

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Rok Vrhovec

Sistem za testiranje in predstavitev slikovnega koprocesorja

DIPLOMSKO DELO
VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

Ljubljana, 2012

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Rok Vrhovec

Sistem za testiranje in predstavitev slikovnega koprocesorja

DIPLOMSKO DELO
VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

Mentor: prof. dr. Branko Šter

Ljubljana, 2012

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje in izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.



Št. naloge: 00186/2011

Datum: 05.12.2011

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **ROK VRHOVEC**

Naslov: **SISTEM ZA TESTIRANJE IN PREDSTAVITEV SLIKOVNEGA
KOPROCESORJA**

**SYSTEM FOR TESTING AND PRESENTATION OF IMAGE
COPROCESSOR**

Vrsta naloge: Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija prve stopnje

Tematika naloge:

Opišite sistem, ki ste ga razvili za namen testiranja in predstavitve slikovnega koprocesorja. Le-ta je namenjen izboljšavi slike, zajete s slikovnim senzorjem, in razbremenitvi procesorja v prenosnem telefonu. Opišite zasnovo, razvoj in delovanje testnega sistema, ki je implementiran na tiskanini, in omogoča testiranje koprocesorja z različnimi senzori in pod različnimi pogoji. Opišite tudi meritve električnih veličin.

Mentor:

prof. dr. Branko Šter

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic



IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisan Rok Vrhovec, z vpisno številko **63970298** sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Sistem za testiranje in predstavitev slikovnega koprocesorja

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko nalogo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Branka Štera
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki „Dela FRI“.

V Ljubljani , dne 21.1.2012

Podpis avtorja:

Zahvala

Zahvaljujem se svojemu mentorju, prof. dr. Branku Šteru za potrpljenje in pomoč pri diplomskem delu. Svoji dragi in moji mami za sitnarjenje in pomoč pri dokončanju diplomskega dela.

Kazalo

| | |
|---|-----------|
| <i>1 Uvod</i> | <i>1</i> |
| <i>2 Predstavitev sistema</i> | <i>2</i> |
| <i>3 Uporaba sistema</i> | <i>4</i> |
| 3.1 Tiskana vezja, uporabljena v sistemu..... | 4 |
| <i>4 Opis glavnih integriranih vezij</i> | <i>9</i> |
| 4.1 Digitalni slikovni senzor..... | 9 |
| 4.2 Slikovni koprocesor..... | 9 |
| <i>5 Načrtovanje sistema</i> | <i>12</i> |
| 5.1 Standardi in koraki do delujočega sistema..... | 12 |
| 5.2 Arhitektura sistema..... | 12 |
| 5.3 Opis delovnega okolja za načrtovanje..... | 15 |
| 5.4 Shema tiskanine ICP | 16 |
| 5.4.1 Shema napajanja koprocesorja..... | 16 |
| 5.4.2 Priključki s strani gostitelja, prevajanje napetosti signalov in generiranje ure..... | 17 |
| 5.4.3 Priključki proti senzorju..... | 18 |
| 5.4.4 Shema koprocesorja..... | 19 |
| <i>6 Tiskano vezje</i> | <i>21</i> |
| 6.1 Definiranje slojev..... | 21 |
| 6.2 Diferencialni pari na tiskanem vezju..... | 21 |
| 6.3 Točke na tiskanem vezju namenjene meritvam..... | 22 |
| 6.4 Ostali signali..... | 23 |
| 6.5 Izdelava tiskanin..... | 23 |
| 6.5.1 Preverjanje tiskanine..... | 24 |
| 6.6 Priprava sistema za delovanje..... | 24 |
| 6.7 Prvo delovanje..... | 24 |
| <i>7 Meritve</i> | <i>26</i> |
| <i>8 Zaključek</i> | <i>29</i> |

Slike

| | |
|---|----|
| Slika 1: Sistem, njegove komponente in možnosti povezovanja. | 2 |
| Slika 2: Sistem je priključen na osebni računalnik v delujočem stanju. | 3 |
| Slika 3: Tiskanina Demo2x. Leva slika: tiskanina z zgornje strani. Desna slika: tiskanina s spodnje strani. | 5 |
| Slika 4: Zgornja stran tiskanine ICP, v držalu (ang. socket) je čip velikosti 6,5 x 6,5mm..... | 6 |
| Slika 5: Zgornja stran tiskanine ICP za čip velikosti 8 x 8mm..... | 6 |
| Slika 6: Senzor pritrjen na tiskano vezje namenjen testiranju. Senzor je, v sredini nosilca za lečo, označen z U11. Na tiskanini so še priključki za testiranje in stikala za nastavitve..... | 7 |
| Slika 7: Modul z slikovnim senzorjem, namenjen uporabi v prenosnem telefonu. | 8 |
| Slika 8: Prikaz delovanja jedra senzorja od matrike za zajem slike (ang. Active-Pixel sensor Array) do izhoda (paralelni vmesnik: 8, 10 ali 12 bitni). | 9 |
| Slika 9: Blok diagram ko-procesorja..... | 10 |
| Slika 10: Mehanska risba ICP-ja v ohišju velikosti 6.5 x 6.5mm. Zaradi majhnosti sta načrtovanje in izdelava tiskanin posebej zahtevna..... | 11 |
| Slika 11: Blok shema senzorske tiskanine. | 13 |
| Slika 12: Blok shema tiskanine s koprocesorjem. | 14 |
| Slika 13: Blok shema tiskanine Demo2x, ki je gostitelj za tiskanino ICP..... | 14 |
| Slika 14: Allegro Design Entry CIS, okolje za izris shem..... | 15 |
| Slika 15: Program Allegro in njegovo delovno okolje. | 16 |
| Slika 16: Shema napajanja ICP-ja. | 17 |
| Slika 17: Shema priključkov na ICP tiskanini, proti gostitelju..... | 18 |
| Slika 18: Priključki do senzorja. | 19 |
| Slika 19: Shema koprocesorja in pasivni komponente. | 20 |
| Slika 20: Prikaz slojev. Modro obarvani so sloji iz bakra, svetli so sloji iz FR4 (posebna steklena vlakna)..... | 21 |
| Slika 21: Prikaz merilnih točk na tiskanini. Rdeče obarvane so merilne točke za posamezna napajanja. | 23 |
| Slika 22: Program ICPDemo na osebni računalniku..... | 25 |
| Slika 23: Delujoč sistem na katerega je povezan merilni instrument na eni od merilnih točk. | 26 |

Tabele

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Meritve tokov na posameznih napajanjih in v različnih načinih delovanja koprocesorja. | 27 |
|--|----|

Povzetek

V diplomskem delu sem predstavil sistem, ki ga uporabljamo v podjetju v katerem delam, kot testno in predstavitveno platformo za naše produkte. Opisal sem, zakaj ga uporabljamo in njegove glavne dele. Za vsako tiskanino posebej sem navedel, kakšna je njena funkcija in kateri so elementi, uporabljeni na njej. Glavni integrirani vezji (slikovni senzor in slikovni koprocesor) sta, kot glavna predstavnika produktov našega podjetja, opisani podrobneje.

Nadaljeval sem s podrobno razlago nastanka ene od tiskanin v sistemu, ki je namenjena slikovnemu koprocesorju, katerega razvoj se izvaja v Sloveniji (podjetje je globalno). Opisal sem, kako je tiskanina nastajala, vse korake, ki so potrebni za polno funkcionalnost tiskanin in sistema, ter probleme, ki sem jih moral pri tem rešiti. S shemami sem razložil, kako in zakaj smo uporabili določena integrirana vezja. Podrobneje sem opisal rešitve, ki jih zahtevajo določeni standardi in jih je treba upoštevati pri načrtovanju tiskanine. Ena od funkcij sistema je tudi možnost izvajanja meritev električnih veličin, ki sem jih tudi sam izvajal in opisal ob koncu diplomske naloge.

Ključne besede: testiranje, shema, tiskana vezja, slikovni senzor, slikovni koprocesor, meritve.

Abstract

The system used as a testing and presentation platform for the products of the company in which the author is employed is presented in the diploma thesis as well as the reason for its use and a description of its main parts. The function and elements used on it are described for each printed circuit board separately. Key integrated circuits (image sensor and image coprocessor) which are the main products of the company are described in more detail.

A detailed explanation of the creation of one of the system's printed circuit boards for the image coprocessor, the latter of which is developed here in Slovenia, is given in continuation. The thesis also describes the origins of the board, the steps required for the full functioning of the board and system and problems encountered which required resolution. Schemes were used to explain how and why the various integrated circuits were used as well as standards that had to be observed when designing the board given. One of the system's functions, which includes the possibility of implementing measurements of certain electrical quantities is presented at the end of the thesis.

Key words: testing, scheme, printed circuit board, image sensor, image coprocessor, measurements.

1 Uvod

V diplomski nalogi sem opisal sistem za testiranje slikovnega koprocesorja, ki ga je razvilo podjetje, v katerem delam. Koprocesor je namenjen izboljšavi slike, ki jo zajemamo s slikovnim senzorjem. Namenjen je predvsem uporabi v prenosnih telefonih, skupaj s slikovnim senzorjem. Zato ima koprocesor veliko funkcij, ki jih je treba testirati. Tako smo se odločili za izdelavo sistema, ki nam omogoča testiranje koprocesorja z različnimi senzorji in pod različnimi pogoji. Del testiranja so tudi meritve električnih veličin.

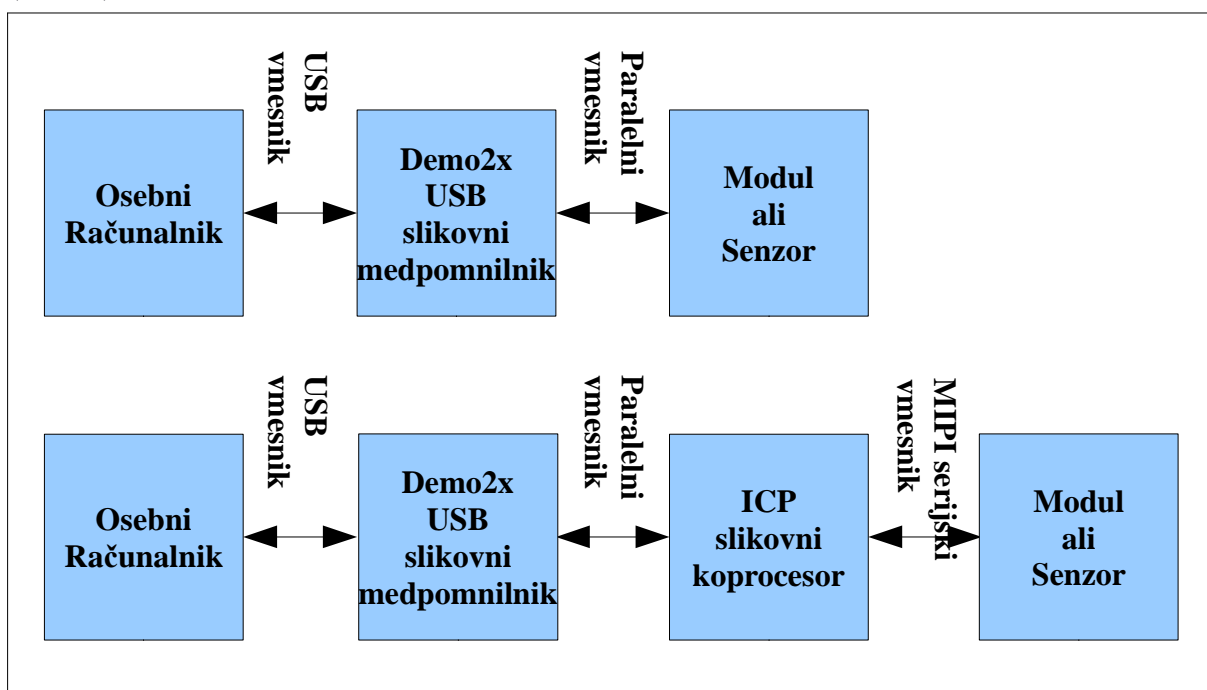
Celoten sistem sestavljajo tri tiskanine. Dve smo v podjetju že uporabljali, ena pa je moje delo. Zaradi tega je imela tretja tiskanina s koprocesorjem kar nekaj omejitev, ki sta jih določali že obstoječi tiskanini. Sistem, ki je prikazan v tej nalogi, je bil razvit predvsem za uporabo znotraj podjetja za potrebe testiranja. Pri celotnem sistemu je zelo pomembna fleksibilnost, saj se je del sistema že uporabljal in je bilo treba del s koprocesorjem integrirati v že obstoječe tiskanine.

Funkcije, ki jih podpira opisani koprocesor, so ponavadi rešene programsko. Običajno se izvajajo na glavnem procesorju v prenosnem telefonu. To zaseda procesorski čas in veliko resursov telefona, kar pomeni počasnejše delovanje funkcij. Rešitev je v slikovnem koprocesorju, ki se ga preprosto priključi na glavni procesor v telefonu. Glavni namen je razbremeniti glavni procesor in s tem pospešiti delovanje prenosnega telefona.

