

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Luka Klaić

**MOGUĆNOSTI RAZVOJA
ELEKTRONIČKIH UREĐAJA
U OTEŽANIM
UVJETIMA PANDEMIJE**

Zagreb, 2022.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za elektroničke sustave i obradbu informacija Fakulteta elektrotehnike i računarstva pod vodstvom prof. dr. sc. Marija Cifreka i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022.

Sadržaj

Sadržaj	I
1. Uvod	1
1.1. Motivacija istraživanja.....	1
1.2. Cilj istraživanja	1
1.3. Struktura rada.....	1
2. Fizička izvedba	2
2.1. Profesionalni postupak	2
2.2. Izrada metodom prijenosa topline.....	4
2.3. Izrada metodom fotopostupka	13
2.4. Usporedba metoda	17
3. Rezultati i rasprava.....	20
4. Zaključak	24
Zahvala.....	25
Literatura	26
Naslov, sažetak i ključne riječi	28
Title, summary and keywords	29

1. Uvod

1.1. Motivacija istraživanja

U sklopu praktične nastave na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, trebalo je realizirati elektronički uređaj te preispitati mjerenjima njegove značajke i nedostatke. Taj se postupak uobičajeno sastoji od koraka projektiranja, narudžbe i izrade, što zahtijeva dobru i stabilnu komunikaciju kako s proizvođačima elektroničkih tiskanih pločica, tako i dobavljačima materijala i komponenata. Uslijed poremećaja u lancu nabave, uzrokovanog COVID-19 pandemijom, bilo je potrebno dovijati se alternativnim rješenjima koja omogućuju razvoj prototipa u uvjetima gospodarskog zastoja i karantene.

1.2. Cilj istraživanja

Cilj prikazanog rada je istražiti potencijal i uspješnost metoda razvoja koje je moguće primijeniti u uvjetima kada uhodani profesionalni postupak izrade elektroničkih uređaja nije dostupan. Kako bi se preispitao utjecaj kvalitete i ograničenja predstavljenih metoda izrade na kvalitetu realiziranog uređaja, provest će se usporedba odnosa signala i šuma u uređaju realiziranom u kućnim uvjetima i uvjetima fakultetskog laboratorija s jedne strane, te u uređaju realiziranom profesionalnim postupkom s druge strane.

1.3. Struktura rada

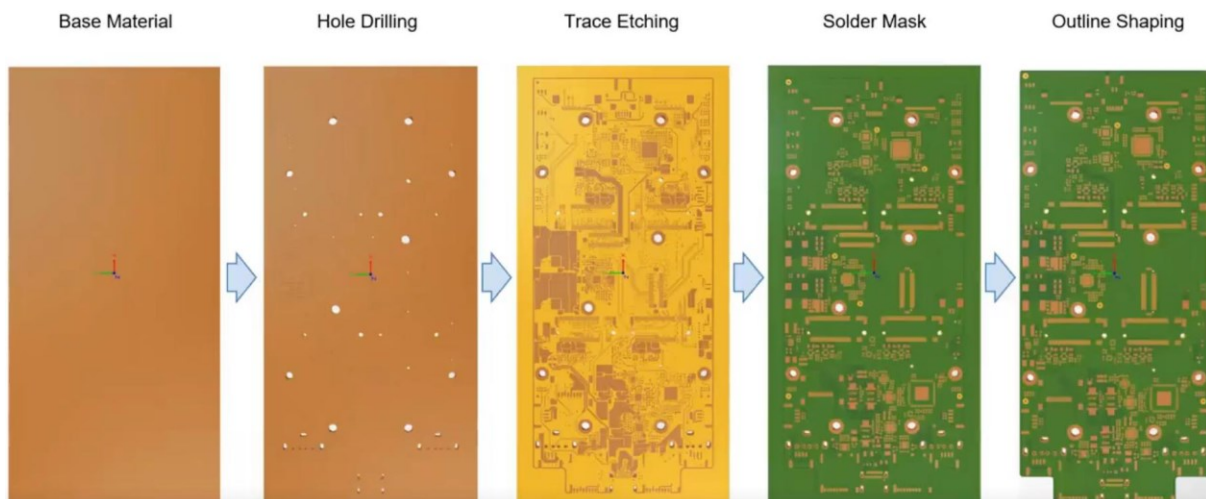
Nastavak rada podijeljen je na 2 poglavlja. U drugom poglavlju opisane su dvije metode izrade prototipa elektroničkih uređaja – metoda prijenosa topline u kućnim uvjetima i metoda fotopostupka u fakultetskom laboratoriju, koje su potom međusobno uspoređene po uspješnosti i zahtjevnosti izvedbe. Nadalje, u trećem su poglavlju na temelju rezultata mjerenja odnosa signala i šuma uspoređene kvalitete uređaja realiziranog ranije opisanim metodama te uređaja izrađenog profesionalnim postupkom. Naposljetku, rad završava zaključkom, u kojem je na temelju dobivenih rezultata i rasprave iznesena procjena potencijala predstavljenih metoda u dizajniranju i izradi prototipa elektroničkih uređaja, kako u svakodnevnoj praksi, tako i u otežanim uvjetima pandemije.

2. Fizička izvedba

2.1. Profesionalni postupak

Realizirani elektronički uređaj sastoji se od četveroslojne tiskane pločice (engl. *printed circuit board*, PCB) širine i duljine od 40 mm.

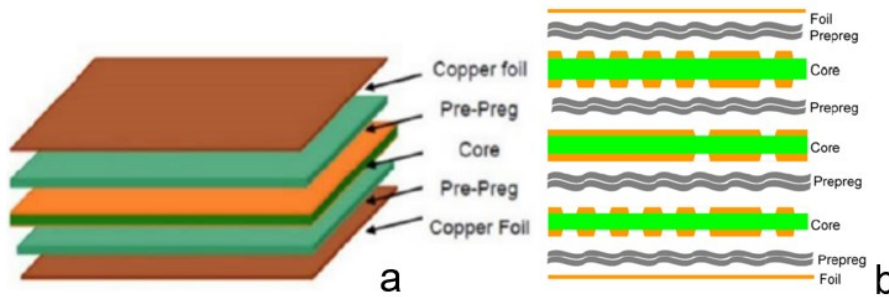
Bez obzira na njezinu složenost, glavni koraci izrade dvoslojne tiskane pločice mogu se prikazati slikom 2.1. Sama pločica zapravo je nosiva izolacijska podloga, najčešće vitroplast (materijal FR4, engl. *flame retardand 4*) [1], presvučena slojevima bakra s jedne ili obje strane. Nakon bušenja rupa (engl. *hole drilling*), procesom jetkanja (engl. *etching*) se uz pomoć predloška s vodljivim likovima kemijskim procesom uklanja bakar s mjesta gdje ga ne smije biti. Zatim se na čitavu površinu, osim na lemna mjesta (engl. *pad*) nanosi sloj zaustavnog laka (engl. *solder mask*) koji pločici daje karakterističnu boju, a služi olakšavanju strojnog lemljenja (engl. *soldering*) te sprječavanju neželjenih premoštenja između vodljivih likova, kao i sprječavanju oksidacije bakra i mehaničkih oštećenja vodova [1]. Potom slijedi nanos oznaka i obrisa komponenti (engl. *silkscreen*) i konačno završna površinska obrada (engl. *PCB surface finish*) u postupku koje se izložene dijelove bakra prekriva zaštitnim vodljivim slojem zlata, kositra, nikla ili srebra radi sprječavanja oksidacije kontakata i lakšeg lemljenja [2].



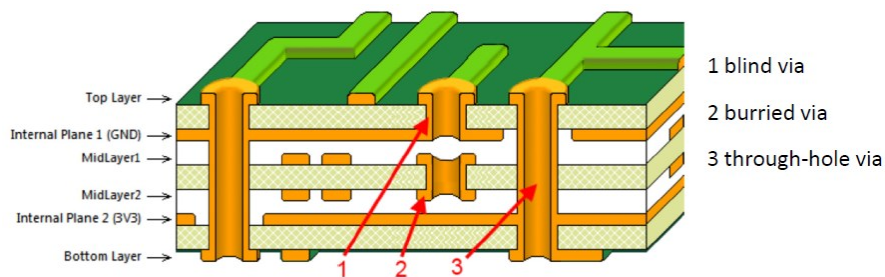
Slika 2.1. Proizvodni postupak izrade dvoslojne tiskane pločice, [2].

U slučaju izrade četveroslojne i svake tiskane pločice s više od dva sloja (slika 2.2.), prvo se, slično proizvodnom postupku dvoslojne pločice, nanošenjem maske i

jetkanjem formiraju unutarnji slojevi oko središnje, jezgrene nosive izolacijske podloge (engl. *core*), nakon čega se procesom prešanja i laminacije pod povišenim tlakom i temperaturom nanose ostali bakreni slojevi (engl. *copper foil*) iz središta prema van, međusobno odvojeni dodatnim izolacijskim slojevima (engl. *prepreg*). U tom slučaju, slojevi su međusobno povezani različitim tipovima prospojnih rupa (engl. *via*, slika 2.3.) [3].



