice: +: $\phi 0,8$; *: $\phi 1,0$; o: $\phi 3,1$; ili: A: $\phi 0,8$; B: $\phi 1,0$; C: $\phi 1,3$; D: $\phi 3,1$). Vrijednosti promjera svrdala iskazuju se u milimetrima, a oznake im je potrebno izabrati tako da su im međusobne razlike što lakše raspoznatljive. Ukoliko su oznake koje koristi primjenjeni računalni program neprikladne, a program ne dopušta njihove izmjene, potrebno ih je na papiru ručno preinačiti (primjerice obilježavanjem različitim bojama). Uz nacrt gledan s komponentne strane (priklađan za provjeravanje), plan bušenja se obično izrađuje i u nacrtu gledanom s lemne strane (priklađan za bušenje).

3. TEHNIČKA DOKUMENTACIJA

Tijekom svih postupaka procesa projektiranja elektroničkog uređaja, od početnih razvojno-istraživačkih do završnih ispitivanja i pripreme proizvodnje, usporedno se izrađuju i odgovarajući dijelovi tehničke dokumentacije. Značaj dokumentiranja postaje sve veći razvojem elektroničke tehnologije i povećanjem složenosti primjenjivanog sklopovlja i programske podrške. Primjerice općeprihvaćene norme ISO 9000 znatnim dijelom upravo propisuju pravila dokumentiranja. Tehnička dokumentacija elektroničkih uređaja temelj je proizvodnje, daljnjeg razvoja, prodaje, primjene i održavanja uređaja. Stoga mora biti sveobuhvatna, točna, dosljedna i pregledna. Prema namjeni dijeli se na

- ◆ proizvodnu,
- ◆ korisničku (prodajnu) i
- ◆ servisnu.

Svaki njen dio mora sadržavati naziv i zaštitni znak proizvođača te vrstu i naziv uređaja. Pojedini su dijelovi opisani u prethodnom poglavlju, pa u nastavku slijede pojašnjenja samo preostalih.

3.1. Proizvodna dokumentacija

Proizvodna dokumentacija elektroničkog uređaja omogućuje njegovu proizvodnju i daljnji razvoj. Budući da ju koristi isključivo proizvođač, za način njene izrade ne postoje opća pravila ili zakonske obveze. Međutim sadržaj joj je uglavnom predodređen namjenom i zahtjevom za potpunosti. Za cjelokupni uređaj preporuča se izrada

- ◆ električke sheme,
- ◆ sastavnice,
- ◆ ugradbenog nacрта i priključne tablice te
- ◆ uputstva za ispitivanje i umjeravanje,

te dodatno za svaku tiskanu pločicu koja se ugrađuje u uređaj

- ◆ električke sheme,
- ◆ sastavnice,
- ◆ položajnog nacрта komponenata,
- ◆ nacрта tiskanih veza svih vodljivih slojeva,
- ◆ plana bušenja i
- ◆ uputstva za ispitivanje i umjeravanje.

3.1.1. Sastavnica

Sastavnica je tablični opis svih elektroničkih, elektromehaničkih, elektrotermičkih i mehaničkih komponenata određenog dijela uređaja, na temelju kojeg se komponente nabavljaju. Dodatno se koristi i tijekom ugradnje, ukoliko se ugradnja izvodi ručno. U njoj se najčešće navode

- ◆ redni broj grupe istonazivnih komponenata,
- ◆ oznake svih komponenata u grupi,
- ◆ opis komponente i
- ◆ potrebna količina.

Preporuča se dodati i

- ◆ naziv proizvođača,
- ◆ naziv dobavljača,
- ◆ naziv kataloga dobavljača,
- ◆ redni broj stranice kataloga i
- ◆ kataloški broj.

Preporuke pri ispunjavanju sastavnice

- ◆ Prvo navoditi elektroničke komponente, potom elektromehaničke, elektrotermičke i mehaničke.
- ◆ Elektroničke komponente upisivati od složenijih (integrirani krugovi i diskretne poluvodičke komponente) prema jednostavnijima (pasivne komponente).
- ◆ Istovrsne komponente (ista slovna oznaka) navoditi za redom. Poredati ih ili po brojevima u oznakama ili po vrijednostima svojstvenih električnih veličina.
- ◆ Elektromehaničke komponente (podnožja, kućišta osigurača) koje se koriste za ugradnju elektroničkih komponenata označiti istom slovno-brojevnom oznakom kao pripadajuću elektroničku komponentu.
- ◆ U opisima integriranih krugova i diskretnih poluvodičkih komponenata navoditi
 - vrstu (četverostruki dvoulazni NI sklop, PNP tranzistor),
 - naziv (74HCT00, BC556B) i
 - kućište (DIP-14, TO-92).
- ◆ U opisima pasivnih komponenata navoditi
 - vrstu (kovinoslojni otpornik, elektrolitski kondenzator),
 - nazivnu vrijednost svojstvene (otpor, kapacitet, induktivitet) električne veličine (10kΩ, 47μF),
 - nazivnu vrijednost utjecajnih (snaga, napon, struja) električnih veličina (0,25W, 16V) i
 - druge podatke (tolerancije nazivnih veličina, temperaturni koeficijenti) ukoliko su različiti od uobičajenih koji se podrazumijevaju (0,1%, 10ppm/°C).