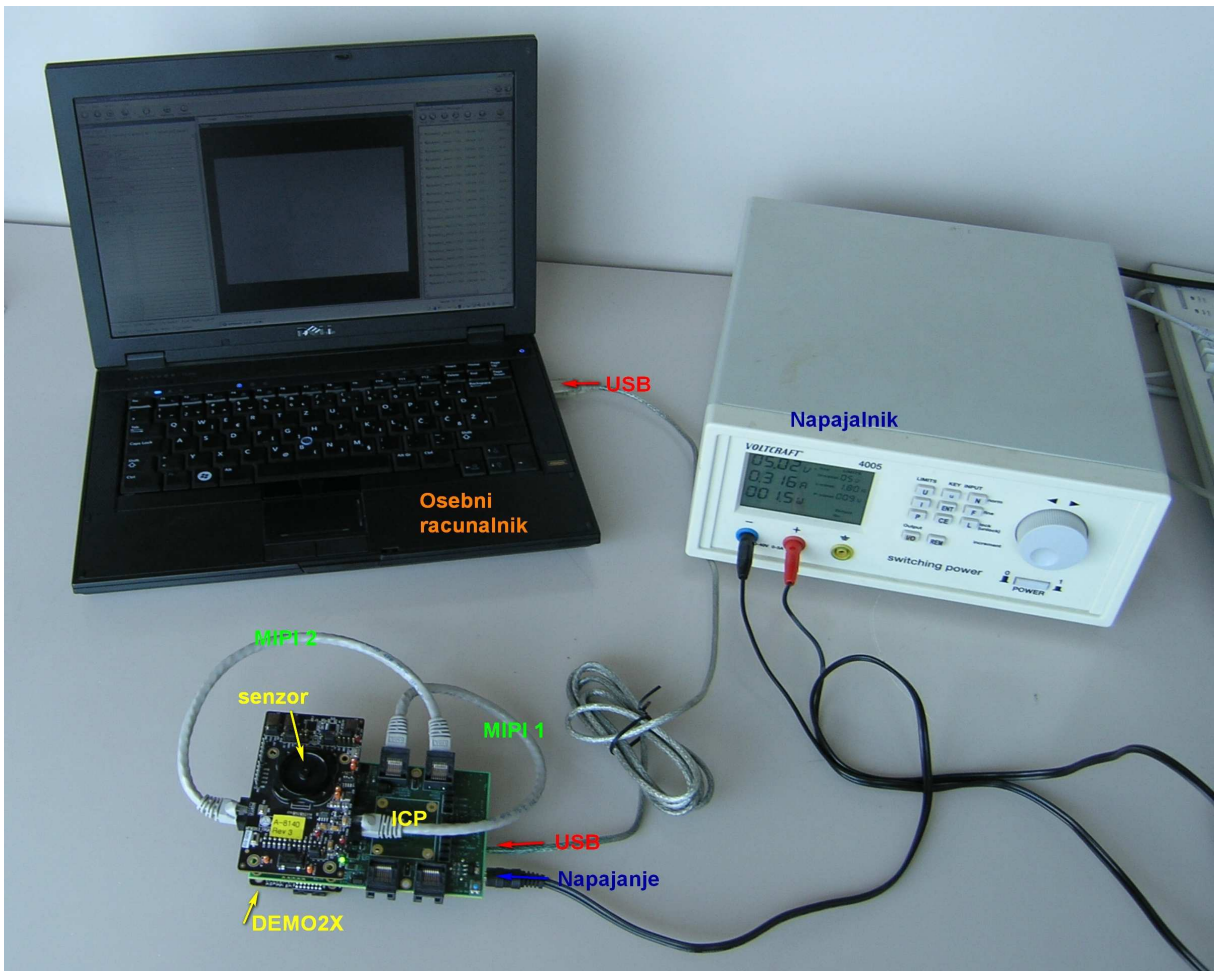
2 Predstavitev sistema

Glavni produkt podjetja so slikovni senzorji. Paleti senzorjev pa smo na novo dodali še koprocesor, ki naj bi sliko, dobljeno iz slikovnega senzorja, izboljšal in popravil ter aktivno popravljaj nastavitve senzorja. Senzorji in koprocesor se uporabljajo predvsem v prenosnih telefonih, uporabni pa so tudi v druge namene, npr. v industriji, za igralne konzole, v medicini itd. Za testne namene je integrirano vezje pritrjeno neposredno na tiskanino, končni produkt pa je senzor v modulu (slika 6).

Celoten sistem je skupek različnih tiskanin iz različnih delov, ki jih načrtujejo in izdelujejo v različnih oddelkih podjetja. Del celotnega sistema je tudi osebni računalnik s programsko opremo. Vezni del je tiskanina Demo2x, ki je z osebnim računalnikom povezana preko vmesnika USB in paralelnega vmesnika MIPI s senzorjem (slika 1, zgoraj). Takšen je bil sistem, dokler nismo vnesli nove komponente, slikovni koprocesor. Sistem se je s tem razširil in dobili smo še eno tiskanino, umeščeno med Demo2x in senzor (slika 1 spodaj ter slika 2). Prejšnji sistem se je napajal samo preko vmesnika USB, saj je to zadostovalo, z dodatkom koprocesorja pa se je poraba občutno povečala zato smo morali dodati zunanji napajalnik (slika 2).



Slika 1: Sistem, njegove komponente in možnosti povezovanja.



Slika 2: Sistem je priključen na osebni računalnik v delujočem stanju.

3 Uporaba sistema

Sistem se uporablja za testiranje čipov. Preden čipe dajo v ohišje, jih preverijo, tako da ne dobimo t.i. mrtvih čipov. A kljub temu je treba preveriti, ali funkcije delujejo, kot je bilo načrtovano. Izvesti se morajo tudi električne meritve, s katerimi se preverijo predhodno narejeni izračuni. Posebna pozornost pri meritvah je namenjena porabi, saj naj bi se ICP uporabljal predvsem v napravah, ki se napajajo iz baterij.

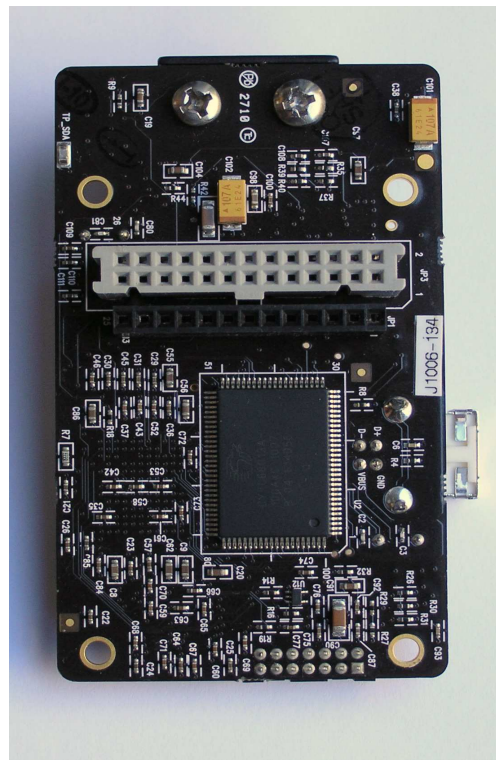
Sistem uporabljamo tudi za razvoj gonilnikov, ki so povezani s senzorjem ali koprocesorjem. Gonilnike potrebujemo predvsem pri kamera modulih, saj ti poleg senzorja vsebujejo tudi druge sisteme. Eden takšnih delov je sistem za premikanje leče, s katerim dosežemo, jasno sliko. Ta sistem kontroliramo iz koprocesorja, zato je treba v strojno programsko opremo dodati tudi gonilnik za premikanje leče.

Kalibracija senzorjev je postopek, pri katerem se sliko prilagodi določenim zahtevam. Koprocesor ima veliko avtomatskih funkcij, vsem pa je treba nastaviti tabele začetnih vrednosti. Zahtevane funkcije so predvsem ugotavljanje barve svetlobe, odprava sence na lečah, prilagajanje beline, korekcija slabih slikovnih pik itd. Pri tem je treba zajeti veliko testnih slik tako zunaj (sonce, oblaki) kot tudi v laboratoriju (različne žarnice in grafikoni (ang. chart)), zato je majhnost sistema tudi za izvedbo tega postopka dokaj pomembna.

Vsak produkt je treba predstaviti potencialni stranki. Najlažje in najbolje je to pokazati fizično, zato je ta sistem zelo uporaben. Omogoča tudi prilagoditve nastavitvev med delovanjem. Spremembe so takoj vidne na zaslonu osebnega računalnika.

3.1 Tiskana vezja, uporabljena v sistemu

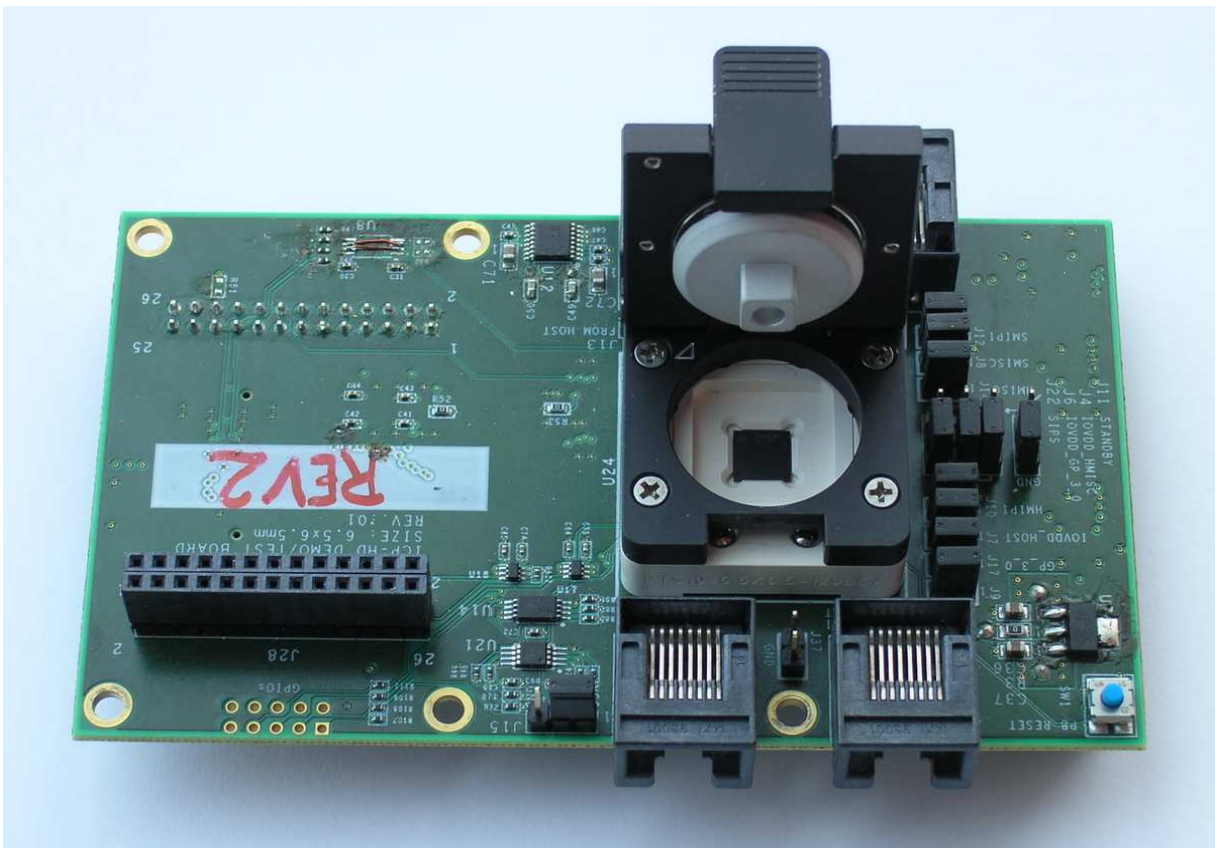
1. Tiskanina Demo2x (slika 3) je osnova celotnega sistema. Na njo lahko priklopimo samo tiskanino s senzorjem, lahko pa na njo priključimo tiskanino s koprocesorjem in senzor priključimo na koprocesorsko tiskanino. Osnovna funkcija te tiskanine je konvertiranje s paralelnega vmesnika MIPI na vmesnik USB, da lahko prikažemo zajeto sliko na osebne računalniku. Ker potrebujemo kontrolo nad koprocesorjem in senzorjem, je naslednja funkcija te tiskanine prenos kontrolnih signalov z vmesnika USB na vmesnik I2C (in obratno). Do kontrolnih registrov koprocesorja in senzorja lahko dostopamo samo preko vmesnika I2C. Glavni gradniki te tiskanine so krmilnik USB (CY7C68013A), FPGA (Xilinx XC2V500) in SDRAM (MT48H16M32).



