

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Informaatikateaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut
Siduselektronika õppetool

ÕHU CO₂ SISALDUSE MÕÕTESEADE

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Denry Aron
Üliõpilaskood: 123706IAEB
Juhendaja: Dotsent M. Pikkov
Kaasjuhendaja: Dotsent M. Jaanus

Tallinn
2015

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Kinnitan, et antud töö koostamisel on kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidatud.

Kuupäev: 12. aprill 2015

Autor: Denry Aron

.....

/allkiri/

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:

Õhu CO₂ sisalduse mõõteseade.

Teema päritolu:

Teema pärineb ühest Liewenthal Electronicsi väikesemahulise projektist.

Lõputöö eesmärgid:

Kajastada seadme väljatöötamist, selgitada lahenduste tausta ning õigustada tehtud valikuid.

Oodatavad tulemused:

Väljatöötatud lahenduse toimimine CO₂ kontsentratsiooni kajastamiseks ning piisav dokumentatsioon seadme tootmiseks väikeses koguses.

Lahendatavad küsimused:

Mõõtevahemiku kindlaksmääramine, mõõteelemendi valik, riistvara väljatöötamine, tarkvara väljatöötamine.

Kuupäev:

.....

Üliõpilane:

.....

/allkiri/

Juhendaja:

.....

/allkiri/

Denry Aron

Õhu CO₂ sisalduse mõõteseade

Bakalaureusetöö

Annotatsioon

Antud lõputöös on välja töötatud seade, mis mõõdab ning kuvab CO₂ sisaldust õhus. Väljatöötamise käigus on käsitletud mikrokontrolleri alusel ehitatud juhtsüsteemi, CO₂ mõõtmist, kuva, toitelahendusi ning seadme trükkplaati. Töö tulemusena väljatöötatud seade on ettenähtud kasutuseks reklaamialal.

Töö sisaldab endas skeemi väljatöötamist, sealhulgas komponentide valikut, trükkplaadi disaini väljatöötamist ja seadme koostamist.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab 38 lehekülge, 10 peatükki, 17 joonist ning 3 tabelit.

Denry Aron

Device for measuring CO₂ concentration in air

Bachelor thesis

Abstract

Given thesis describes a device, which takes measurements of CO₂ concentration in air and displays the results. The thesis describes microcontroller-based control circuitry, measurement of CO₂, display, power solutions and PCB of the device. The device described here is intended for advertising purposes.

Process described here consisted of schematic design, including choice of components, PCB design and device assembly.

Thesis is written in Estonian and consists of 38 pages, 10 chapters, 17 drawings and 3 tables.

Kasutatud lühendid

| Lühend | Selgitus |
|------------------|--|
| ADC | Analog-to-Digital Converter (analoog-digitaal muundur) |
| CO ₂ | Süsinikdioksiid (süsihappegaas) |
| ENIG | Electroless nickel immersion gold |
| I ² C | Inter-Integrated Circuit |
| LDR | Light Dependent Resistor (valgustundlik takisti) |
| MOSFET | Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (Metall-oksiid-pooljuht väljatransistor) |
| PCB | Printed circuit board (trükkplaat) |
| PPM | Parts-per-million (osakest miljoni kohta) |
| PWM | Pulse Width Modulation (pulsilaiusmodulatsioon) |
| TVS | Transient Voltage Suppression (siirdepinge mahasurumine) |