3.1.2. Ugradbeni nacrt uređaja i priključna tablica

Ugradbeni nacrt uređaja opisuje položaj tiskanih pločica i drugih sastavnih dijelova uređaja u kućištu. Najčešće obuhvaća tehnički crtež otvorenog kućišta uređaja u perspektivi, te nacрте prednje i stražnje ploče. Priključna tablica sadrži popis električkih veza između pojedinih dijelova uređaja koje se ostvaruju ožičenjem.

3.1.3. Uputstvo za ispitivanje i umjeravanje

Uputstvo za ispitivanje i umjeravanje propisuje svojstva ispitnih signala i način njihova priključivanja, svojstva odzivnih signala na ispitnim točkama, te način i redoslijed umjeravanja.

3.2. Korisnička dokumentacija

Korisnička dokumentacija se zajedno s uređajem isporučuje korisniku. Opisuje uređaj i način njegove primjene, a prilagođeno korisnicima bez stručnog znanja i iskustva. Dijelovi korisničke dokumentacije (osobito tehnički podaci) smatraju se ugovornom obvezom proizvođača potvrđenom jamstvenim listom. Uputstvo za uporabu (posebice opis sigurnosnih mjera) pravno štite proizvođača u slučaju nepravilne primjene uređaja. Korisnička dokumentacija treba sadržavati

- ◆ opis uređaja,
- ◆ uputstvo za uporabu i
- ◆ jamstveni list.

3.2.1. Opis uređaja

Opis uređaja omogućuje korisniku okvirni uvid u namjenu i način rada uređaja, te sveobuhvatni pregled njegovih tehničkih značajki. Redovito se navodi

- ◆ područje primjene i namjena uređaja,

- ♦ opis dodatnih dijelova uređaja (za primjerice prijenosni multimetar to su priključne stezaljke i baterija),
- ♦ blok shema, te
- ♦ zajamčeni i informativni tehnički podaci.

Tehnički podaci

Zajamčeni tehnički podaci su brojevno iskazane i obvezujuće temeljne električke, mehaničke i toplinske značajke uređaja. Za primjerice digitalni voltmetar bitne električke značajke su mjerni opseg, granična mjerna pogreška (točnost), razlučivanje, učestalost mjerenja, mjerena svojstvena (srednja, vršna, efektivna) vrijednost izmjeničnih napona, ulazna impedancija. U okviru električkih značajki obvezno se opisuje izvor napajanja (baterija, akumulator, elektroenergetska mreža), i to navođenjem nazivne vrijednosti i dopuštenih odstupanja napona (i frekvencije u slučaju mrežnog napajanja), potrošnje struje (snage) i nazivnih značajki osigurača. Svi signalni ulazi i izlazi dostupni korisniku (priklučki izvedeni na kućište) moraju biti potpuno električki opisani. Od toplinskih i mehaničkih svojstava potrebno je navesti temperaturno područje rada, stupanj zaštite kućišta od prodora čestica krutih tvari i tekućine, te i druge značajke ovisne o namjeni uređaja (primjerice otpornost na potresanje i ubrzavanje za prijenosne uređaje).

Informativni tehnički podaci opisuju posebne značajke (dimenzije, masa, izgled, ergonomičnost) uređaja nebitne za njegov rad, ali često vrlo važne pri izboru uređaja.

3.2.2. Uputstvo za uporabu

Uputstvo za uporabu mora sadržavati sve bitne podatke potrebne za ispravnu i potpunu primjenu uređaja. Najčešće sadrži

- ♦ pripremu uređaja,
- ♦ uputstvo za rukovanje,
- ♦ uputstvo za održavanje i
- ♦ uputstvo za umjeravanje.

Priprema uređaja

Jednostavnijim uređajima priprema za rad zahtijeva samo priključivanje napona napajanja. Ukoliko je napajanje akumulatorsko, propisuje se način njegove provjere i punjenja. Složenijim (posebice industrijskim) uređajima opisuje se način povezivanja (priključna shema) vanjskih priključaka. Vrhunskim elektroničkim mjernim uređajima redovito je potrebno osigurati određeno vrijeme zagrijavanja, nakon kojeg su ostvarive deklarirane mjeriteljske značajke. U sklopu priprema za rad često se navode i preporuke za zaštitu od elektromagnetskih smetnji.