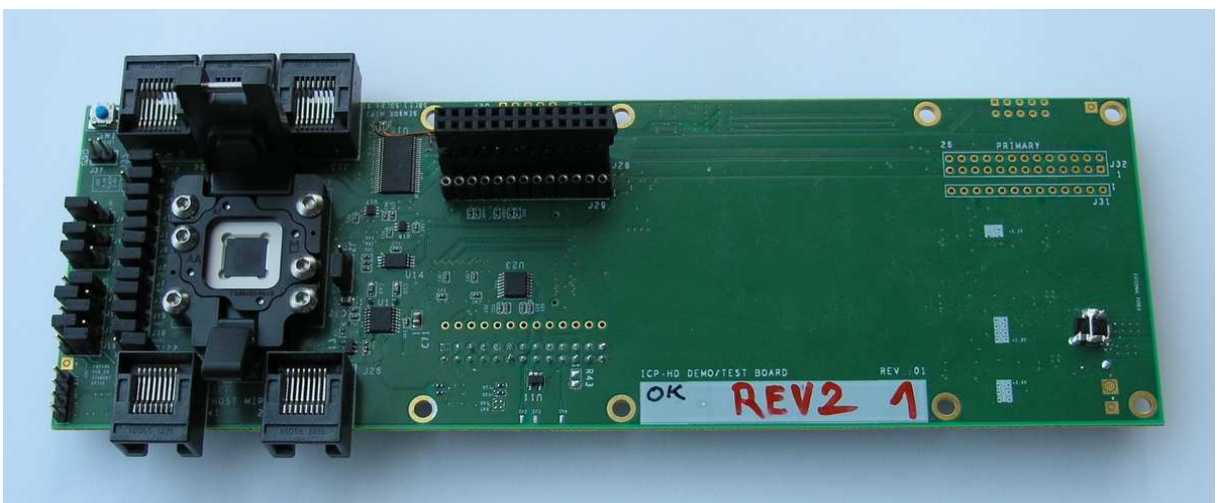
Slika 3: Tiskanina Demo2x. Leva slika: tiskanina z zgornje strani. Desna slika: tiskanina s spodnje strani.

2. Tiskanina ICP (čip velikosti 6,5 x 6,5mm in čip velikosti 8 x 8mm) je namenjena testiranju koprocessorja. Opremljena je z različnimi priključki (ang. connector) in ima dodatna integrirana vezja, ki so namenjena izključno testiranju. Koprocessor podpira paralelni in serijski vmesnik MIPI na strani gostitelja (v našem primeru Demo2x) in na strani senzorja. Tiskanina Demo2x podpira samo paralelni vmesnik MIPI, zato je v tem sistemu serijski vmesnik MIPI na strani gostitelja neuporabljen (lahko ga testiramo na drugi tiskanini).

Koprocessor ima dve različni velikosti uBGA (ang. „Ultra FineLine Ball-Grid Array“). Ena oblika je velikosti 8 x 8mm, druga je velikosti 6,5 x 6,5mm. V obeh je enako integrirano vezje, razlika je le v signalih, ki so pripeljani na žogico/nožico (ang. ball/pin). Tako imamo za vsako velikost čipa svojo tiskanino (slika 4 in 5). Manjši čip je bil narejen za sisteme, v katerih ne uporabljamo paralelnega vmesnika MIPI na strani senzorja. V ohišju čipa je interno povezanih več napajanih blazinic, ki so povezane z zunanjo žogico (ang. ball).

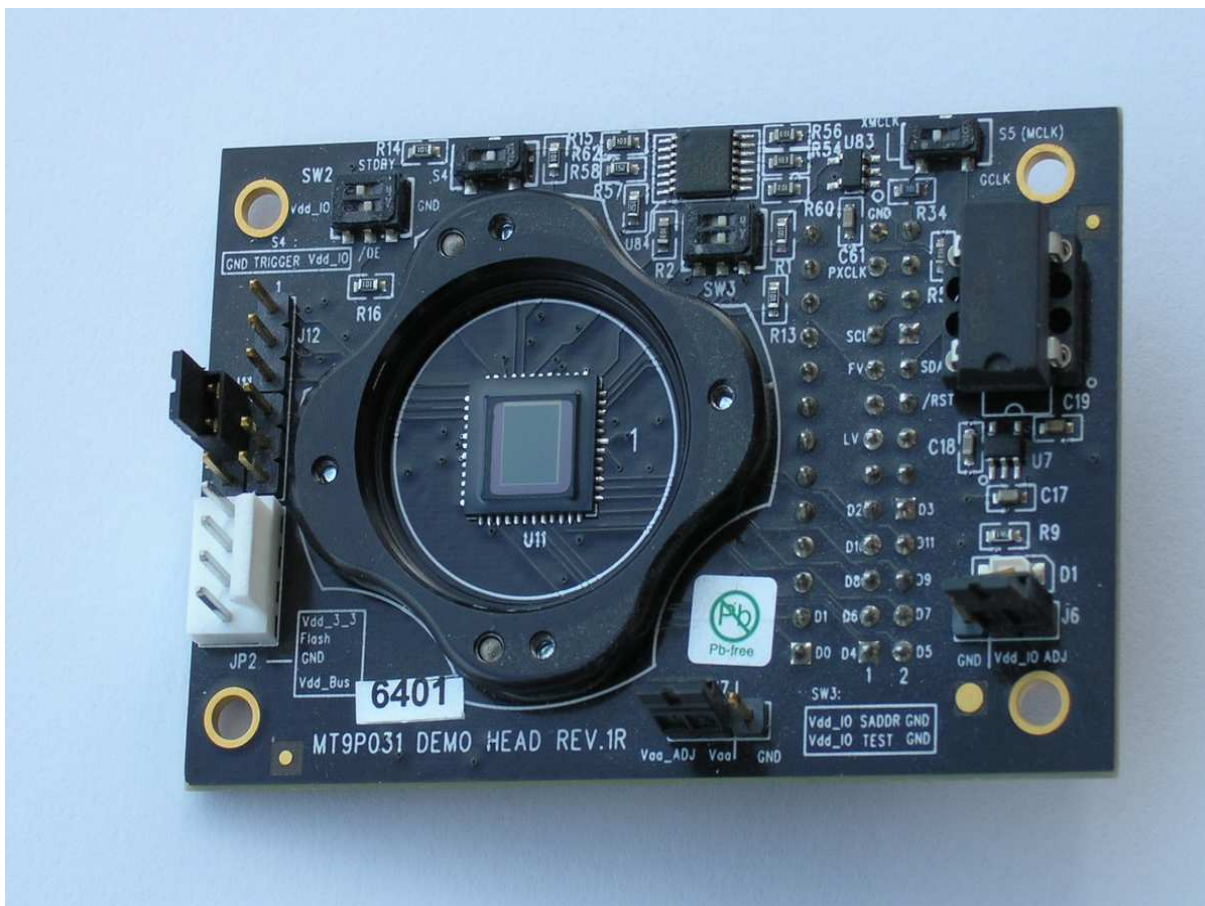


Slika 4: Zgornja stran tiskanine ICP, v držalu (ang. socket) je čip velikosti 6,5 x 6,5mm

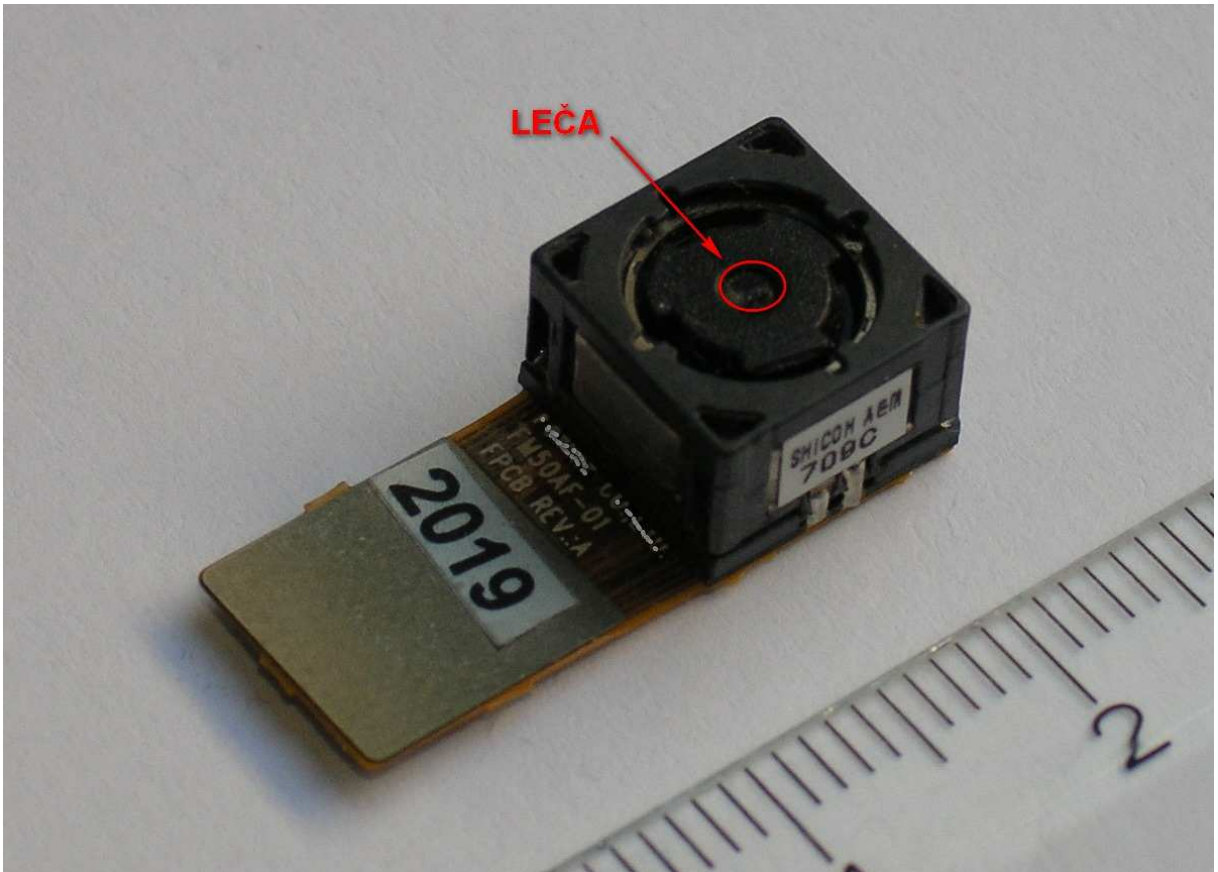


Slika 5: Zgornja stran tiskanine ICP za čip velikosti 8 x 8mm.

3. Tiskanina s senzorjem (slika 6). Senzor je v tem primer pritrjen na tiskano vezje, zaradi kompatibilnosti z drugimi tiskaninami ima dodan svoj oscilator. Slika 7 prikazuje modul za vgradnjo v prenosni telefon, sestavlja ga še priključek (na spodnji strani), navitje za premikanje leče (ang. voice coil), leča in pa ohišje.



Slika 6: Senzor pritrjen na tiskano vezje namenjen testiranju. Senzor je, v sredini nosilca za lečo, označen z U11. Na tiskanini so še priključki za testiranje in stikala za nastavitve.

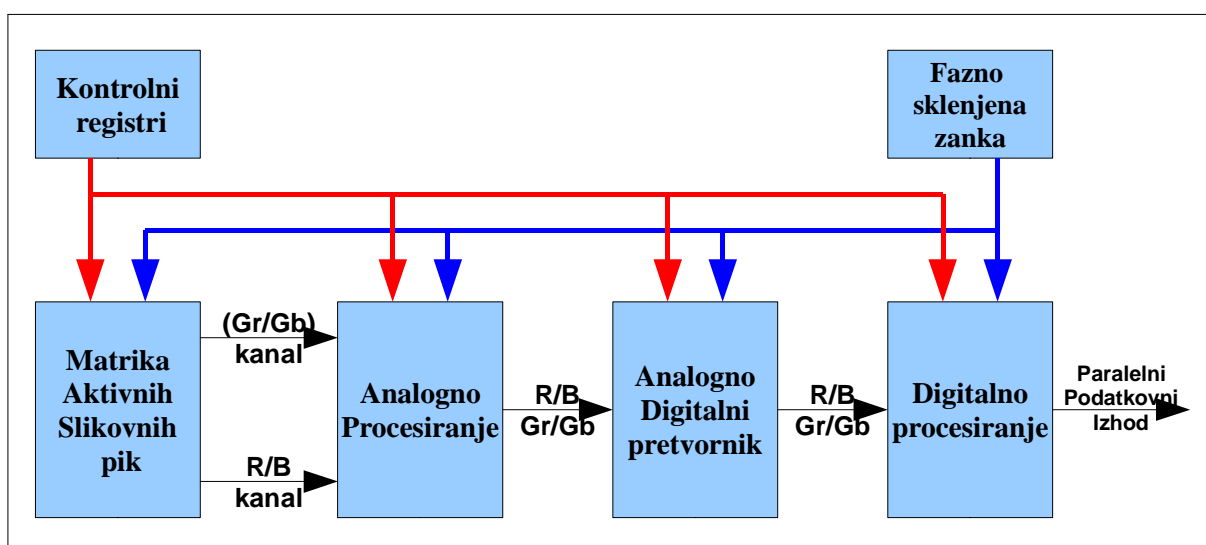


Slika 7: Modul z slikovnim senzorjem, namenjen uporabi v prenosnem telefonu.

4 Opis glavnih integriranih vezij

4.1 Digitalni slikovni senzor

Večina senzorjev je narejena v CMOS ali „osvetljeno od zadaj“ (ang. backilluminated) CMOS tehniki. Glavni del senzorja je aktivna matrika slikovnih pik (ang. pixels), ki zajame svetlobo in s tem tudi sliko. To je surova slika z veliko napakami. Zajeta slika se pošlje najprej v del sistema, kjer se analogno procesira (del napak se popravi), in nato v analogno-digitalni pretvornik, kjer se iz analognega pretvori v digitalni zapis. Na koncu sledi še digitalno procesiranje, kar je zelo podobno delu, ki ga opravlja ICP, a v veliko manjšem obsegu. Iz digitalnega procesorja so lahko nameščeni različni vmesniki: paralelni MIPI (8 bitov, 10 bitov ali 12 bitov), serijski MIPI, HiSpi (High-Speed Serial Pixel Interface). Za uro skrbi fazno sklenjena zanka (ang. PLL phase-locked loop).