Slika 2.2. Presjek četveroslojne (a) i osmeroslojne tiskane pločice (b), [3].



Slika 2.3. Presjek šesteroslojne tiskane pločice s tri vrste prospojnih veza, [4].

S obzirom na to da su pločice izrađene u vrijeme karantene izazvane COVID-19 pandemijom, kada nije bilo moguće naručiti profesionalnu izradu, četveroslojni je sustav realiziran dvjema dvoslojnim tiskanim pločicama postavljenima jedna iznad druge. Njihovo povezivanje ostvareno je nizom obodnih prospojnih rupa kroz koje su provučene i zalemljene bakrene žice.

Prilikom projektiranja tiskanih veza potrebno je voditi računa o uobičajenim odlikama dobre fizičke realizacije, među kojima su povlačenje čim kraćih vodova kako bi se smanjila površina parazitnih strujnih petlji, izbjegavanje šiljaka i pravih kutova, ravnomjerno iskorištavanje prostora te maksimizacija efektivne gustoće komponenti [1].

Na umu treba imati i realne karakteristike voda (engl. *track*), koji svojim dimenzijama i materijalom posjeduje parazitni otpor, kapacitet i induktivitet. Prema (1) otpor voda gustoće materijala ρ i duljine l smanjuje se, osim skraćivanjem, i proširenjem jer time

dolazi do povećanja njegove vodljive površine A koja mu je obrnuto proporcionalna [1]:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

Sukladno tome, vodovi napajanja i vodovi kojima teku veće struje moraju biti što širi u odnosu na signalne vodove, kako bi se prema (2) uslijed njihova manjeg linijskog otpora R_{PCB} na njima disipiralo čim manje toplinske snage P [1]:

$$P = I^2 R_{PCB} \quad (2)$$

Kada je riječ o razmaku između pojedinih vodova, temeljni zahtjev je izolacijski razmak kao minimalna dopuštena udaljenost između dvaju električki odvojenih elemenata vodljivih likova [1]. Prema IPC (engl. *Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*) preporukama za tiskane veze koje su tijekom rada galvanski odvojene od elektroenergetske mreže, za napone iznosa 0 – 30 V minimalni propisani razmak iznosi 0,1 mm [1].

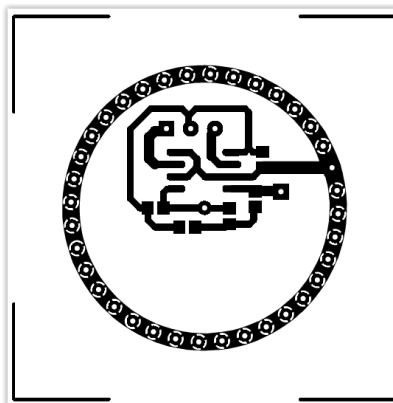
Konkretna realizacija tiskanih veza, ostvarena u razvojnom paketu Altium Designer [5], dodatno je prilagođena ograničenjima korištenih metoda za razvoj prototipa, o čemu će više biti riječi u narednom poglavlju.

2.2. Izrada metodom prijenosa topline

Nasuprot postupku profesionalne izrade, u postupku izrade u kućnim uvjetima metodom prijenosa topline (engl. *thermal transfer*) moguće je nanositi i obrađivati samo bakrene slojeve, pa se dotična procedura može podijeliti na sljedeće korake:

1. prilagodba projektiranih predložaka vodljivih likova i rupa za bušenje
2. oblikovanje dimenzija bakrene pločice
3. nanošenje nacrtu tiskanih veza
4. jetkanje
5. optička i električka provjera spojeva
6. bušenje rupa
7. završna obrada i čišćenje
8. lemljenje

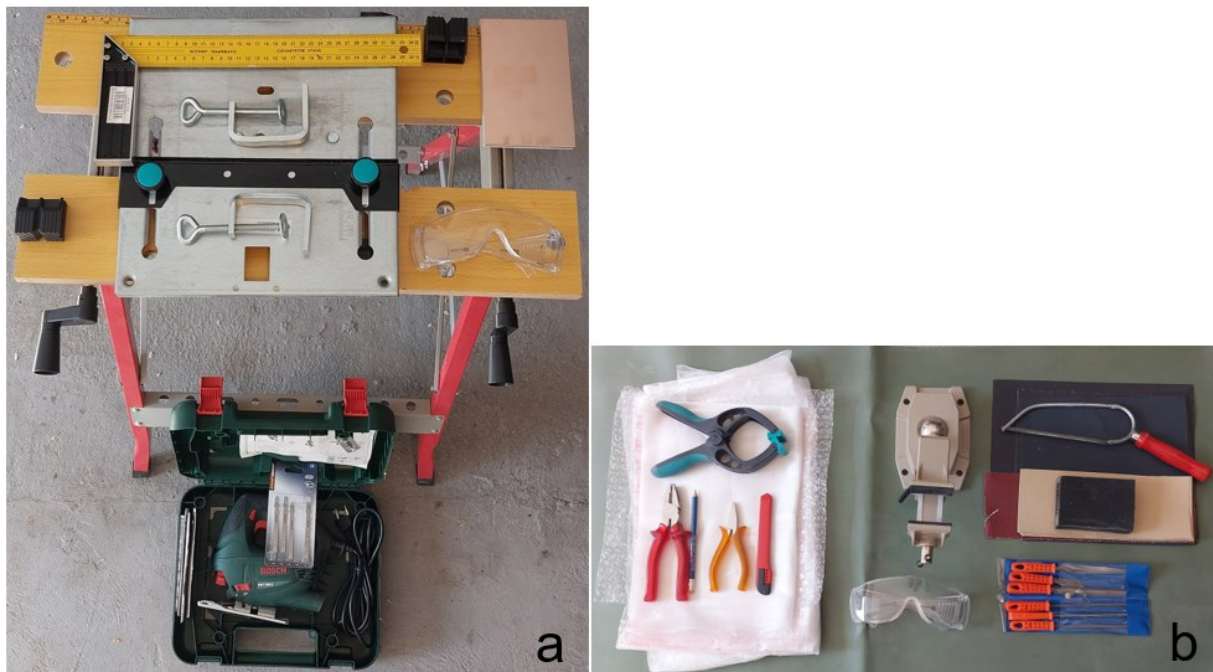
Uzimajući u obzir manju razlučivost i preciznost ovakvog postupka, prilagodba dokumentacije za tiskane pločice podrazumijeva povećanje razmaka između komponenata i pojedinih vodljivih likova, proširenje vodova na barem 20 mils (20 tisućinki jednog inča), primjenu izravnog (engl. *direct connect*) umjesto *thermal relief* načina spajanja na prospojne rupe, proširenje lemnih mjesta za lakše ručno lemljenje te prilagodbu rupa za bušenje promjerima dostupnih svrdala: za razliku od strojnog bušenja, kod ručnog bušenja rupe na planu bušenja treba ostaviti vidljivima, kako bi se vrh svrdla lakše ručno pozicionirao [1]. Nadalje, budući da ovakav postupak izrade omogućuje nanošenje samo bakrenih slojeva, no ne i sitotiska za označavanje obrisa i oznaka te zaštitnog sloja zaustavnog laka, sve nužne oznake upisuju se u bakar, pazeći pritom da suvišne bakrene linije ne bi stvorile neželjene antene za prijem vanjskih smetnji [1], stoga je u bakru preporučljivo označiti kutove dimenzija pločice za potrebe kasnijeg izrezivanja. Tako pripremljeni nacrti tiskanih veza, tj. predlošci za izradu vodljivih likova (slika 2.4.) ispisuju se u zrcaljenom obliku (engl. *mirrored*) laserskim pisačem na papir – obični, sjajni (engl. *glossy*) ili novinski, ili pak na prozirnu foliju za termalni transfer.



Slika 2.4. Primjer nacrti tiskanih veza.

U sljedećem koraku (slika 2.5.a), obostrano bakrom oslojenu pločicu od vitroplasta izreže se na 5 – 10 mm veće dimenzije od konačnih, kako bi se spriječio negativni efekt bočnog prodiranja kemijskih spojeva u laminat [1]. Za potrebe označavanja dimenzija pločice markerom mogu poslužiti same kutne oznake na izrezanim maskama, a donja strana pločice, čija se površina povlači po horizontalnoj podlozi prilikom rezanja, može se zaštititi grafofolijom ili ljepljivim papirom, poput naljepnice. Nakon izrezivanja, rubovi i bočne strane mogu se dotjerati i izglati brušenjem turpijom ili grubljim brusnim papirom (slika 2.5.b). Pri završetku mehaničke obrade,

pločicu treba očistiti nemrvećom maramicom glatke površine i acetonom kako bi se s njezine površine uklonila nečistoća, tragovi markera i ljepila, ali i fotoosjetljivi sloj ukoliko postoji. Između opetovanih koraka čišćenja površinu se može i izbrusiti finim brusnim papirom granulacije oko 1000. Pri rukovanju s pločicom važno je uvijek ju pridržavati za nekorištene rubove čistim i opranim rukama, kako se njezina površina ne bi iznova kontaminirala masnoćom i nečistoćom s prstiju. Osim toga, pločicu treba pohraniti i čuvati na zatvorenom i čistom mjestu, prekrivenu aluminijskom folijom, samim maskama ili uklopljenom između čistih papirnatih ručnika kako bi se njezina površina zaštitila od peludi, prašine i drugih sitnih čestica koje mogu prouzročiti problem prilikom jetkanja.