Jooniste nimekiri

| | |
|--|----|
| Joonis 2.1: Seadme struktuurskeem..... | 11 |
| Joonis 5.1: E2 suhtluse algus- ja lõppkonditsioonid..... | 16 |
| Joonis 5.2: E2 baidi edastamine..... | 17 |
| Joonis 6.1: Kuva nihkeregistrid ning väike kuva..... | 18 |
| Joonis 6.2: Suure kuva ühe numbrilülitused..... | 20 |
| Joonis 6.3: Loogikaläve muundur..... | 21 |
| Joonis 7.1: Pinget vähendava muunduri topoloogia..... | 23 |
| Joonis 7.2: Muundur 3.3V ahelale..... | 24 |
| Joonis 8.1: Trükkplaadi pealmine kiht (1. kiht)..... | 26 |
| Joonis 8.2: Trükkplaadi maakiht (2. kiht)..... | 27 |
| Joonis 8.3: Trükkplaadi toitekiht (3. kiht)..... | 27 |
| Joonis 8.4: Trükkplaadi alumine kiht (4. kiht)..... | 27 |
| Joonis 8.5: Trükkplaadi siiditrükk..... | 28 |
| Joonis 8.6: Trükkplaadi läbivasestatud augud..... | 28 |
| Joonis 8.7: Trükkplaadi vasestamata augud..... | 28 |
| Joonis 8.8: Trükkplaadi montaažijuhis..... | 29 |
| Joonis 9.1: Mikrokontrolleri programmi algoritm..... | 31 |

Tabelite nimekiri

| | |
|---|----|
| Tabel 7.1: Induktori valemi liikmete selgitus..... | 24 |
| Tabel 8.1: Trükkplaadi ülesehitus..... | 26 |
| Tabel 9.1: Kuva heleduse sõltuvus toitepingest..... | 30 |

Sisukord

| | |
|---|----|
| Sissejuhatus..... | 9 |
| 1. Mõõtmismeetodite lühiülevaade..... | 10 |
| 1.1 Mittedispersiivne infrapunase sensor..... | 10 |
| 1.2 Elektrokeemiline gaasisensor..... | 10 |
| 1.3 Mõõtemeetodi valiku selgitus..... | 10 |
| 2. Struktuurskeemi väljatöötamine..... | 11 |
| 3. Väljatöötatud seadme täielik elektriskeem..... | 12 |
| 3.1 Komponentide nimekiri..... | 14 |
| 4. Mikrokontroller LPC1115..... | 15 |
| 5. Süsihappegaasi mõõtemoodul EE893..... | 16 |
| 5.1 Protokoll E2..... | 16 |
| 6. Kuva..... | 18 |
| 6.1 Loogikaläve muundurid..... | 21 |
| 7. Toitepingete moodustamine..... | 22 |
| 7.1 Regulaator väljundiga 5V..... | 22 |
| 7.2 Regulaator väljundiga 3.3V..... | 22 |
| 8. Trükkplaadi väljatöötamine..... | 26 |
| 9. Mikrokontrolleri tarkvara väljatöötamine..... | 30 |
| 9.1 Mõõtmine ning väärtuse keskmistamine..... | 30 |
| 9.2 Valgustugevuse mõõtmine..... | 30 |
| 9.3 Akupinge mõõtmine..... | 30 |
| 9.4 Süsihappegaasi sisalduse kuvamine..... | 30 |
| 9.5 Kuva heleduse reguleerimine..... | 31 |
| 9.6 Programmi algoritm..... | 31 |
| 10. Väljatöötatud seadme katsetustulemused..... | 33 |
| 10.1 Mõõtetulemused..... | 33 |
| 10.2 Mõõtetulemuste analüüs..... | 34 |
| Kokkuvõte..... | 35 |
| Kirjandus..... | 36 |
| Lisad..... | 37 |
| Prototüüp..... | 37 |
| Seadme trükkplaat..... | 37 |
| Seadme katsetamine välitingimustes..... | 38 |