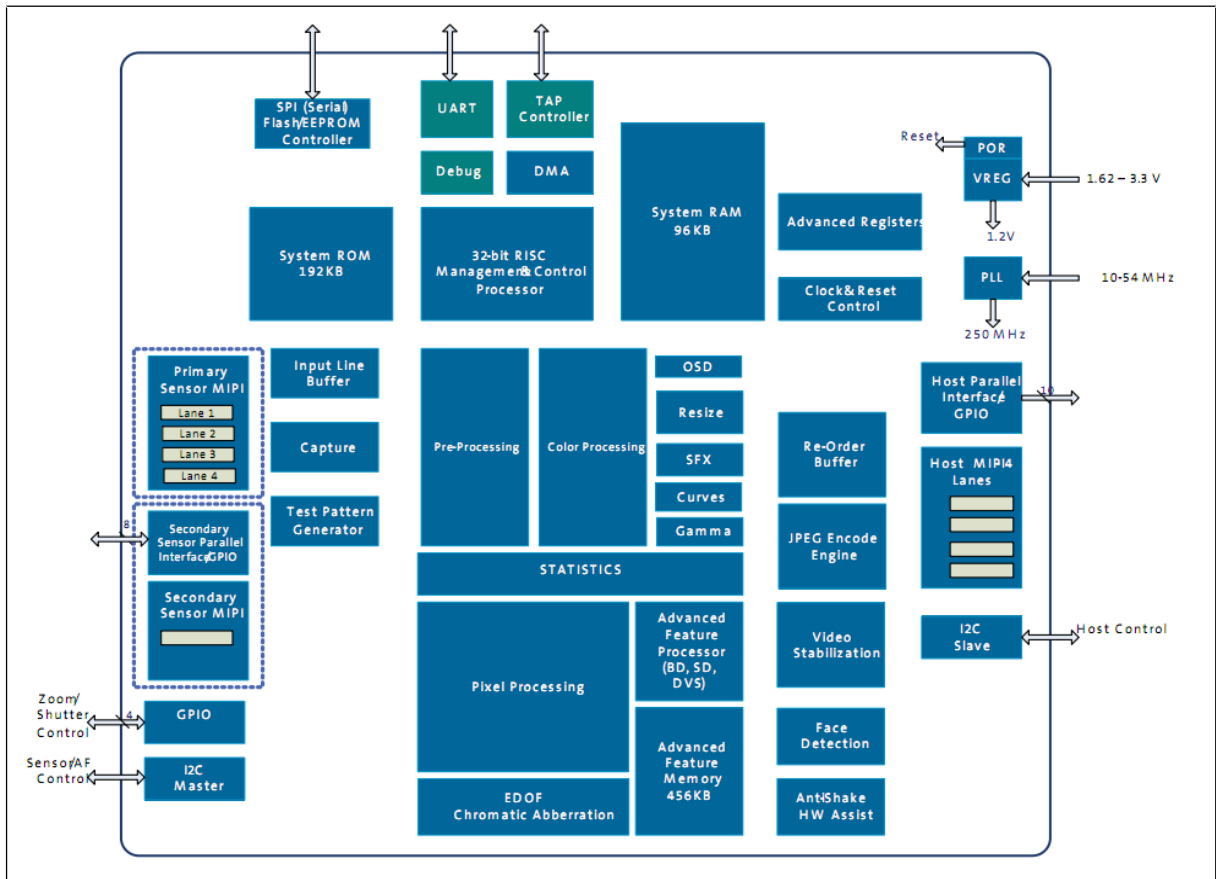


Slika 8: Prikaz delovanja jedra senzorja od matrike za zajem slike (ang. Active-Pixel sensor Array) do izhoda (paralelni vmesnik: 8, 10 ali 12 bitni).

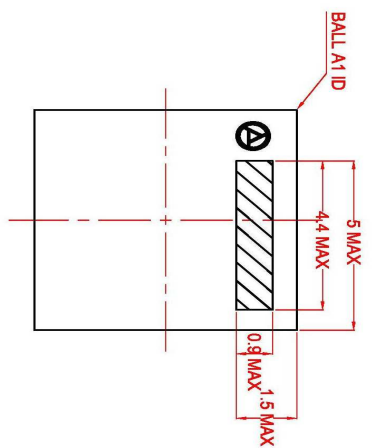
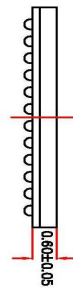
4.2 Slikovni koprocesor

Slikovni koprocesor (Image Coprocessor ICP) je integrirano vezje v 65nm tehnologiji za digitalno procesiranje slike in videa. Podpira senzorje z resolucijo do 8 megapixel (3264 x 2448) in zmora zajemati slike s 120fps (frames per second) pri polni resoluciji. Podpira tudi veliko naprednih in avtomatskih funkcij, kot so zaznavanje obrazov, nasmehov in mežikanja, video stabilizacije, zmanjševanje zameglitve fotografije (High-ISO), AWB (ang. auto white balance) samodejne nastavitve beline, AF (ang. auto focus) avtomatsko ostrenje itd. Poleg tega podpira tudi paralelni in serijski vmesnik MIPI na obeh straneh, na eni strani za senzor, na drugi strani za gostitelja.

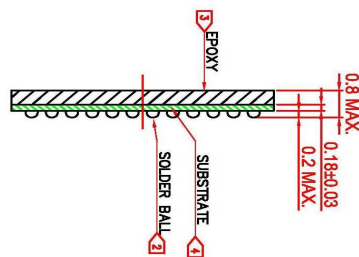
Koprocessor obstaja v dveh različnih velikostih ohišja, v 6,5 x 6,5mm (Slika 10) in 8 x 8mm. Večje ohišje podpira vse vmesnike in je s tem boljše za funkcijsko testiranje integriranega vezja samega, medtem ko manjše podpira le del vmesnikov in je specifično namenjeno enemu od naših senzorjev. Zaradi majhnosti koprocessorja sta načrtovanje in izdelava tiskanin posebej zahtevni.



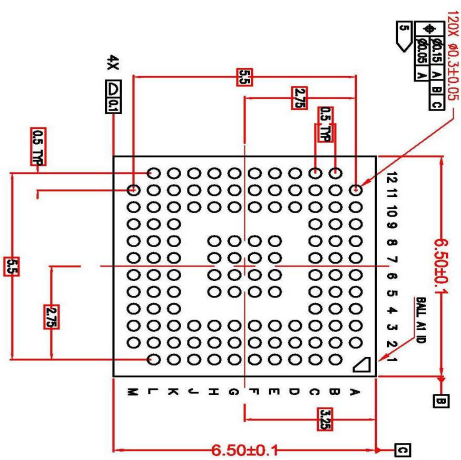
Slika 9: Blok diagram ko-procesorja.



TOP SIDE(TOP VIEW)



SIDE VIEW



BOTTOM SIDE(BOTTOM VIEW)

NOTE:

1. DIMENSIONS ARE IN MM. DIMENSIONS IN () ARE FOR REFERENCE ONLY, DO NOT MEASURE PRINTED DRAWING.
2. SOLDER MATERIAL: SAC305(96.5% Sn, 3% Ag, 0.5% Cu).
3. MOLD COMPOUND: EPOXY NOVOLAC.
4. SUBSTRATE MATERIAL: PLASTIC LAMINATE.
5. THIS AREA TO BE USED FOR SCRIBE MARK.
6. WAFER THICKNESS = 0.15mm(6 mils).

Slika 10: Mehanska risba ICP-ja v ohišju velikosti 6.5 x 6.5mm.

5 Načrtovanje sistema

5.1 Standardi in koraki do delujočega sistema

Standardni vmesniki, uporabljeni pri načrtovanju:

1. Procesorski vmesnik v industriji prenosne telefonije (ang. MIPI Alliance (Mobile Industry Processor Interface)). V tem standardu sta opisani paralelni (Camera Parallel Interface (CPI)) in serijski (Camera Serial Interface (CSI)) vmesnik.
2. Univerzalno serijsko vodilo USB2.0 (Universal Serial Bus), ki povezuje naš sistem z osebnim računalnikom.

Koraki do delujočega sistema:

- 1.) ideja in groba zasnova,
- 2.) izbira komponent in sheme,
- 3.) načrtovanje tiskanine,
- 4.) izdelava tiskanine in sestavljanje,
- 5.) testiranje tiskanin

Moje delo se nanaša predvsem na načrtovanje in testiranje. Testiramo predvsem funkcionalnost čipa in njegovo električno porabo.

Načrtovati smo začeli, še preden je čip dobil ohišje in smo imeli samo integrirano vezje. Imeli smo veliko fizičnih in časovnih omejitev. Fizične omejitve so: velikost tiskanine, dolžine posameznih linij, impedance linije, možnost vklopa na druge sisteme in pa predvsem majhnost čipa, saj ta vpliva na zmožnost izdelave tiskanine in njeno ceno.

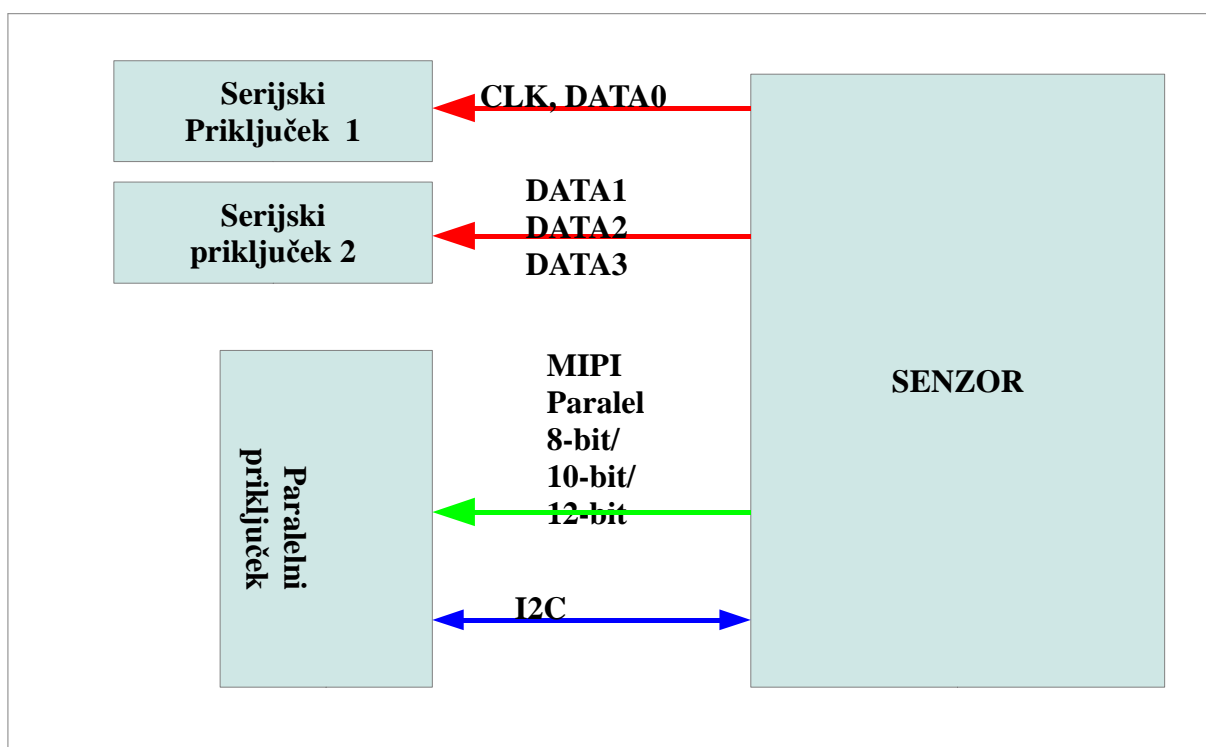
Zahteve za tiskanino:

- priključki RJ45 za signale MIPI,
- diferencialni pari za serijski prenos podatkov (MIPI in USB),
- sistem naj bi se napajal samo preko USB priključka, to se je izkazalo kot neizvedljivo, tako je bilo dodano dodatno zunanje napajanje
- meritve tokov na vsakem napajanju posebej (čip ima sedem različnih napajanj),
- nekatera napajanja morajo podpirati dve napetosti (+1,8V in +2,8V),
- spreminjanje vstopne ure v čip (od 12 do 48MHz),
- „prevajanje“ napetosti signalov iz +3,3V v +1,8V ali v +2,8V,
- nastavljanje različnih napetosti od -10% do +10%,
- podpora dveh različnih tiskanin kot gostitelja (dveh različnih priključkov),
- celoten sistem mora biti mehansko stabilen.