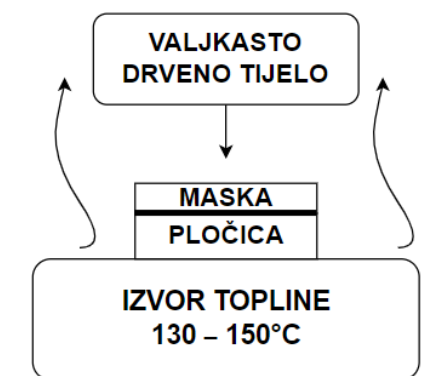


Slika 2.5. Oprema za izrezivanje (a) i mehaničku obradu pločice (b).

U trećem se koraku primjenom tlaka i topline toner s papirnate maske prenosi na površinu pločice [6] (slika 2.6.). Sama metoda idejno nalikuje postupku prešanja oznaka na majice i sportsku opremu: na površinu izvora topline (primjerice električnog glačala), ugrijanog na 130 – 150°C, postavlja se pločica, a na nju s gornje strane prsloni maska okrenuta tonerom prema pločici kao na slici 2.7. Za potrebe fiksacije pločice na površinu izvora topline, njezini se rubovi mogu oblijepiti uskim slojevima izolir-trake, a korištena površina izvora topline mora biti homogena, bez rupa za izlaz pare.



Slika 2.6. Oprema za korak prijenosa tonera toplinom (termo transfer).



Slika 2.7. Shematski prikaz sustava za termo transfer.

Kada se papir zagrijavanjem slijepi za pločicu, zagrijavanje treba nastaviti naredne 2 – 3 min, održavajući pomoću valjkastog drvenog objekta, poput valjka za tijesto, konstantnu i jednoliku silu pritiska po cijeloj površini pločice, pazeći da ne dođe do pomaka ili nadimanja papirnate maske. Kada se papir jednoliko slijepi po površini pločice, pločicu se zajedno s papirnatom maskom kliještima podigne s ugrijane površine i kratko ohladi napusima zraka. Ukoliko je pločica dvoslojna, bez skidanja maske pločica se okrene na suprotnu stranu koja se potom prebriše acetonom, a procedura nanošenja tonera se ponovi. Pri namještanju maske na suprotnu stranu pločice, potrebno je voditi računa o međusobnom položaju i simetriji maski.

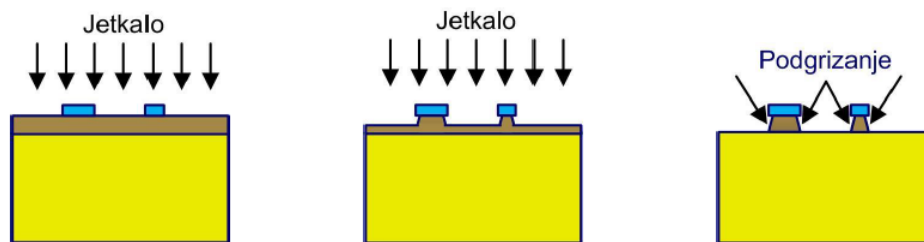
Kada su maske aplicirane na sve korištene strane pločice (jednu ili obje), pločica s maskama se smoči pod nježnim mlazom vode ili ostavi u posudi napunjenoj vodom. Ravnomjernim i polaganim potapanjem pločice u vodi čeka se dok se papir ne odlijepi s površine pločice. Ukoliko se toner nije dovoljno dobro prenio, u sljedećoj

iteraciji potrebno je povisiti temperaturu ugrijane površine glačala, a ukoliko se razlio potrebno ju je sniziti. Jednom iskorištenu pločicu moguće je ponovno iskoristiti jer se neuspjelo nanese toner može ukloniti acetonom – važno ju je samo dobro očistiti prije ponovnog apliciranja topline. Sitne korekcije moguće je provesti i točkanjem ili uskim kratkim potezima neizbrisivog markera, koji, ukoliko zahtjevi na preciznost to dopuštaju, može nadopuniti toner, ali samo ako time neće biti narušena pravilnost i oštrina rubova i oblika. Ostaci papira na mjestima gdje nema tonera moraju se pažljivo iskidati pincetom tankog vrha.

Sada je na redu jetkanje (slika 2.8.) – proces kemijskog uklanjanja bakra kiselinama poput FeCl_3 (željezov (III) klorid, feriklorid), CuCl_2 (bakrov (II) klorid), $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ (amonijev persulfat) i kromsumporne kiseline. Zbog svoje niske cijene, komercijalne dostupnosti, brze i mirne reakcije te dobrog nagrizanja, odabran je feriklorid [1]. Uz poštovanje pravila sigurnosti i zaštite pri rukovanju s nagrizajućim tvarima (prozračivanje prostorije, nošenje zaštitnih rukavica, naočala, maske te kute ili stare odjeće uz korištenje zaštitnih podloga) [7], pločice se pomoću kliješta i pincete pažljivo i polako umetne u čistu posudu sa sipanim ferikloridom. U procesu jetkanja, kiselina (jetkalo) nagriza i uklanja sloj bakra na pločici, pri čemu dijelovi bakra zaštićeni maskom tonera ostaju neizjetkani kako to prikazuje slika 2.9., formirajući tako vodove i lemna mjesta u obliku otisnutog predloška. Na taj način, predložak vodljivih likova odigrao je ulogu pozitiv filma.



Slika 2.8. Oprema za postupak jetkanja.



Slika 2.9. Vizualni prikaz procesa jetkanja na jednostranoj bakrenoj pločici, [1].

Pločice je u tekućini potrebno držati na međusobnom razmaku kako se ne bi slijepile i time onemogućile prodor kiseline na slijepljene površine. Najviše je vremena potrebno za pokretanje reakcije, a ona se može ubrzati kružnim pokretima spužve umočene u kiselinu po površini pločice, čime se stvaraju mjehurići visoke koncentracije feriklorida. Po iskustvenom pravilu, dva decilitra komercijalno dostupnog feriklorida dovoljno je za nagrizanje pločice dimenzije 240 x 240 mm. Za odabrane pločice dimenzija 40 x40 mm kemijska reakcija završava unutar 10 min, nakon čega se ispiranjem vodom na svim mjestima s kojih bakar treba biti uklonjen nazire zelenkasta boja vitroplasta. Trajanje jetkanja nužno je ograničiti kako ne bi došlo do oštećenja same izolacijske podloge i podgrizanja vodljivih likova ispod tonera (slika 2.9.), uslijed čega efektivnim smanjenjem širine vodova u tiskanim vezama mogu nastati električki prekidi [1].

Nakon jetkanja, pločice je potrebno odložiti na sušenje u zatvorenu čistu krpu te zatim skinuti acetonom preostali zaštitni sloj tonera.

Prije bušenja i lemljenja komponenata, potrebno je provjeriti ispravnost spojeva – kako vizualno, tako i električki korištenjem multimetra u funkciji ommetra za inspekciju kratkih spojeva. Realizirani vodovi moraju biti ispravni cijelom svojom dužinom, a posebnu pozornost valja posvetiti provjeri neželjenih bakrenih spojišta između vodljivih likova na različitim potencijalima. Višak bakra moguće je pokušati ukloniti struganjem odvijačem ili grubljim brusnim papirom (granulacije 60), a u slučaju manjka bakra, nadomjestak se može ostvariti nanošenjem minimalne i nužne količine lemne slitine u koraku lemljenja.

Kada se ispravnost svih spojišta utvrdila optički i električki, slijedi bušenje rupa za umetanje izvoda komponenata. Bušenje je najlakše provesti korištenjem stalka za bušilicu (slika 2.10.). Prije samog bušenja, na poziciji se rupe pomoću čekića i čavla napravi plitko udubljenje (tzv. pivot rupa) kako bi se kasnije tijekom bušenja omogućilo samonamještanje svrdla. U slučaju da se mjesta bušenja nisu uspjela

dobro otisnuti, moguće ih je naznačiti grafofolijom s isprintanim planom bušenja, ponovno imajući na umu međusobnu simetriju i poklapanje maski kod dvoslojnih pločica.



Slika 2.10. Oprema za bušenje.

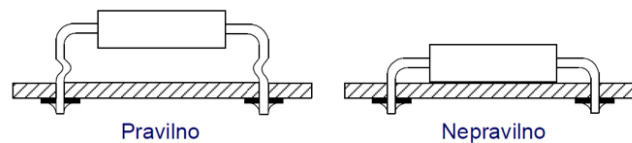
Nakon bušenja, pločicu je potrebno temeljito očistiti acetonom i etanolom kako bi se s njezine površine uklonila prašina i čestice nastale brušenjem i bušenjem, pazeći pri tome da se u rupe ne zavuku papirnata vlakna. Oprema za čišćenje i dodatnu površinsku obradu pločice prikazana je na slici 2.11.