Uputstvo za rukovanje

Uputstvo za rukovanje opisuje postupke primjene uređaja za ostvarenje njegove namjene, uključujući sigurnosne mjere. Sigurnosne mjere štite korisnika tjelesno, a proizvođača pravno. Propisuju primjerice potrebu priključivanja uređaja na mrežnu utičnicu s uzemljenjem (šuko), način uzemljivanja električki vodljivih dostupnih dijelova kućišta, primjenu posebnih zaštitnih sklopki i osigurača, izbjegavanje dodira s tekućinom, a sve s ciljem zaštite korisnika od strujnog udara. Opis postupaka rukovanja sadrži nacrt ili sliku prostornog rasporeda (uključujući oznake) korisničkih ulaznih i izlaznih naprava najčešće na prednjoj ploči uređaja, zajedno s objašnjenjima potrebnih zahvata i njihovog redoslijeda za ostvarivanje pojedinih mogućnosti uređaja. Ulazne korisničke naprave su primjerice tipkovnice, preklopke i potenciometri, a izlazne pokaznici (pokaznici s tekućim kristalima, pokaznici sa svjetlećim diodama, fluorescentni pokaznici, pokaznici s katodnom cijevi) i komponente za svjetlosnu (svjetleće diode, žarulje, tinjalice) i zvučnu (zvučnici, zujala) signalizaciju.

Uputstvo za održavanje

Uputstvo za održavanje opisuje jednostavnije zahvate poput čišćenja ili zamjene baterija i osigurača, te postupke pravilnog pohranjivanja uređaja. Za omogućavanje pristupa dijelovima uređaja koji se povremeno zamjenjuju, uputstvu se prilaže i opis (nacrt) mehaničke konstrukcije kućišta.

Uputstvo za umjeravanje

Uputstvo za umjeravanje rijetko je sastavni dio korisničke dokumentacije (češće je u sklopu servisne), a izrađuje se uglavnom za mjerne uređaje koji podliježu zakonski obveznom umjeravanju u ovlaštenim laboratorijima nacionalnih normizacijskih ustanova.

3.2.3. Jamstveni list

Zakonski je obvezno jamstvo trajanja najmanje jednu godinu, a održavanje mora biti osigurano barem sedam godina od dana prodaje uređaja. U njemu se navode uvjeti pod kojima jamstvo vrijedi, a isključuju se kvarovi nastali nepravilnim rukovanjem uređajem.

3.3. Servisna dokumentacija

Servisna dokumentacija koristi se pri održavanju uređaja, otklanjanju kvarova, dogradnji i drugim uslugama koje proizvođač mora osigurati korisniku. Za način njene izrade, kao i za proizvodnu, ne postoje opća pravila ili zakonske obveze. Sadržaj joj pak proizlazi iz namjene, a uključuje najčešće cjelokupnu korisničku i dijelove proizvodne dokumentacije, te dodatke poput popisa kvarova i preporučenih postupaka za njihovo otklanjanje.

5. NAPUTAK ZA IZRADU PROGRAMA

Zadatak

Na temelju načelne električke sheme sklopovlja projektirati tiskanu pločicu i izraditi tehničku dokumentaciju koristeći skripta "Projektiranje tiskanih veza". Cjelokupni program tvore

1. Područje primjene i namjena sklopovlja,
2. Blok shema,
3. Električka shema,
4. Opis rada,
5. Tehnički podaci,
6. Uputstvo za uporabu,
7. Sastavnica,
8. Položajni nacrt komponenata,
9. Nacrt(i) tiskanih veza i
10. Plan bušenja.

Preporučeni postupak izrade programa

Proučiti i razmotriti rad sklopovlja zadanog načelnom, izvedbeno nepotpunom električkom shemom. Utvrditi područje primjene i namjenu (1.), te ih ukratko opisati. Odrediti funkcijske cjeline i nacrtati blok shemu (2.), a potom i električku (3.) dopunjenu potrebnim elektroničkim (blokadni kondenzatori: višeslojni keramički kapaciteta 100nF za svaki integrirani krug, tantal elektrolitski kapaciteta 10 μ F na svakih pet integriranih krugova s istim napajanjem, te elektrolitski kapaciteta 100 μ F neposredno uz konektor na koji se priključuje napajanje), elektrotermičkim (hladila poluvodičkih komponenata) i elektromehaničkim (konektori, podnožja, ispitne točke) komponentama, te preinačenu sukladno preporukama. Jezgrovito opisati rad (4.) sklopovlja pozivanjem na dijelove označene u prethodno izrađenim shemama. Slijedi pregled zajamčenih tehničkih podataka (5.) i uputstvo za uporabu (6.) Nakon izrade sastavnice (7.) projektira se tiskana pločica. Sklopovlje je **obvezno** smjestiti na **jednu** pločicu što manjih dimenzija, s **jednostranim** vezama (iznimno i dvostranima). Položajni nacrt komponenata (8.), nacrt(i) tiskanih veza (9.) i plan bušenja (10.) crtaju se pomoću računala i otiskuju pisačem (mjerilo 1:1). Dijelovi programa od 1. do 7. izrađuju se na zasebnim papirima pregledno i čitko, s odgovarajućim naslovima i brojevima stranica prema zadanom redosljedu. Naslovna stranica treba sadržavati: ime studenta i matični broj, naziv smjera, predmeta i programa, te datum predaje programa.