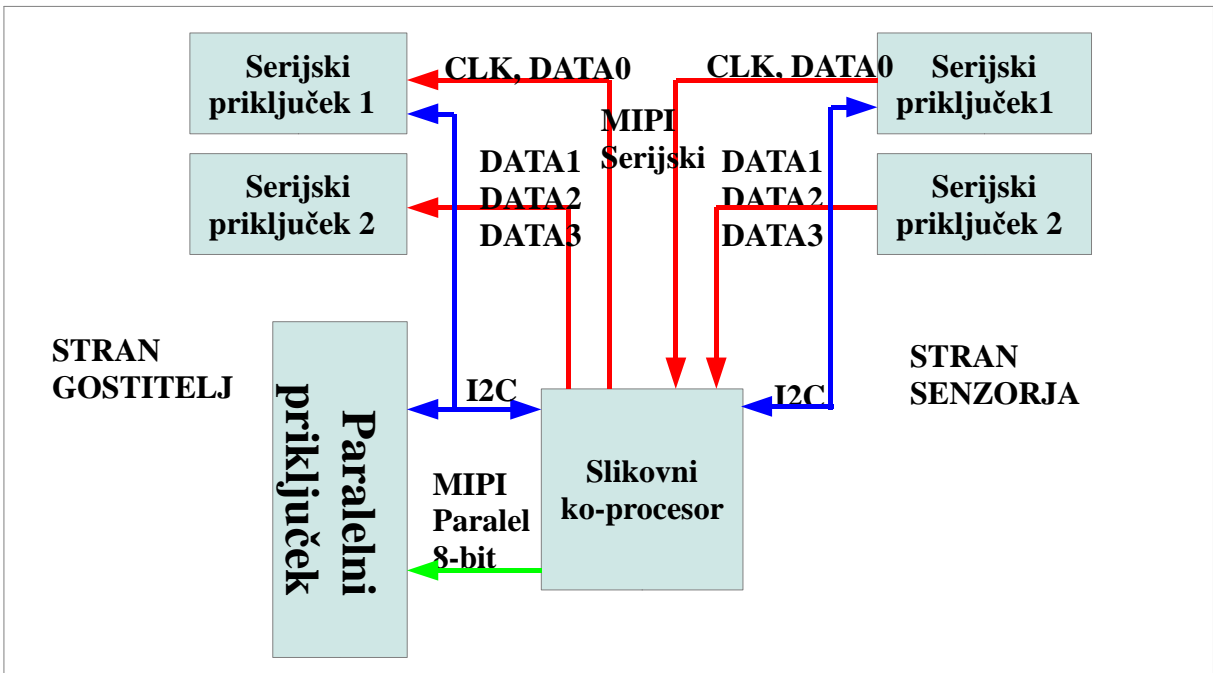
5.2 Arhitektura sistema

Na sliki 11 je blok diagram tiskanine s senzorjem, ki podpira paralelni in serijski vmesnik, vendar pri našem sistemu uporabljamo samo serijskega. Senzor se kontrolira preko vmesnika I2C. Format zapisa, ki se prenaša od sensorja do ICP-ja, je lahko v različnih standardnih oblikah (YUV, RAW, ...). Koprocesor preko vmesnika I2C sproti spreminja nastavitve sensorja glede na sliko ali glede na zahteve gostitelja (slika 12). Popravljeni slike lahko koprocesor spremeni format (RGB, JPEG, YUV, RAW, ...) in jo pošlje do gostitelja, v našem sistemu je to FPGA na tiskanini Demo2x (slika 13). FPGA je v tem primeru uporabljen tudi kot slikovni medpomnilnik, saj shranjuje slike v SDRAM in jih pošilja krmilniku USB. To je tudi ozko grlo našega sistema, saj moramo veliko slik zavreči, kajti ICP lahko pošilja okoli 1Gb/s, medtem ko je teoretični maksimum USB-ja 480Mb/s. Preko USB-ja se slika in kontrolni podatki prenesejo na osebni računalnik.

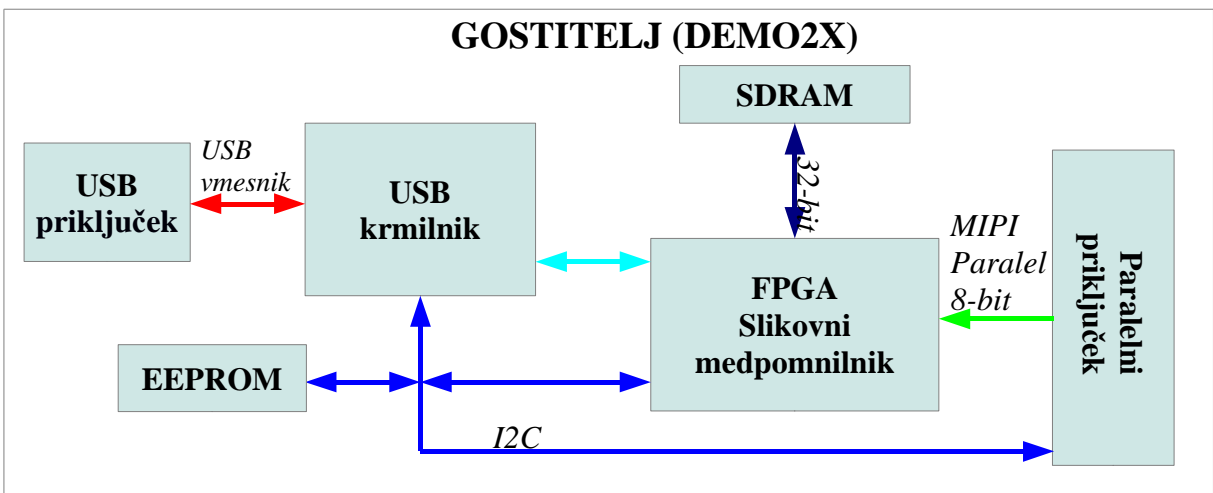
V nasprotni smeri, od osebnega računalnika do ICP-ja, se prenašajo kontrolni podatki najprej preko USB-ja do krmilnika USB na tiskanini Demo2x. Od tu se kontrolira ICP in FPGA preko vmesnika I2C. Preko I2C-ja pošiljamo ukaze koprocesorju ali sensorju in dobivamo nazaj podatke o tem, koliko slik na sekundo pošilja senzor, kakšno je stanje koprocesorja, itd.



Slika 11: Blok shema senzorske tiskanine.



Slika 12: Blok shema tiskanine s koprocetorjem.

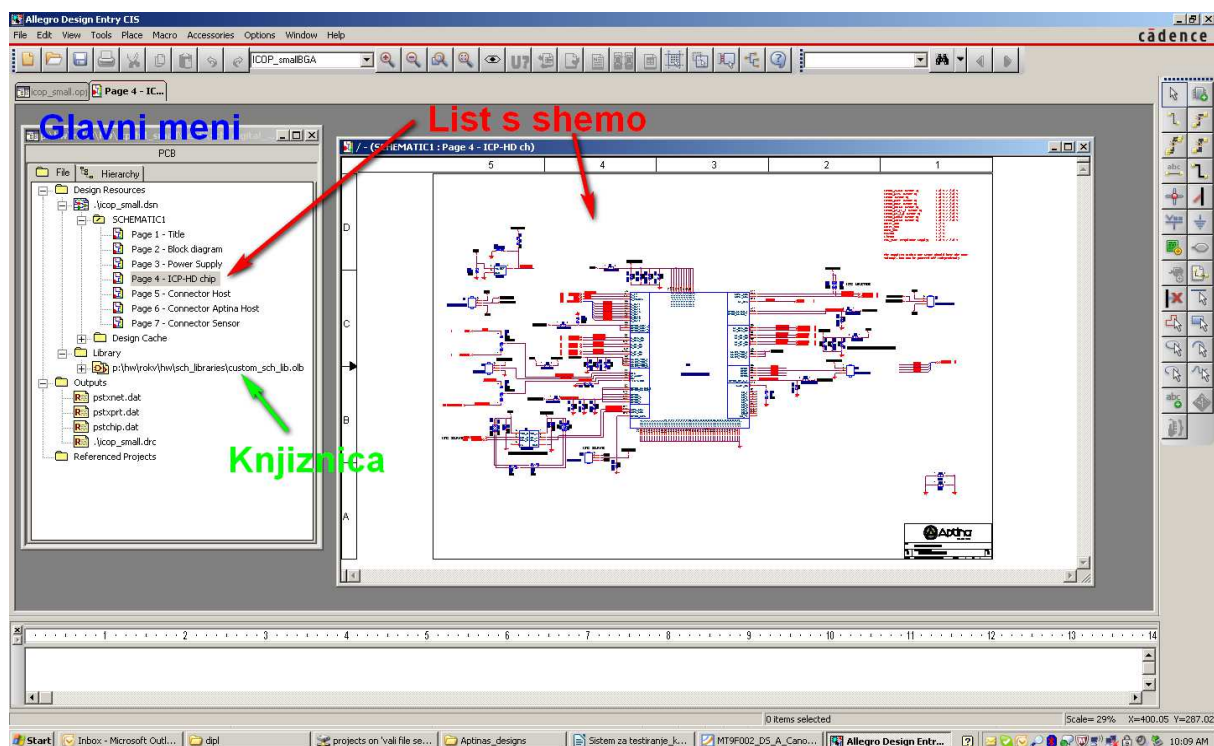


Slika 13: Blok shema tiskanine Demo2x, ki je gostitelj za tiskanino ICP

5.3 Opis delovnega okolja za načrtovanje

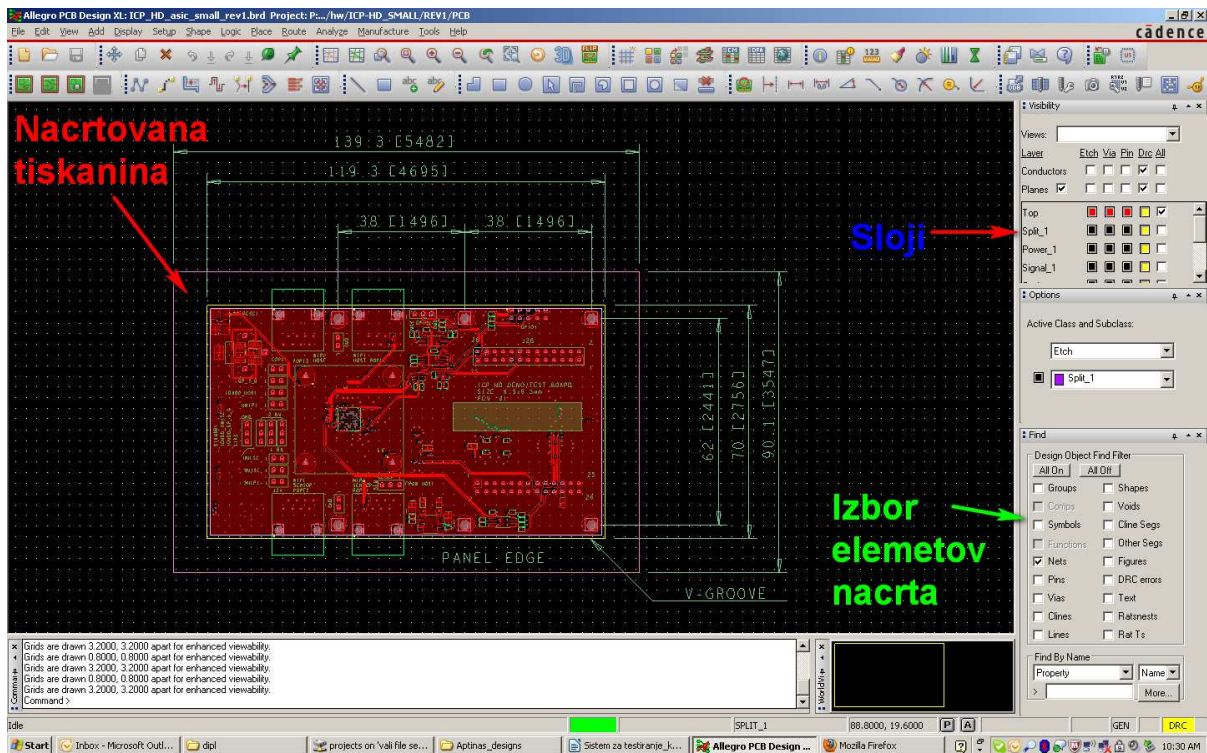
Tiskanina je načrtovana v programskem okolju podjetja Cadence. Ta paket vsebuje veliko različnih programov, ki so namenjeni določeni fazi načrtovanja. Tako sheme nastajajo v programu Allegro Design Entry CIS, načrtovanje tiskanine pa v programu Allegro.

Design Entry CIS (slika 14) je program za izrisovanje shem, shematskih simbolov, urejanje knjižnice simbolov in celoten prenos podatkov, ki so potrebni za načrtovanje tiskanin. Risanje shem se prične z izrisom shematskih simbolov komponent, ki smo jih izbrali. Te se shranijo v knjižnici, iz katere lahko te simbole kasneje uporabljamo v glavni shemi. Ko je shema končana, je treba podatke pretvoriti in zapakirati v tako imenovano listo povezav (ang. netlist), ki je nekakšna povezava med shemo in načrtom za tiskanino.



Slika 14: Allegro Design Entry CIS, okolje za izris shem.

Načrtovanje tiskanine je izvedeno v programu Allegro. Ta program nam mogoča nastavitve vseh fizičnih omejitev tiskanine in veliko izračunov za različne električne in elektronske zahteve (dolžine vezi, njihovo impedanco, debelino glede na tokove, ...). Ko je načrtovanje končano, se celoten načrt konvertira v tako imenovane gerber datoteke, ki se jih lahko pošlje kateremu koli izdelovalcu tiskanih vezij.



Slika 15: Program Allegro in njegovo delovno okolje.