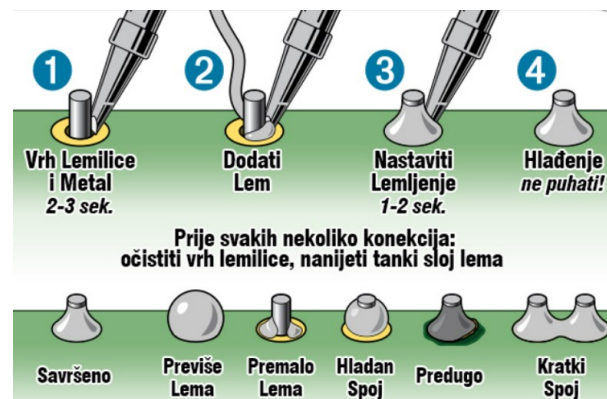
Slika 2.11. Oprema za čišćenje i finu obradu površina i rubova pločice.

Naposljetku, na gornju stranu gornje pločice svake elektrode potrebno je ugraditi (slika 2.12.) i zalemiti komponente imajući u vidu uobičajena pravila i savjete za lemljenje (slika 2.13.) [8], nakon čega preostaje još jednom očistiti površinu pločice etanolom i provjeriti kvalitetu lemnih spojišta, kao i ommetrom pojave neželjenih kratkih spojeva između zalemljenih lemnih mjesta na različitim potencijalima. Oprema

za ugradnju i lemljenje komponenata te optičku i električku inspekciju prikazana je na slici 2.14.



Slika 2.12. Prilikom ugradnje komponenata valja voditi računa o tome da komponente s većom disipacijom topline ne naliježu izravno na pločicu, a višak izvoda treba skratiti, [1].



Slika 2.13. Upute i savjeti za lemljenje, [8].



Slika 2.14. Oprema za ugradnju i lemljenje komponenata te optičku i vizualnu inspekciju ispravnosti spojeva.

Naravno, u slučaju kućne izrade moguće je izraditi samo jednoslojne i dvoslojne pločice, a one su, kako je ranije najavljeno, međusobno povezane odrezanim metalnim izvodima priključnih komponenata (engl. *pin-header*), čime je postignuta imitacija prospojnih veza višeslojnih pločica.

Ne računajući lemilicu, multimetar, laserski pisač, garažni alat te u kućanstvima široko dostupne uređaje, poput bušilice, ubodne pile, glačala, spužve za pranje posuđa, papirnatih ručnika, izolir-trake, škara, skalpela, kliješta i pincete te rashodovanih posuda i krpa, troškovi dodatnog opremanja za sve faze izrade metodom prijenosa toplinom mogu se procijeniti tablicom 2.1.

Tablica 2.1. Popis potencijalnih troškova opremanja za provedbu svih faza termo transfer metode izrade.

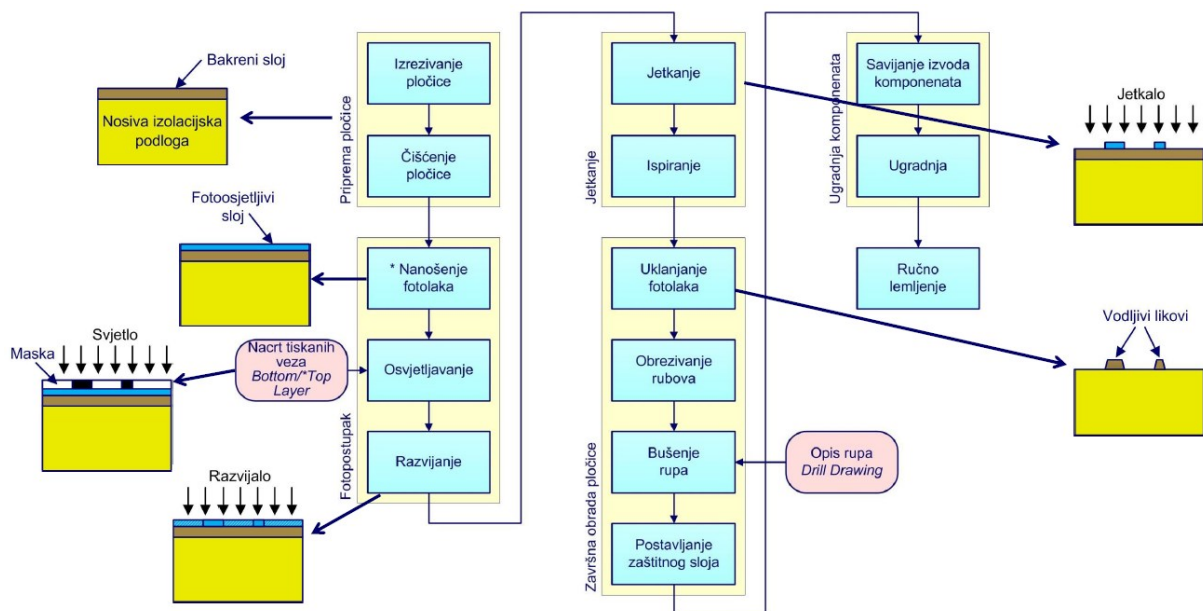
Proizvod	Jedinična cijena [kn]
Izrezivanje i mehanička obrada	
Pločica vitroplasta (FR4), 100 mm x 160 mm oslojena bakrom, dvostrana, bez fotosloja	17
Radni stol sa škripcem	140
Stol za ubodne pile 320 mm x 300 mm	200
Set od 5 listova ubodne pile za rezanje metala	60
Zaštitna pokrivna folija, 10 m ²	11
Zaštitne plastične naočale	13
Brusni papir u roli, granulacija 60, 115 mm x 5 m	30
Brusni papir, granulacija 1000, 280 mm x 230 mm	5
Držać brusnog papira	43
Set od pet turpija za metal	110
Ukupno	<=700
Prijenos tonera toplinom	
Film za izradu tiskanih pločica, <i>thermal transfer</i>	15
Permanentni vodootporni marker	24
Aceton (odstranjivač laka za nokte), bočica, 125 ml	20
Čistač tiskanih pločica, <i>flux removal</i> , bočica, 1 litra	30
Ukupno	<=100
Jetkanje	
Feriklorid, bočica, 1 litra	70
Ukupno	<=100
Bušenje	
Svrdlo, set od 10 komada promjera 0,6 mm – 2,3 mm	70
Stalak za bušilicu	250
Ukupno	<=400
Ugradnja komponenata i lemljenje	
Držać tiskanih pločica	80
Limeni stalak za lemilo s oprugom i spužvicom	30
Stalak za lemljenje s povećalom i štikaljkom	130
Naočale s tri vrste leća (uvećanja 1,5, 2,5 i 3,5)	50
Dugački vrh lemilice, promjer 0,4 mm	102
Tinol za lemljenje s jezgrom fluksa, 100 g, 0,5 mm	110
Traka za odlemljivanje, 0,8 mm x 1,5 m	15
Kalofonij (fluks) za lemljenje, 40 g	10
Metalna vuna za čišćenje vrha lemila	20
Pumpica za usisavanje rastopljenog tinola	25
Kliješta za krimpanje	260
Set žica za eksperimentalnu pločicu – 350 komada	88
Ukupno	<=1000

Usporedbe radi, postupak profesionalne izrade 5 četveroslojnih tiskanih pločica opisanih zahtjeva košta, s uračunatim troškom pošiljke, 50 USD [9].

2.3. Izrada metodom fotopostupka

Druga korištena metoda izrade je metoda fotopostupka (engl. *photolithography*, *optical lithography*), kojom su pločice izrađene u laboratoriju fakultetskog Zavoda za elektroničke sustave i obradbu informacija. Metoda fotopostupka predstavlja jednu od najzastupljenijih metoda izrade pločica danas, a od ostalih je metoda, poput tehnike sitotiska i litotiska, razlikuje način na koji se nacrt tiskanih veza prenosi s maske na površinu pločice [1].

Cjelokupna metoda opisana je po koracima slikom 2.15. Premda se metoda fotopostupka naširoko koristi i u profesionalnoj izradi pločica, u laboratorijskom postupku ponovno je, kao i ranije, moguće obrađivati i nanositi samo bakrene slojeve, pa uz danu preciznost postupka te odsustvo slojeva zaustavnog laka i sitotiska vrijede sva pravila i preporuke pripreme nacрта tiskanih veza i plana bušenja opisane u postupku termo transfera.



Slika 2.15. Postupak laboratorijske izrade jednoslojnih tiskanih pločica. U slučaju dvoslojnih pločica, prije koraka završne obrade pločice potrebno je ponoviti korake fotopostupka i jetkanja na drugom sloju, [1].

Priprema pločice ponovno podrazumijeva izrezivanje na dimenzije 5 – 10 mm veće od konačnih, nakon čega ranije opisanim mehaničkim i kemijskim sredstvima koja ne

degradiraju nalijepljeni bakreni sloj slijedi uklanjanje oksida i drugih nečistoća s njezine površine.

Budući da je riječ o fotopostupku, zrcaljane se maske ovoga puta laserskim pisačem ispisuju na paus papir ili prozirne grafofolije. Važno je naglasiti da korišteni papiri i folije moraju biti čiste površine, jer slojevi prašine i masnoće mogu smanjiti uspješnost osvjetljavanja. Ispisani toner treba činiti jednolik taman crni sloj nepropustan za svjetlo, pa je u slučaju pukotina u sloju ili slabijeg ispisa masku potrebno popraviti permanentnim markerom, nanoseći ga na onu stranu gdje se otisnuo toner, kako sloj markera na krivoj strani folije ne bi uzrokovao dodatan ogib svjetlosti [1].

Za razliku od prethodne metode, u kojoj se sloj fotoosjetljivog laka (engl. *photoresist*) morao ukloniti, u ovome je slučaju on krucijalan sastojak postupka. Zato ga je, ukoliko nije unaprijed industrijski nanesen na površinu pločice, potrebno nanijeti ručno – primjerice jednoliko naprskati na hladnu, suhu i prethodno očišćenu pločicu u uvjetima što manje količine prašine i svjetla te ga potom ostaviti da se osuši, za što je potrebno 10 – 15 min na temperaturi od 70°C ili 24 h na sobnoj temperaturi [1]. Ukoliko pločica već posjeduje sloj fotolaka, zaštitu je na njemu potrebno odlijepiti tek neposredno prije namještanja same maske na površinu pločice. Talog ljepljivosti koji eventualno zaostane na rubovima mora se skinuti etanolom ili acetonom – pod uvjetom da su rubovi dovoljno daleko od prostora na kojima će biti potrebno sačuvati bakar nakon jetkanja.

U postupku pripreme za osvjetljavanje, maska mora dobro nalijegati na pločicu, i to stranom na kojoj se nalazi toner kako se dodatnim ogibom svjetlosti ne bi narušila oštrina vodljivih likova [1], a cjelokupna se konstrukcija učvršćuje ljepljivom trakom po nekorištenim rubovima pločice. U slučaju dvoslojnih pločica, maske se postavljaju i fiksiraju s obje strane, a osvjetljava se jedna po jedna.

Postupkom osvjetljavanja – ultraljubičastom svjetiljkom u trajanju 40 – 50 s ili grafoskopom u trajanju 5 – 10 min [1] – svjetlo lampe uništava fotolak na mjestima na kojima nije zaštićen tonerom maske, dok fotolak na mjestima neposredno ispod tonera ostaje sačuvan. Na taj način nanosena maska tiskanih veza ponovno služi kao pozitiv film. Što su pločice starije, potrebno ih je dulje osvjetljivati, pa je optimalno vrijeme osvjetljavanja dobro preispitati probnim osvjetljavanjem bakrene

pločice prekrivene pomoćnom maskom, čiji toner u potpunosti prekriva površinu bakra, kako bi se postepenim pomakom maske nad pločicom u nekoliko vremenskih koraka po boji osvijetljenog bakra odredili vremenski parametri. Pri korištenju ultraljubičastog svjetla (slika 2.16.), zbog njegove se štetnosti za oči poklopac osvijetlivača obavezno mora u potpunosti spustiti i poklopiti pločicu prije samog početka osvijetljavanja.



Slika 2.16. Korištena ultraljubičasta laboratorijska svjetiljka, [1].

Rezultat ispravnog osvijetljavanja jedne ili obje strane predstavlja žućkasti otisak tonera na narančastoj bakrenoj površini. Taj će se otisak dodatno razviti u natrijevoj lužini (7% otopina NaOH na sobnoj temperaturi [1]), koja će u narednih 30 s isprati ostatke fotolaka s mjesta gdje nanoseno svjetlo to nije uspjelo. Tim razvijanjem u konačnici se pod svim kutovima mora postići jasan kontrast između sačuvanog fotolaka u obliku nacrtanog tiskanih veza s jedne, te okolnog bakra s uklonjenim slojem fotolaka s druge strane. Kao i dosad, pri rukovanju s kiselinama i lužinama potrebno je poštovati propisane mjere opreza [7]. Pločicu je potom potrebno izvaditi iz lužine te ju, zajedno s posudom, isprati hladnom vodom [1].

Za nanošenje nacrtanog vodljivih likova slijedi proces jetkanja, za koji se ovoga puta koristi uređaj za strujanje s pjenilicom (slika 2.17.) kako bi se, slično kao ranije spužvom, mjehurićima stvorila visoka koncentracija ferikloridne kiseline [1]. Reakciju je po potrebi moguće usmjeriti rotacijom pločice položene na stalak.



Slika 2.17. Korišteni laboratorijski uređaj za jetkanje ferikloridom s pjenilicom, [1].

Ocijeđenu pločicu ispiru se potom hladnom vodom kako bi se uklonio zaostali feriklorid i spriječilo daljnje neželjeno nagrizanje. Ukoliko se radi o dvoslojnoj pločici, prije sljedećeg koraka pločicu je potrebno preokrenuti te ponoviti proces i za drugu stranu [1].

Uz uklanjanje zaostalog fotolaka, bilo mehanički, bilo otapalima (acetonom) ili ponovnim osvjetljavanjem bez maske i razvijanjem u lužini, te obrezivanje rubova za fino postizanje konačnih dimenzija [1], potrebno je kako vizualno tako i električki pomoću ommetra pregledati kvalitetu spojeva ostvarenih jetkanjem, a višak je bakra kao i u prethodnoj metodi moguće ukloniti grubljim brusnim papirom ili vrhom odvijača i pincete.

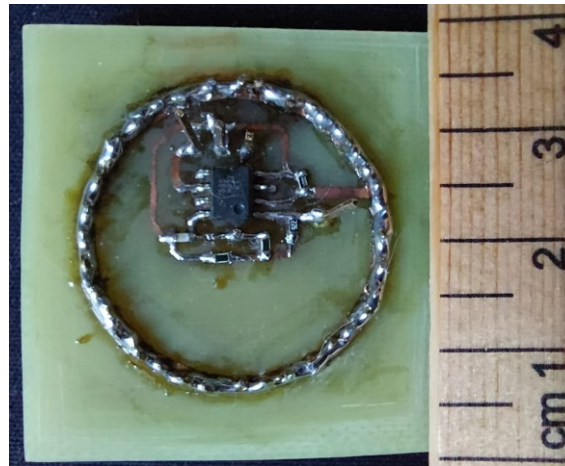
Posljednji koraci predstavljaju bušenje (slika 2.18.), potom turpijanje rubova i bočnih strana pločice, čišćenje, lemljenje te naposljetku električki pregled lemnih spojišta i završno čišćenje acetonom i etanolom [1].



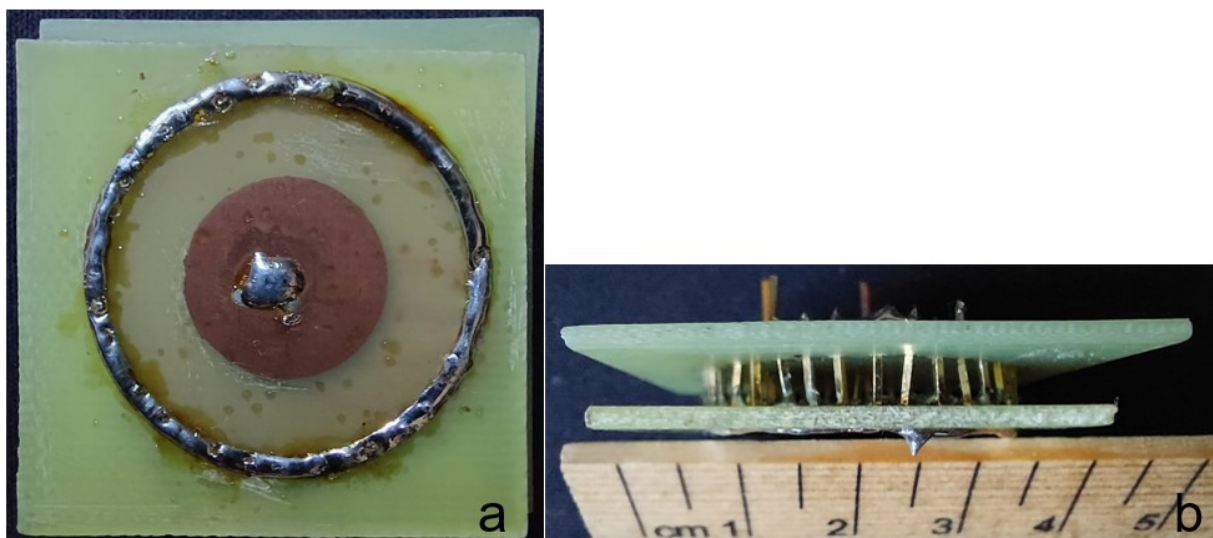
Slika 2.18. Korištena laboratorijska bušilica na stalku, [1].

2.4. Usporedba metoda

Elektronički uređaj dobiven prethodnim metodama prikazan je na slikama 2.19. i 2.20.