5.4 Shema tiskanine ICP

5.4.1 Shema napajanja koprocesorja

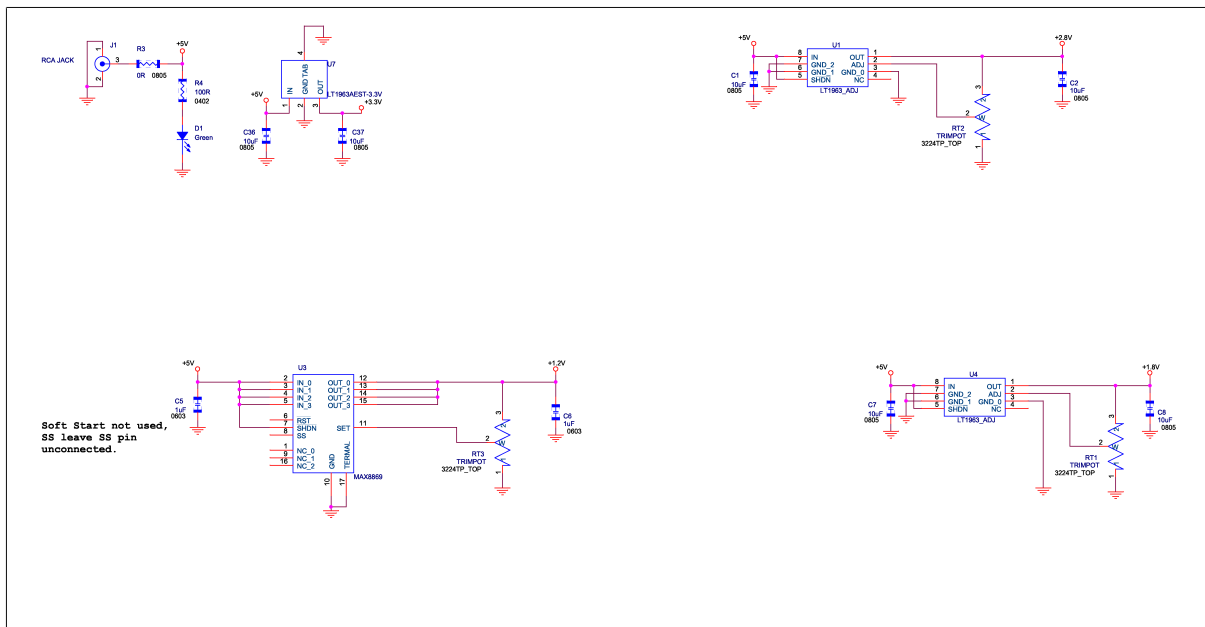
Celoten sistem naj bi se napajal iz vrat USB (po standardu je maksimalen tok iz USB 500mA), a to ni bilo mogoče, ker je že sam koprocesor zahteval preveč (okoli 600mA). Zato je tiskanina dobila dodaten vtikač za napajanje. Tako je možno na enem osebnem računalniku uporabljati dvojne USB vrat ali pa dodaten namizni napajalnik.

Nastavitev napetosti vseh napajanj je od -10% do $+10\%$ regularne napetosti. Taka nastavitev je potrebna, ker naj bi koprocesor po specifikacijah deloval v tem območju. Uporabljeni so nastavljivi linearni napajalniki, ki jim je bil dodan digitalno nastavljen upor. Tako se lahko napetosti spreminjajo preko vmesnika I2C, saj ima vsak digitalno nastavljen upor svoj naslov I2C, ki je določen z eksternimi nožicami (slika 16 nožice AD0 in AD1). Primarno napetost $+5\text{ V}$ lahko dobimo iz dodatnega priključka (slika 16 na shemi označen z J1) ali iz tiskanine Demo2x. Ta se uporablja za kreiranje ostalih napetosti $+1,2\text{ V}$, $+1,8\text{ V}$, $+2,8\text{ V}$ in $+3,3\text{ V}$.

Slika, ki jo zajema senzor, je zelo občutljiva na motnje v napajanju, zato ne delimo napajanj med tiskaninami, ampak imajo skupno le glavno napajanje ($+5\text{ V}$), ostala napajanja pa so rešena na vsaki tiskanini posebej.

Na koprocesorju in senzorju je nekaj napajalnih nožic, ki so bolj občutljive na šume v napajanju. Takšna je predvsem fazno sklenjena zanka (ang. PLL: phase locked loop) v koprocesorju, ki je odgovorna za ustvarjanje in distribucijo ur v samem čipu.

Načrtovanje tiskanine je v tem koraku pomemben del napajalnega sistema, saj le-ta ne sme biti blizu motečih faktorjev, kot so urni signali, ker lahko pride do presluha.



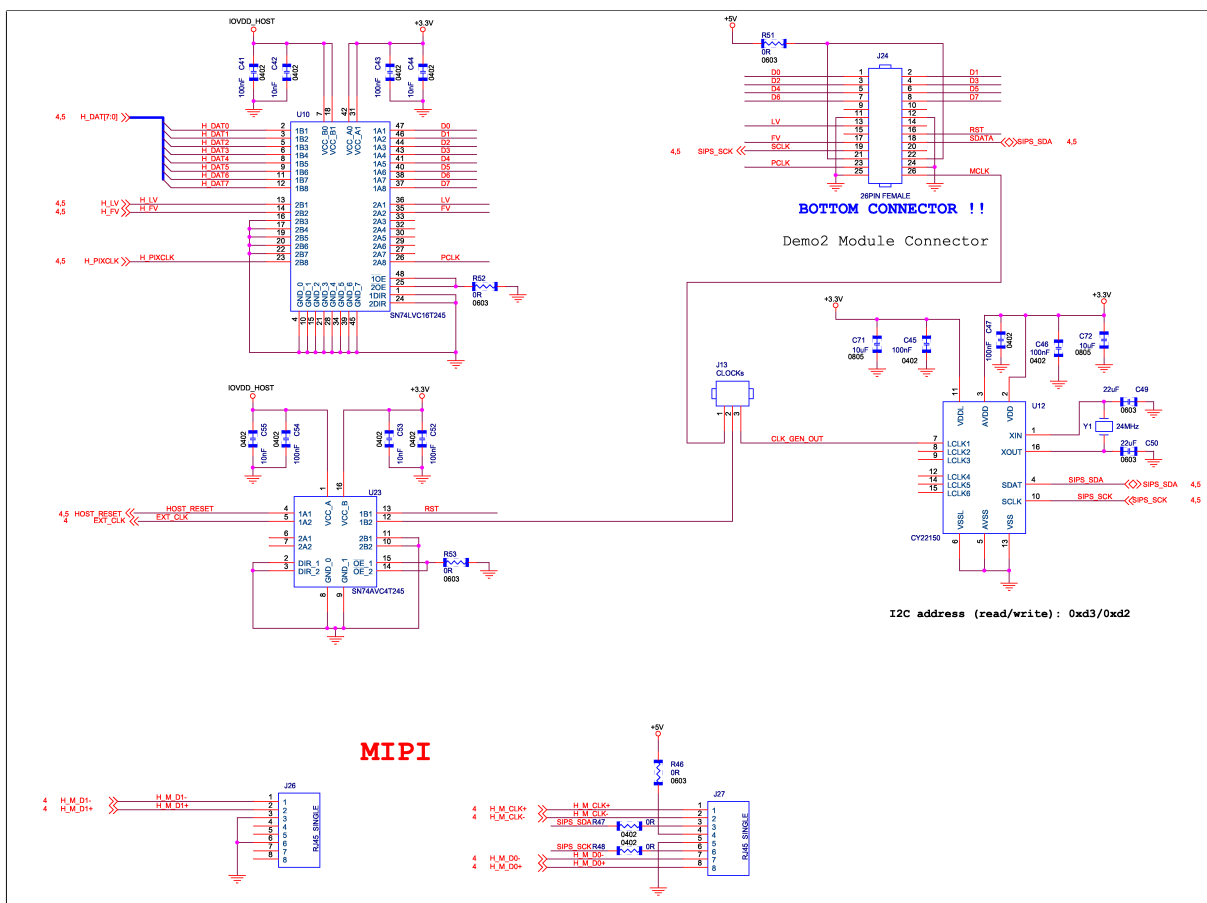
Slika 16: Shema napajanja ICP-ja.

5.4.2 Priključki s strani gostitelja, prevajanje napetosti signalov in generiranje ure

Glavni priključek do gostitelja je bil določen že predhodno (slika 17, simbol z oznako J24). Določena sta bila tudi položaj signalov na priključku in mehanski položaj priključka na tiskanini. Tiskanina Demo2x (gostitelj) lahko sprejema signale napetosti + 3,3 V, naš koprocesor pa lahko pošilja le signale napetosti + 2,8 V ali pa + 1,8 V. Zato je treba signale, namenjene gostitelju, prevesti na njegovo napetost. Pri tem sta bili uporabljeni dve integrirani vezji (slika 17, simbola U10 in U23). Dve integrirani vezji smo uporabili zato, ker je takšno vezje enosmerno in lahko signale prevaja le v eni smeri. Imamo SN74LVC16T245 (slika 17, simbol U10), ki prevaja signale iz napetosti + 1,8 V ali + 2,8 V v signale + 3,3 V za gostitelja, to so podatki in sinhronizacijski signali. SN74LVC2T245 (slika 17, simbol 23) pa je namenjen za signale do našega koprocesorja, ki jih ta rabi za delovanje, to sta ura in po-nastavi (ang. reset).

Ker naš koprocesor podpira tudi serijski vmesnik MIPI, smo morali dodati priključek za te signale. V podjetju imamo tudi gostitelja, ki uporablja standardne priključke RJ45 (slika 17, simbola J26 in J27). Te ima tudi naša tiskanina in lahko jih povežemo z zelo kratkimi kabli standarda CAT6a.

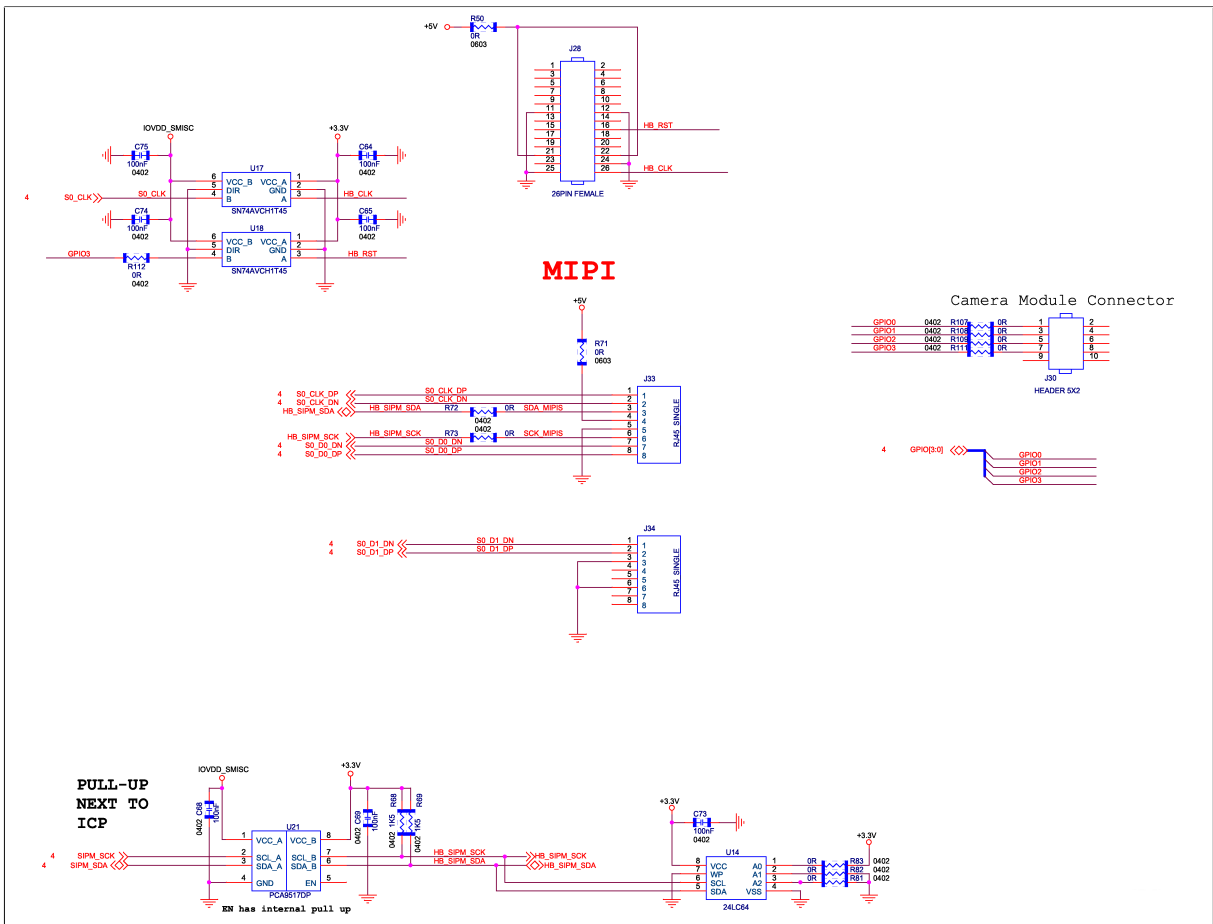
Ena od zahtev je bila možnost spreminjanja vstopne ure v koprocesor. Uro za senzor pa kontrolira koprocesor in jo lahko nastavimo po želji. Za koprocesor se uporablja posebno integrirano vezje CY22150 (slika 17, simbol U12), na katerem lahko spreminjamo uro od 20kHz do 180Mhz in ga kontroliramo prek vmesnika I2C. Tako lahko uro spreminjamo s programsko opremo in takoj, ko jo potrebujemo.