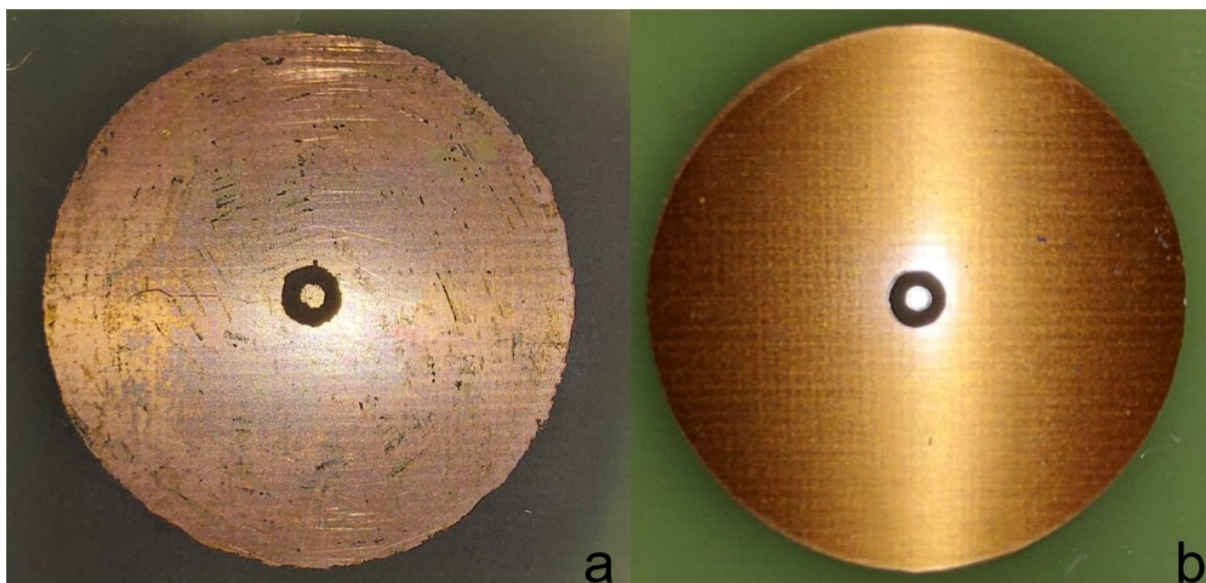


Slika 2.19. Gornja, komponentna strana realiziranog elektroničkog uređaja.



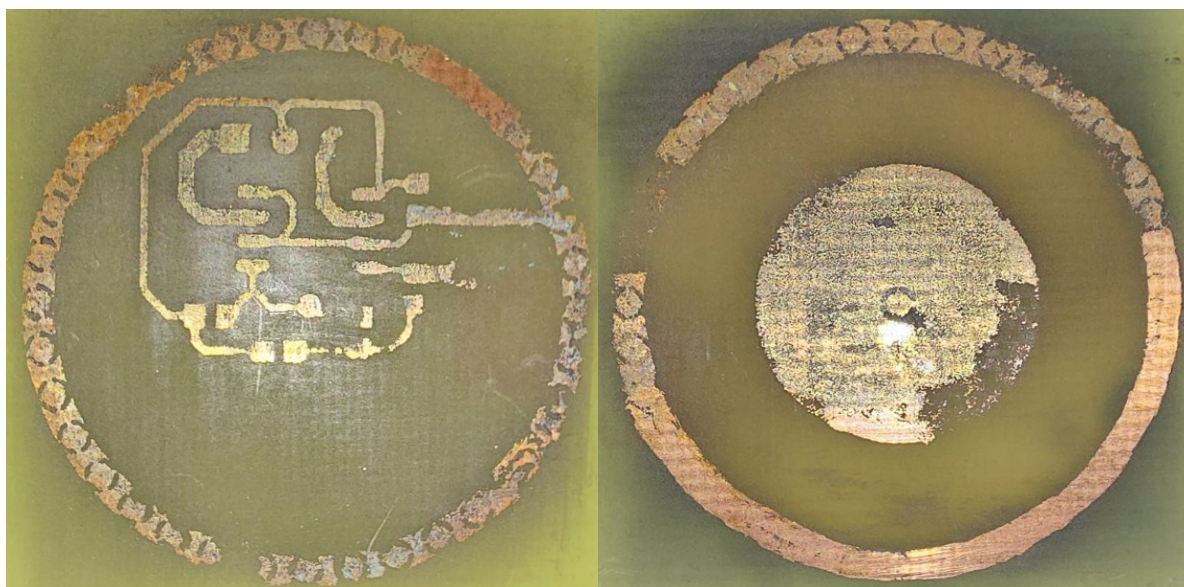
Slika 2.20. Donja, lezna strana (a) te bočni presjek elektroničkog uređaja s prospojima (b).

Metoda prijenosa tonera toplinom već je zbog same činjenice da se provodi u kućnim uvjetima uz široko dostupne alate znatno osjetljivija na kvalitetu opreme, materijala i atmosferske prilike. Postotak njezine uspješnosti stoga u pravilu može biti podosta manji, naročito uz manje iskustva u izradi (slika 2.21.). Toner se najbolje otisnuo sa sjajnog papira, koji je predstavljao i mnogo manji problem pri kasnijem odljepljivanju s površine pločice. Obični papir je pak bilo znatno lakše fiksirati na površinu pločice prilikom prijenosa toplinom jer bolje prijanja uz bakar i manje je sklon klizanju.



Slika 2.21. Usporedba prosječnih rezultata dviju metoda, metode toner transfera (a) i fotopostupka (b), na primjeru homogene bakrene plohe.

Osim nedovoljno dobro otisnutog tonera, kada je proceduru trebalo ponoviti uz korekciju temperature glačala i vremena zagrijavanja, temeljni izazovi i problemi vezani su za jetkanje: predugo jetkanje uzrokuje podgrizanje vodljivih likova, a loše otisnut toner ili pak previše slijepljen papir maske nehomogenost bakrene plohe (slika 2.22.).



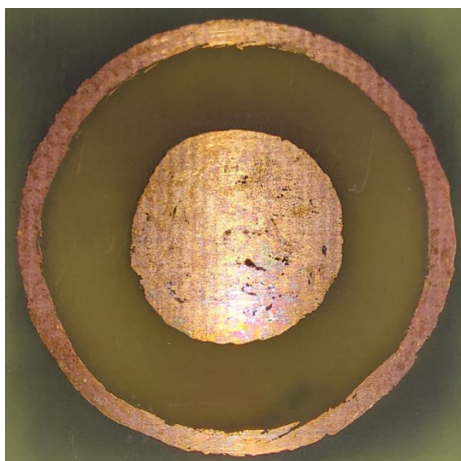
Slika 2.22. Problem podgrizanja vodljivih likova uslijed predugog jetkanja te neravnomjerno izjetkanog bakra uslijed pretjerane slijepljenosti i neispravno odlijepljenog papira maske.

Rad u neodgovarajućim atmosferskim uvjetima dvorišta i vrta (točkasti ostatci bakra nakon jetkanja uslijed nanosa peludi, slika 2.23.) potvrdili su važnost izrade u čistoj

zatvorenoj prostoriji, a neravnine vodljivih likova kao posljedica nedovoljno preciznih popravaka ispune markerom prikazane su na slici 2.24.



Slika 2.23. Točkasti ostatci neizjetkanog bakra uslijed nanosa peludi.



Slika 2.24. Neravnine u bakru uslijed nedovoljno preciznih popravaka ispune markerom.

3. Rezultati i rasprava

Zahvaljujući sofisticiranom postupku i specijaliziranim materijalima, profesionalna izrada svakako prednjači po pitanju estetike, lakoće lemljenja te mogućnosti kako mehaničke i kemijske zaštite, tako i minijaturizacije visokom gustoćom spojeva u malenom volumenu. Ipak, za potrebe ispitivanja uređaja u razvoju, trajnost u komercijalnoj upotrebi i vizualna prijemljivost nisu primarni kriteriji. Da bi se odgovorilo na pitanje koliko se u funkcionalnom smislu metode kućne izrade mogu nositi s kvalitetom profesionalne izrade, provedena je usporedba robusnosti.

Napajanje realiziranog uređaja i akvizicija podataka ostvareni su baterijski napajanim razvojnim sustavom PSoC 5LP 059 (engl. *Programmable System-on-Chip*) tvrtke Cypress Semiconductor [10] (slika 3.1.). Njegovo analogno i digitalno sučelje konfigurirano je u razvojnom okruženju PSoC Creator [11].