Slika 17: Shema priključkov na ICP tiskanini, proti gostitelju.

5.4.3 Priključki proti senzorju

Koprocesor v manjšem ohišju podpira le serijski vmesnik MIPI proti senzorju. Ker pa senzorska tiskanina in senzor podpirata paralelni (slika 18, simbol J26) in serijski (slika 18, simbol J33 in J34) prenos podatkov, smo priključek za paralelni vmesnik uporabili za montažo senzorske tiskanine in prenos urinega in signala po-nastavi. Ponovno se je pojavil problem nivoja napetosti, zato smo uporabili dva SN74AVCH1T45 (slika 18, simbola U17 in U18). Za vmesnik I2C smo uporabili integrirano vezje PCA9517 (slika 18, simbol U21). EEPROM (slika 18, simbol U14), je namenjen shranjevanju določenih nastavitvev za senzor. Priključka za serijski vmesnik MIPI sta standardna priključka RJ45, prav tako kot na strani gostitelja.



Slika 18: Priključki do senzorja.

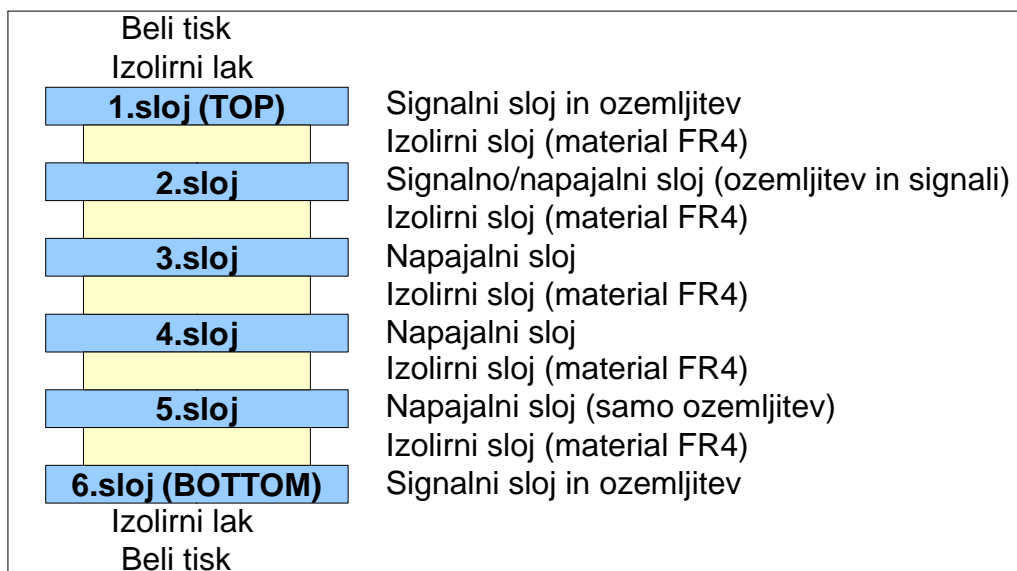
5.4.4 Shema koprocesorja

Koprocesor z ohišjem velikosti 6,5 x 6,5mm podpira le del vmesnikov, ki jih podpira celoten čip. Shema na sliki 19 prikazuje koprocesor in blokirne kondenzatorje (ang. decoupling ali bypass) za posamezne dele napajanja koprocesorja ter merilne točke za meritve posameznih napajalnih delov čipa. V testne namene so dodani upori s tremi blazinicami (ang. three pad resistors) in priključki s tremi nožicami, predvsem za izbor napetosti na posameznem napajanju. Komunikacija s koprocesorjem se izvaja preko vodila I2C. Ker ima vodilo I2C signalne napetosti + 3,3 V, jih je treba prevesti na nižjo napetost + 1,8 V. Za to uporabljamo integrirano vezje PCA9517.

6 Tiskano vezje

6.1 Definiranje slojev

Tiskanina ima šest slojev (slika 20): sloj, ki je namenjen napajanju, ozemljitveni sloj (ang. ground plane), dva razdeljena sloja (ang. split plane) za napajanje in za signale in dva sloja namenjena samo signalom. Signalna sloja sta čisto zgoraj in čisto spodaj. Prazne površine so zapolnjene z ozemljitvijo (ang. ground, okrajšava GND) za zmanjševanje motenj.



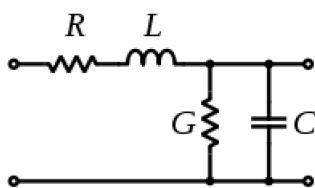
Slika 20: Prikaz slojev. Modro obarvani so sloji iz bakra, svetli so sloji iz FR4 (posebna steklena vlakna).

6.2 Diferencialni pari na tiskanem vezju

Diferencialni pari na tiskanem vezju so pomembni za serijske signale USB in MIPI. V obeh primerih standard določa omejitve, ki so impedanca linije, impedanca para linij in oddaljenost od drugih signalnih linij, tu so še posebej izpostavljeni urni signali. Vse vrednosti lahko vnesemo v program za načrtovanje tiskanih vezij (Allegro) in ta glede na podatke izračuna debelino povezav in oddaljenost negativne in pozitivne serijske povezave. Podatke dodamo k datotekam za izdelavo tiskanih vezij, da se lahko tudi v proizvodnji preverijo vse vrednosti. Standard MIPI zahteva 100 ohm-ov diferencialne impedance (+/- 20 %).

Za izračune impedanc se uporabljajo naslednje enačbe:

1.) karakteristična impedanca linije:



$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

2.) izračuni za diferencialne pare:

linije na zunanem sloju (ang. microstrip):

$$Z_{diff} = 2 \times Z_0 \times \left(1 - 0.48 \times e^{-0.96 \times \frac{S}{H}} \right)$$

linije med sloji (ang. stripline):

$$Z_{diff} = 2 \times Z_0 \times \left(1 - 0.347 \times e^{-2.9 \times \frac{S}{H}} \right)$$

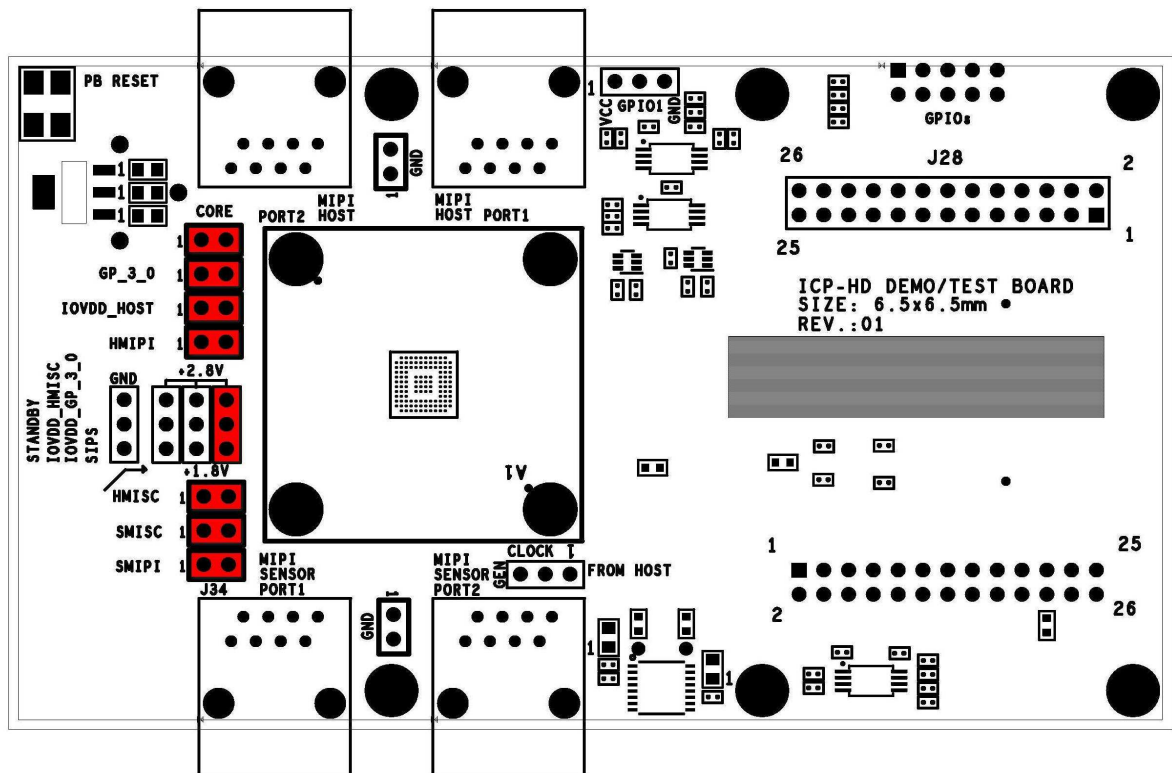
Z_0 karakteristična impedanca samo ene linije.

6.3 Točke na tiskanem vezju namenjene meritvam

Električno testiranje je le začetni pregled sistema (uporabil sem kar dvonožni priključek). Za takšno testiranje morajo biti meritvene točke prilagojene, tako da se tok lahko meri direktno z laboratorijskim merilnim instrumentom in brez posebnih uporov na tiskaninah. Natančnejše meritve se izvajajo na testni napravi za integrirana vezja in na posebej za to izdelanih tiskaninah.

Tokovne meritve se izvajajo za vsak napajalni del posebej. Čip ima osem delov in vsak del se napaja posebej (CORE, GPIO, HOST, HOSTMIPI, HOST MISC, SENSOR MISC, SENSOR MIPI in SIPS). To je shematsko zelo preprosto, pri načrtovanju tiskanine pa to predstavlja velik problem, predvsem zaradi majhnosti čipa in rastra nožic/žogic (ang. ball, tip ohišja je Ball Grid Array), ki je 0,5mm.

Na shemi so to priključki: J7, J8, J9, J10, J12, J14, J17, J22.



Slika 21: Prikaz merilnih točk na tiskanini. Rdeče obarvane so merilne točke za posamezna napajanja.

6.4 Ostali signali

Pozornost je treba posvetiti tudi nekaterim drugim signalom; sloji morajo biti postavljeni tako, da imajo signali impedanco okoli 50 ohm-ov. Pri paralelnem vmesniku je pomembno, da so dolžine vseh signalov približno enake (+/- 10 %) in da urin signal ne moti drugih signalov. Urin signal je obdan z ozemljitvijo, s čimer se zelo zmanjša možnost motenja drugih signalov.

Majhnost koprocesorja predstavlja velik izziv pri postavljanju blokirnih kondenzatorjev. Ena od zahtev je postavitev dveh ali več različnih kondenzatorjev za vsako napajanje posebej. Na čipu je osem napajanj, in vsako ima drugačne zahteve za zmanjševanje šuma na napajalnih nožicah. Osnovno vodilo pri postavitvi je, da so keramični kondenzatorji 10 nF in 100 nF postavljeni čim bližje napajalnim nožicam, keramični kondenzatorji 1 uF manj kot 6 cm stran od nožic, drugi pa kjerkoli na tiskanini.

6.5 Izdelava tiskanin

Ko je celoten postopek načrtovanja tiskanine končan, se izdelajo gerberji (načrt za izdelavo tiskanine). Gerberje nato pošljemo k proizvajalcu tiskanih vezij. Zaradi tehnične zahtevnosti so bile tiskanine ICP izdelane v podjetju ACB (Belgija). Tehnična zahtevnost te tiskanine izvira

predvsem iz majhnosti čipa ICP, kar je zahtevalo postavitev slepih skozičnikov pod blazinicami (ang. blind vias under pad).

Slepi skozičnik (ang. blind via) je metalizirana luknja v tiskanini, ki ne poteka skozi celo tiskanino, ampak se konča en ali dva sloja pred zgornjim ali spodnjim robom tiskanine.

Blazinice (ang. pads) so bakreni deli tiskanega vezja, kjer ni zaščitnega laka, z namenom, da se na njih zacini nožica integriranega vezja.

6.5.1 Preverjanje tiskanine

Preverjanje kratkih stikov na tiskanini ali napak pri sestavljanju se izvaja z očesom in z merilnim instrumentom za preverjanje kontinuitete. Tiskanine same so že testirane, ko pridejo iz proizvodnje tiskanih vezij, a takrat so še brez komponent. Veliko problemov se pojavi, ko so tiskanine sestavljene. Tiskanino preverjamo, preden jo priključimo na napajanje, da ne uničimo kakšnega integriranega vezja.

6.6 Priprava sistema za delovanje

Ko so tiskanine opremljene in testirane, je treba za delovanje naložiti vdelano programsko opremo (ang. firmware). Za Demo2x imamo v podjetju posebno programsko opremo, s katero naložimo vdelano programsko opremo za krmilnik USB in pa PROM za FPGA. Za ICP se vdelana programska oprema naloži vsakič na novo, ker se ICP lahko uporablja z različnimi senzorji.