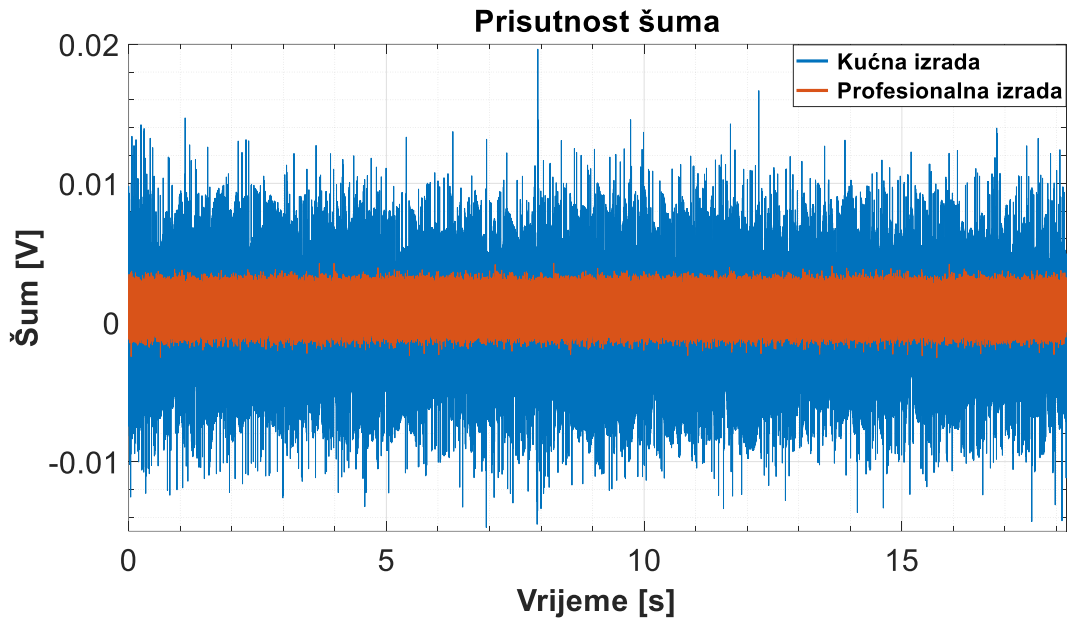


Slika 3.1. Razvojni sustav PSoC 5LP 059 korišten za napajanje i akviziciju izmjerenih signala, [10].

Snimljeni signal, uzorkovan frekvencijom od 1 kHz, serijskom se vezom preko USB-priključka (engl. *universal serial bus*) šalje na prienosno računalo, gdje se izmjerene valni oblik signala s izlaza uređaja prikazuje u SerialPlot programu [12] za grafički prikaz signala u stvarnom vremenu. Snimljeni signali spremaju se potom u tekstualnu datoteku, čime je omogućena daljnja analiza i prikaz spektra u programskom paketu Matlab [13]. Kako bi se uklonila istosmjerna komponenta pogreške, prije prikaza signalu su u Matlab aplikaciji Signal Analyzer visokopropusnim filtriranjem uklonjene komponente frekvencije niže od 5 Hz.

Za početak, provedeno je mjerenje prisutnosti šuma u uvjetima bez mjerenog signala – usporedba zašumljenosti izlaza uređaja u vremenskoj domeni prikazana je na slici 3.2. Nerafiniranost materijala dostupnih u kućanstvu, manja razlučivost metoda izrade prototipa u kućnim uvjetima te veća osjetljivost na elektromagnetske smetnje uslijed slabijih mogućnosti elektromagnetske zaštite očituju se u šumu čija je amplituda u prosjeku četiri puta veća u slučaju uređaja nastalog u kućnoj izradi. K

tome, u šumu njegovog izlaza prisutne su veće oscilacije, a brojniji su i naponi značajnijeg odstupanja od srednje vrijednosti.



Slika 3.2. Usporedba zašumljenosti izlaznog signala uređaja realiziranog u kućnim uvjetima i profesionalnim postupkom.

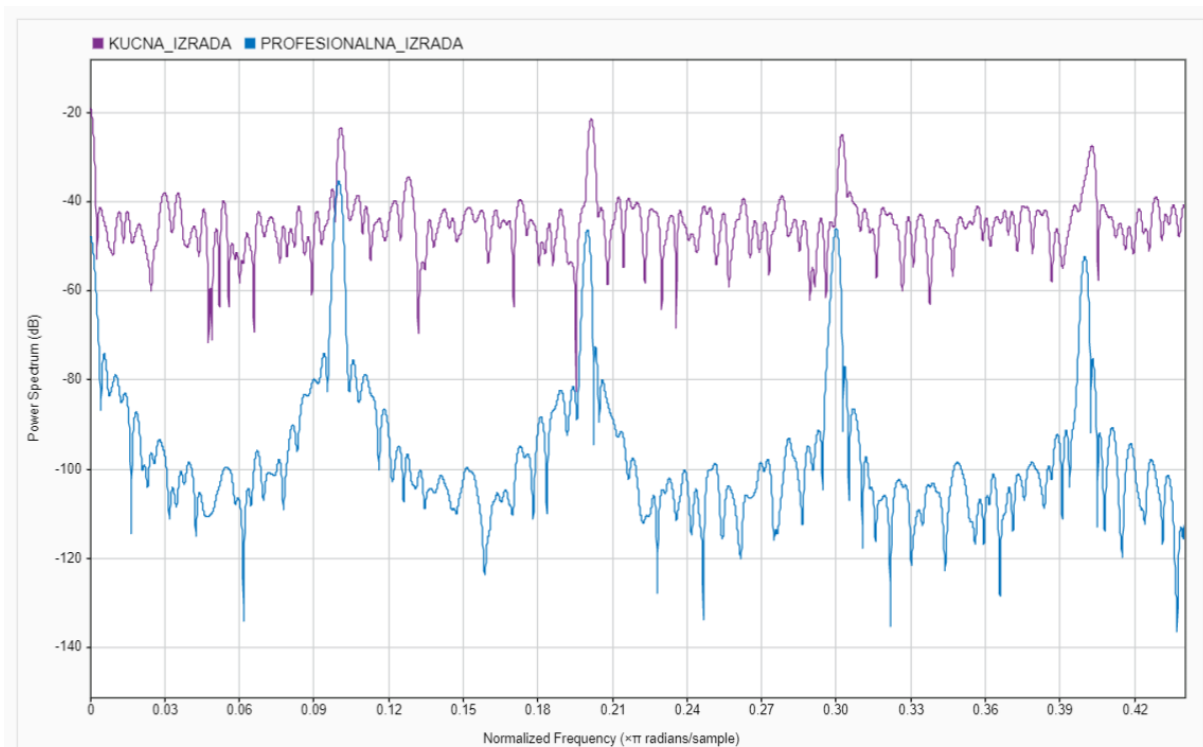
Prikaz spektralne gustoće snage snimljenih šumova u frekvencijskoj domeni podrobnije karakterizira njihovo podrijetlo. Spektralnu gustoću snage (engl. *spectral power density* ili *power spectrum*) S_x slučajnog procesa X s funkcijom autokorelacije R_x u vremenskoj domeni povezuje kontinuirana Fourierova transformacija (engl. *Continuous Time Fourier Transform*, CTFT) preko Wiener-Khinchin relacije (3), gdje je A operator vremenske srednje vrijednosti [14], a iznos spektralne gustoće snage u decibelima (dB) za slučaj razmatranja spektralnih svojstava šuma dobiva se logaritmiranjem (4) [15]:

$$S_x(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} A[R_x(t, t + \tau)]e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

$$S_x[\text{dB}] = 10\log_{10}S_x(j\omega) \quad (4)$$

Usporedba spektralnih gustoća snaga šumova u dB dana je na slici 3.3. Frekvencijska os izražena je u mjernoj jedinici π rad/uzorak skaliranoj na frekvenciju uzorkovanja f_s od 1 kHz. Tako izraženu frekvenciju s frekvencijom u Hz povezuje (5):

$$f \left[\frac{\pi \text{ rad}}{\text{uzorak}} \right] = \frac{2 \cdot f[\text{Hz}]}{f_s} \quad (5)$$



Slika 3.3. Spektralne gustoće snage snimljenih šumova u decibelima na području 0 – 225 Hz za primjer uređaja izrađenog u kućnim uvjetima i profesionalnim postupkom.

Analizirajući pojave u frekvencijskoj domeni primjećuje se da se srednja vrijednost ovojnice spektralne gustoće snage šuma snimljenog profesionalno izrađenim uređajem nalazi na oko 40 dB ispod spektralne gustoće snage šuma snimljenog uređajem izrađenim u kućnim uvjetima. K tome, ovojnica spektralne gustoće snage šuma zabilježenog u profesionalno izrađenog uređaja pokazuje tendenciju spuštanja s porastom frekvencija, što upućuje na povećanje imunosti na smetnje više frekvencije. Nadalje, uvidom u pojedine frekvencijske komponente vidljiv je dominantan utjecaj smetnje elektroenergetske mreže od 50 Hz i njezinih harmonika na 100 Hz, 150 Hz i 200 Hz, sveprisutan unatoč korištenju baterijskog napajanja. Neparni harmonici nastali su kao rezultat periodičnog izobličenja, vidljivog u raspisu Fourierovog reda (6):

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (6)$$

gdje je a_0 istosmjerna komponenta, a_1 i b_1 koeficijenti niza, n broj harmonika, ω kružna frekvencija iznosa $2\pi f$, a f osnovna frekvencija (50 Hz). U slučaju idealne sinusne funkcije, njezinom neparnosti u Fourierovom redu opstaju samo harmonici na neparnim višekratnicima osnovne frekvencije. Međutim, uslijed realne vremenske promjenjivosti izmjeničnog napona napajanja, negativna i pozitivna poluperioda

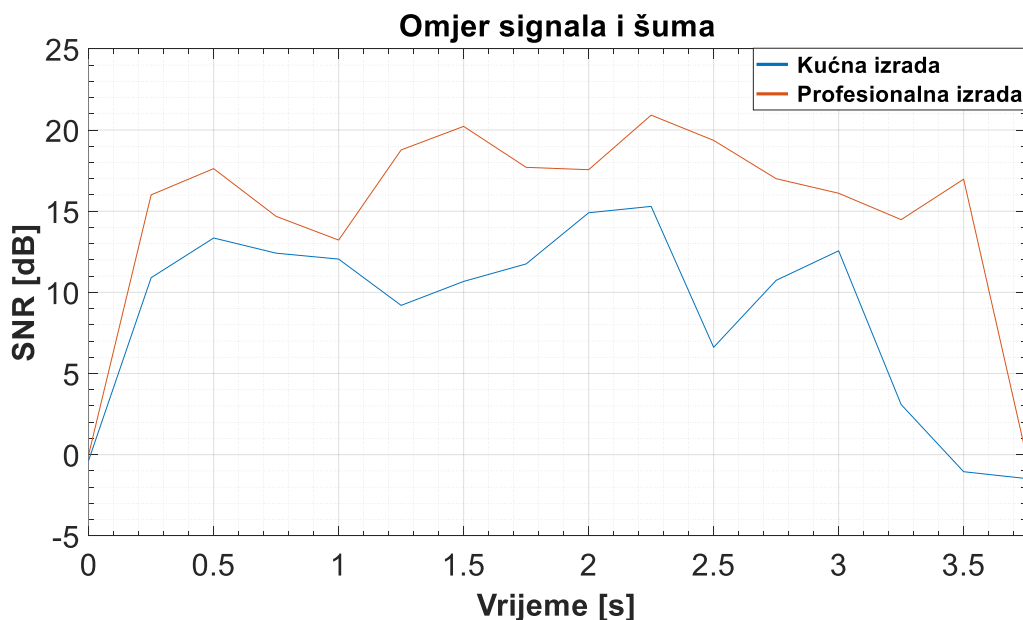
nemaju identični valni oblik, zbog čega su u spektralnoj karakteristici prisutni i parni harmonici na frekvencijama od 100 Hz i 200 Hz [16]. Skokovi u spektru na mjestima harmonika elektroenergetske mreže naizgled su znatniji u slučaju uređaja izrađenog profesionalnim postupkom; zapravo, s obzirom na to da je riječ o logaritamskoj skali, skokovi u linearnom mjerilu većeg su iznosa u slučaju uređaja izrađenog u kućnim uvjetima.

Ostale smetnje kao rezultat parazitnih kapacitivnih sprega uređaja i okoline mogu se smanjiti metodama oklapanja [1] te korištenjem kraćeg i kvalitetnijeg ožičenja, poput oklopljenih mikrofonskih kabela.

Konačno, dovođenjem korisnog signala u trajanju od 4 s provedena je analiza omjera signala s i šuma n (engl. *signal-to-noise ratio*, SNR) na odsječcima od 0,25 s prema (7):

$$SNR \text{ [dB]} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n s_i^2}{\sum_{i=1}^n n_i^2} \quad (7)$$

gdje je n broj uzoraka [17]. Rezultat prikazan na slici 3.4. ponovno ukazuje na manji utjecaj šuma u slučaju profesionalno proizvedenog uređaja: njime dobiveni SNR većeg je iznosa i doživljava manje promjene tijekom vremena trajanja signala.



Slika 3.4. Usporedba odnosa signala i šuma u slučaju uređaja izrađenog u kućnim uvjetima i profesionalnim postupkom.

4. Zaključak

Unatoč korištenju alata iz svakodnevnice i materijala slabije kvalitete, svojom pristupačnošću i dostupnošću predstavljene metode izrade prototipa pariraju profesionalnoj izvedbi u dovoljnoj mjeri za potrebe istraživanja i razvoja, čak i u slučaju uređaja dimenzija reda veličine nekoliko desetaka milimetara. Opisani postupci pokazali su se naročito praktičnima u otežanim uvjetima COVID-19 pandemije i udaljenom radu od kuće. Korištenjem kvalitetnije opreme i boljom kontrolom proizvodnih uvjeta moguće je dodatno smanjiti utjecaj smetnji proizašlih iz uvjeta kućne izrade.

Zahvala

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Mariju Cifreku, i neposrednom voditelju Antoniju Stanešiću, mag. ing., na pomoći, smjernicama i savjetima.

Literatura

- [1] M. Cifrek, H. Džapo, Ž. Lučev Vasić, *Projektiranje elektroničkih sustava*, predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska, 2022.
- [2] H. Shamkhalichenar, C. J. Bueche, Jin. Choi, „Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms“, *Biosensors*, vol. 10, no. 159, 2020.
- [3] A. Vardya, R. Tarzwell, D. Beaulieu, *Fundamentals of Printed Circuit Board Technologies*, DB Publishing, American Standard Circuit, 2020.
- [4] E. Bogatin, *Practical Guide to Prototype Breadboard and PCB Design*, Artech House Publishers, 2021.
- [5] Altium®, Altium Designer, [Online] <https://www.altium.com/altium-designer> (pristup 5. 5. 2022.)
- [6] C. Easley, Christopher, R. Benninger, J. Shaver, W. Head, D. Piston, „Rapid and inexpensive fabrication of polymeric microfluidic devices via toner transfer masking“, *Lab on a chip*, vol. 9, pp. 1119–1127, 2009.
- [7] Zavod za unapređivanje zaštite na radu, Rukovanje opasnim kemikalijama, [Online] <https://uznr.mrms.hr/rukovanje-opasnim-kemikalijama/> (pristup 6. 5. 2022.)
- [8] e-radionica.com, Kockica od leda ili kako lemiti, [Online] <https://e-radionica.com/hr/blog/2017/01/28/kockica-od-leda-ili-kako-lemiti/> (pristup 5. 5. 2022.)
- [9] PCBWay, PCBWay calculator, [Online] <https://www.pcbway.com/orderonline.aspx> (pristup 18. 5. 2022.)
- [10] CY8CKIT-059 PSoC® 5LP Prototyping Kit Guide, 001-96498 Rev. *G, [Online] <https://www.cypress.com/file/157971> (pristup 5. 5. 2022.)
- [11] Infineon, PSocTM Creator, [Online] https://www.infineon.com/cms/en/design-support/tools/sdk/psoc-software/psoc-creator/?utm_source=cypress&utm_medium=referral&utm_campaign=202110_globe_en_all_integration-product_families (pristup 5. 5. 2022.)
- [12] Hackaday, SerialPlot – Realtime Plotting Software, [Online] <https://hackaday.io/project/5334-serialplot-realtime-plotting-software> (pristup 5. 5. 2022.)
- [13] MathWorks®, Matlab, [Online] <https://ch.mathworks.com/products/matlab.html> (pristup 5. 5. 2022.)
- [14] H. P. Hsu, *Schaum's outline of theory and problems of probability, random variables, and random processes*, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [15] ITU Telecommunication Development Sector, „Use of the decibel and the neper in telecommunications“, *The blue book telecommunication policies for the Americas / BDT, CITELE*, International Telecommunication Union, Geneva, 1st ed., 1996.

- [16] T. Primorac, „Metode za ublažavanje viših harmonika u niskonaponskoj mreži“, diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska, 2021.
- [17] MathWorks®, snr function, [Online]
<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/snr.html> (pristup 14. 6. 2022.)

Naslov, sažetak i ključne riječi

Luka Klaić

Mogućnosti razvoja elektroničkih uređaja u otežanim uvjetima pandemije

Na primjeru razvijenog elektroničkog uređaja ispitane su mogućnosti primjene svakodnevnih široko dostupnih alata i materijala u izradi elektroničkih prototipa. Predstavljene su dvije metode – metoda prijenosa topline i metoda fotopostupka. U svrhu usporedbe njihove kvalitete s kvalitetom profesionalnog postupka izrade, provedena je analiza osjetljivosti na smetnje. Uvidom u utjecaj prisutnog šuma potvrđena je pojačana razina smetnji kao posljedica izrade u uvjetima koji nisu industrijski kontrolirani. Unatoč tome, odnosi signala i šuma opravdali su mogućnost korištenja takvih metoda u svrhu razvoja i istraživanja, a njihov značaj i praktičnost naročito dolaze do izražaja u otežanim uvjetima pandemije.

Ključne riječi: tiskana pločica; izazovi pandemije; termo transfer; fotopostupak; analiza šuma

Title, summary and keywords

Luka Klaić

Electronic devices development possibilities under difficult pandemic conditions

The example of a developed electronic device is used to explore the possibilities of using everyday, widely used tools and materials in the production of electronic prototypes. Two processes are described – thermal transfer process and photolithography. A noise sensitivity analysis is performed to compare their quality with that of professional technology. When investigating the influence of external conditions, a greater noise was found in the home-made devices. Nevertheless, the signal-to-noise ratio provides a plausible basis for the application of such methods with respect to research and development. Furthermore, their importance and practicality under difficult pandemic conditions become clear.

Keywords: printed circuit board; pandemic challenges; thermal transfer; photolithography; noise analysis