6.7 Prvo delovanje

Ko so vse tiskanine preverjene in električno testirane, se lahko povežejo skupaj in naš sistem je pripravljen za delovanje. Da bi karkoli videli na zaslonu osebnega računalnika, potrebujemo tudi programsko opremo (ICPDemo). S to programsko opremo lahko tudi nastavljamo registre za senzor (slika 22, levi del okna), koprocesor in FPGA (vsaka na svoji tiskanini). Tako imamo z osebnega računalnika popoln nadzor nad sistemom. Naložiti moramo le še vdelano programsko opremo za ICP in že se na zaslonu računalnika vidi, kar vidi senzor (slika 22, na sredini). Imamo pa tudi možnost, da nam koprocesor vrne določene izpise na „konzolo“ (slika 22, levo).

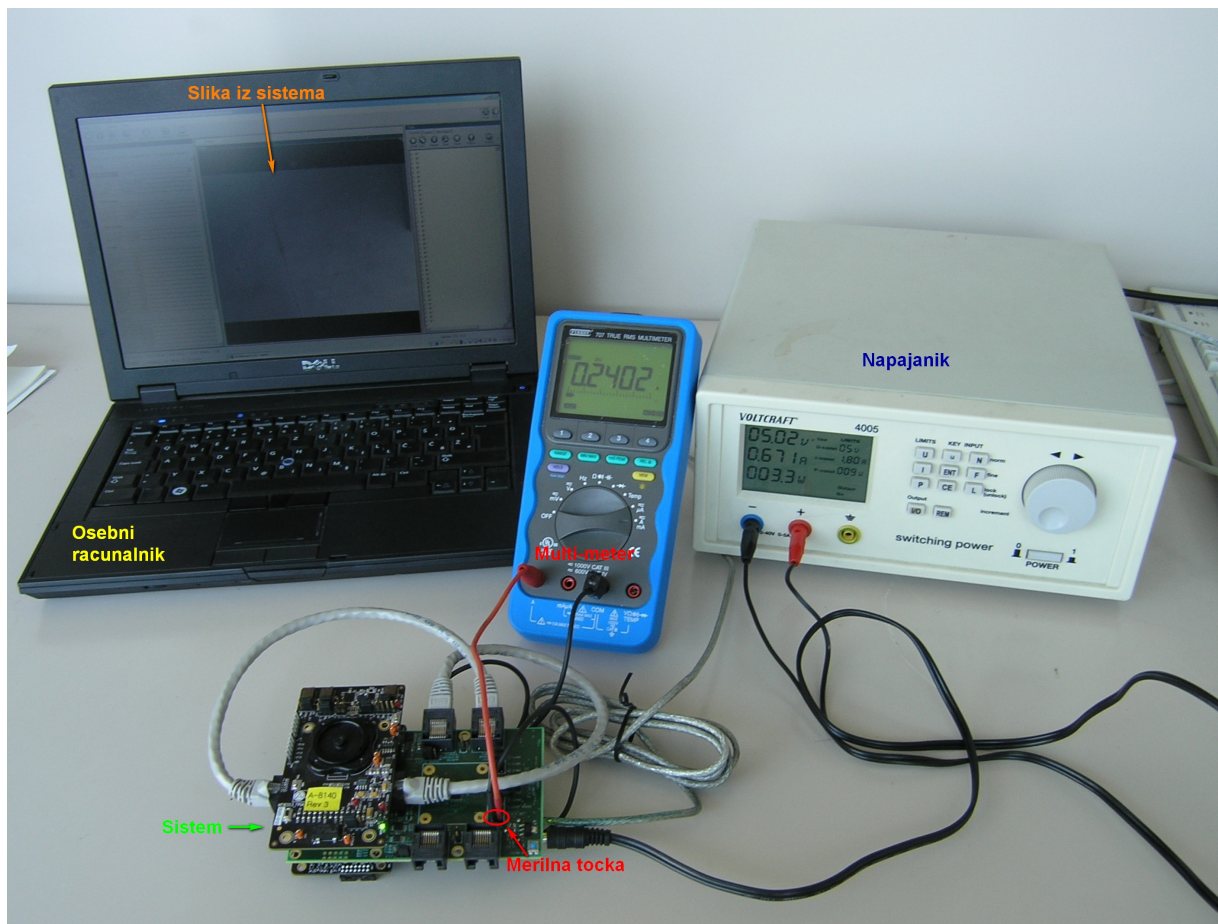
7 Meritve

Meritve se izvajajo predvsem za osnovno predstavo, saj se zelo natančne meritve izvajajo na drugih sistemih (npr. naprava za testiranje integriranih vezij in tiskanine, namenjena predvsem takim meritvam). Te meritve so vseeno pomembne, predvsem zaradi cene in časa, saj so predhodna stopnja natančnejšim meritvam.

Navadno vzamemo vzorec desetih čipov in izmerimo tok na vseh napajanjih. Te izmerimo z laboratorijskim merilnim instrumentom in v različnih načinih delovanja koprocesorja. Tukaj je zelo pomembno, koliko svetlobe zajame senzor, saj je od tega odvisno, koliko podatkov bo poslal koprocesorju, s tem pa se zvišuje porabljen tok. Več svetlobe pomeni, da bo v danem času zajetih več okvirjev in bo potreba po procesiranju večja.

Vsaka napetost, ki je določena, mora biti preverjena; prav tako morajo biti preverjena tudi odstopanja od nje. To pomeni, da mora čip delovati tudi 10 % pod in 10 % nad določeno napetostjo, zato uporabljamo nastavljive napajalnike. Napajalnik nastavljamo z digitalno nastavljivimi upori, ki jih lahko spreminjamo z uporabo programa ICPDemo. Vsaka nastavitev je preverjena z merilnim instrumentom pred in po meritvi toka.

Za meritve toka nismo uporabljali merilnih uporov, saj se je izkazalo, da zadošča samo natančen laboratorijski merilni instrument (slika 19). Meritve se izvajajo pri različnih nastavitvah ICP-ja; pri tem sta zelo pomembna maksimalni in minimalni tok. Večina tokov se je ujemala z izračuni in naknadnimi natančnimi meritvami. Takšne meritve tokov tudi niso vplivale na delovanje koprocesorja ali zajeto sliko.



Slika 23: Delujoč sistem na katerega je povezan merilni instrument na eni od merilnih točk.

Meritve se izvajajo v določenih stanjih procesorja. Ker naj bi procesor deloval v prenosnih telefonih, sta zelo pomembni poraba v pripravljenosti (ang.: stand-by) in maksimalna poraba.

Stanje pripravljenosti pomeni, da jedro procesorja ne deluje, deluje pa zelo omejen nabor signalov, tako da se lahko procesor zbudi iz tega stanja.

Maksimalna obremenitev procesorja nastopi takrat, ko ima vključene vse funkcije in zajema video v 1080p @ 30 fps (resolucija: 1920×1080, progresivno branje vrstic in zajem 30 okvirjev na sekundo (ang.: fps-frames per second)). Največ porabe gre seveda na račun jedra (okoli 95%), drugi deli procesorja porabijo okoli 5% celotne porabe. Maksimalna frekvenca jedra je 250MHz.

Za meritev maksimalne porabe je pomembna tudi svetloba, ki jo zajame senzor. Če je slika pretemna, se zmanjša število pik (pixel), ki jih je treba sprocesirati.

Meritve se izvajajo pri sobni temperaturi in po naslednjem postopku:

1. nastavitve napajanja na normalno vrednost ali odstopanje +/- 10 %, nato preverjanje nastavitvev,
2. vstavljanje procesorja v njegov vtikač (ang. socket),
3. priključitev merilnega instrumenta na merilno mesto,
4. pri preverjanju delovanja procesorja izkazalo se je, da vtičnica sicer deluje, a zaradi majhnosti nastanejo problemi pri kontaktih med čipom in vtičnico zato je včasih treba čip ponovno vstaviti,
5. nastavitve procesorja na določen način delovanja,
6. meritev.

Ta postopek se ponavlja za vsako napetost in za tri načine delovanja (pripravljenost, predogled in 1080p @ 30fps video).

| Voltage | Mode (8140+ICP) | HMIPI_VDD | SMIPI_VDD | OVDDs | PLL_VDD | CORE_VDD average | CORE_VDD max. | Unit |
|---------|-----------------------|-----------|-----------|-------|---------|------------------|---------------|------|
| Max. | 1080p @ 30fps | 8.75 | 10.05 | 1.15 | 1.49 | 490.89 | 524.52 | mA |
| Min. | 1080p @ 30fps | 7.02 | 6.86 | 1.17 | 1.3 | 408.41 | 434.31 | mA |
| Normal | 1080p @ 30fps | 7.86 | 8.16 | 1.16 | 1.38 | 447.83 | 473.04 | mA |
| Max. | 720p @ 30fps | 5.55 | 8.18 | 1.18 | 1.25 | 289.81 | 333.49 | mA |
| Min. | 720p @ 30fps | 4.4 | 5.05 | 1.19 | 1.07 | 231.77 | 263.09 | mA |
| Normal | 720p @ 30fps | 4.63 | 6.55 | 1.19 | 1.16 | 258.26 | 300.35 | mA |
| Max. | 8MP @ 15fps | 4.29 | 10.49 | 1.16 | 1.25 | 449.69 | 473.72 | mA |
| Min. | 8MP @ 15fps | 3.21 | 6.49 | 1.17 | 1.07 | 365.61 | 381.42 | mA |
| Normal | 8MP @ 15fps | 3.79 | 8.38 | 1.17 | 1.16 | 406.2 | 423.59 | mA |
| Max. | Low power VGA @ 30fps | 0.1 | 7.25 | 5.9 | 1.25 | 202.81 | 241.12 | mA |
| Min. | Low power VGA @ 30fps | 0.15 | 4.41 | 5.8 | 1.07 | 163.28 | 189.88 | mA |
| Normal | Low power VGA @ 30fps | 0.13 | 5.85 | 5.87 | 1.16 | 178.1 | 201.51 | mA |

Tabela 1: Meritve tokov na posameznih napajanjih in v različnih načinih delovanja koprocesorja.

Opis podatkov iz tabele 1:

Napetosti (ang. Voltage):

- normalna (ang. Normal): 1,2 V
- min. (za 10 % nižja od normalne) : 1,08 V
- max. (za 10 % višja od normalne) : 1,32 V

Nastavitve (ang. Mode):

- 1080p @ 30fps, kar pomeni resolucija 1920 (horizontala) x 1080 (vertikalna) slikovnih pik (ang. pixel); slika se osvežuje s 30 okvirji na sekundo (ang. (fps) frames per second),
- 720p @ 30fps resolucija: 1280 x 720 pixel, 30 fps,
- 8MP @ 15fps resolucija: 3264 x 2448 pixel, 15fps,
- VGA @ 30fps resolucija: 640 x 480 pixel, 30fps.

8 Zaključek

V diplomski nalogi sem predstavil sistem, ki ga uporabljamo pri različnih testiranjih koprocesorja ICP in pri kalibraciji senzorjev. Prikazal sem sestavo celotnega sistema in se osredotočil na nastajanje tiskanine z našim ko-procesorjem. Pri koprocesorski tiskanini sem opisal tako načrtovanje sistema, kot načrtovanje tiskanine same. V nalogi so prikazani glavni problemi in rešitve načrtovanja tiskanine ter vklopa te tiskanine v že obstoječ sistem. Opisal sem tudi, kako se sistem uporablja in kako se opravijo meritve, ki sem jih izvedel.

[1] (2000) Universal Serial Bus Specification Revision 2:
http://www.usb.org/developers/docs/usb_20_071411.zip

[2] (2005) *MIPI* (Mobile Industry Processor Interface):
<http://www.mipi.org/specifications/camera-interface#CSI1>

[3] (2011) Analog switches in D-PHY MIPI dual camera/dual display applications (članek v EETimes), pogl. PCB Design and Layout :
<http://www.eetimes.com/design/analog-design/4214107/Analog-switches-in-D-PHY-MIPI-dual-camera-dual-display-applications--Part-2-of-2->

[4] (1997-2010) PCB Impedance and Capacitance Calculator: Differential Microstrip :
http://www.technick.net/public/code/cp_dp.php?aiocp_dp=util_pcb_imp_microstrip_diff

Razlaga določenih kratic in izrazov:

„Slikovni“ senzor (kamera), [ang. image sensor] integrirano vezje za zajemanje slike in pretvorbo le te v digitalno obliko. Lahko so izdelani z različnimi tehnikami CMOS, CCD ali „back-illuminated“ CMOS ali CCD.

Slikovni koprocesor (ICP- ang. image coprocessor): integrirano vezje za procesiranje slike ali videa in kontrolo avtomatskih in naprednih funkcij.

Moduli: končni produkti, sestavljeni iz slikovnega senzorja, avto fokusa, EEPROM-a in redko tudi koprocesorja. V diplomski nalogi so omenjeni moduli, ki so namenjeni predvsem za prenosne telefone.

MIPI (Mobile Industry Processor Interface): standard vmesnikov za industrijo prenosnih naprav.

MIPI Parallel camera interface: vmesnik za paralelni prenos podatkov.

MIPI Serial camera interface (CSI-2): serijski vmesnik za prenos podatkov, sestavljen iz diferencialnih parov (en par za uro in štiri pari za podatke). Maksimalen prenos podatkov 960Mb/s.

FPGA (ang. Field-programmable gate array): programirljivo integrirano vezje.

PROM (ang. Programmable read-only memory): programirljiv pomnilnik.