Sissejuhatus

Viimaste aastakümnete jooksul on hakatud üha rohkem tähelepanu pöörama looduskaitsele ja inimest ümbritsevale keskkonnale. Sellele on kaasa aidanud keskkonnakaitsealaste teemade üha laiem käsitus meedias, mis on tekitanud üha kasvava teadlikkuse keskkonnaprobleemidest ning suurendanud avalikku huvi antud teemade vastu. Vee- ja mullareostuse kõrval on nii meedia kui inimeste huvifääri üha rohkem tõusnud ka õhureostuse probleem. Teema oli teravalt üleval Pekingi olümpiamängude ajal 2008. aastal, kus õhusaastega võitlemiseks kasutati äärmuslikke meetodeid, nagu vabrikute seiskamist ja autode ajutist keelustamist, mis leidis ajakirjanduses ja mujal laia kajastust. Seoses selliste lugude ja uudistega ning inimeste üldise huviga loodushoiu ning elukeskkonna vastu, millest annab suurepäraselt tunnistust üha suurenev nõudlus mahe- ja ökotoodete järgi, on tekkinud küllalt vastuvõttev pinnas selle teadlikkuse ärakasutamiseks ärilistel eesmärkidel. Ainult siis, kui keskmine reklaamisihmärk on küllalt teadlik õhureostusest ja selle tagajärgedest, on võimalik seda infot ära kasutada talle kaupade või teenuste reklaamimiseks.

Taolise mõttekäigu läbi jõudis üks reklaamifirma ideele näidata süsihappegaasi sisaldust õhus reklaamtahvil. Selle rakendamisel avastati aga, et idee on võib-olla natuke liiga uudne – valmiskujul ei olnud võimalik seesugust seadet soetada. Idee füüsiliseks realiseerimiseks pöörduti elektroonikafirma poole, kus alustati etteantud plaanile vastava lahenduse väljatöötamisega. See usaldati autorile, mis viis käesoleva bakalaureusetöö kirjutamiseni.

Reklaamikampaania ei ole laiaulatuslik ning kaotab võrdlemisi ruttu oma uudsuse ja tähelepanuväärtuse, mistõttu lahendus ei ole optimeeritud masstootmiseks. Eeldatav tootmiskaht on alla kümne eksemplari, mis selgitab skeemis kasutatud lahenduste valikut.

1. Mõõtmismeetodite lühiülevaade

Enne erinevate mõõtmismeetodite võrdlemist on vaja kindlaks määrata mõõdetav vahemik. Siseroomides on CO₂ kontsentratsioon vahemikus 700 ... 2000 ppm [1](lk 66). Välikeskonnas on see number 1 ... 3 korda väiksem [1](lk 66). Seega on seadme väljatöötamisel eesmärgiks mõõtevahemiku äärmused 233 ... 2000 ppm.

1.1 Mittedispersiivne infrapunasensor

Ingliskeelne nimetus "Nondispersive infrared sensor" (NDIR). Koosneb kambrist, mis sisaldab mõõdetavat meediumi, infrapuna allikast ning infrapuna detektorist. Detektori valgusintensiivsus on võrdelises suhtes gaasi kontsentratsiooniga[2]. Täpne suhe mõõdetava valgusintensiivsuse ja gaasi kontsentratsiooni vahel on avaldatav Beer'i seadusega. Antud lahendus sobib CO₂ ning süsivesinike mõõtmiseks.

1.2 Elektrokeemiline gaasisensor

Elektrokeemilised gaasisensorid reageerivad huvipakkuva gaasiga ning tekitavad selle gaasi kontsentratsiooniga võrdelise pinget.[3]

Selle sensoritüübi väljundiks on analoogpinge väikese amplituudiga (kogu mõõteulatus vähem kui 100mV amplituudiga). Sellel sensoritüübil on vaja lisaahelat signaali võimendamiseks, mis paratamatult lisaks ebatäpsusi mõõtetulemusele. Samuti on seda tüüpi sensori negatiivseks küljeks vajadus kasutada küttelementi (mudeli MG811 puhul andmelehe[4] järgi on ainult küttelelemendi võimsustarve 1200mW).

1.3 Mõõtemeetodi valiku selgitus

Antud seadmesse sai valitud juhtelektroonikaga NDIR sensor. Antud mudel (EE893) täitis kõik nõudmised:

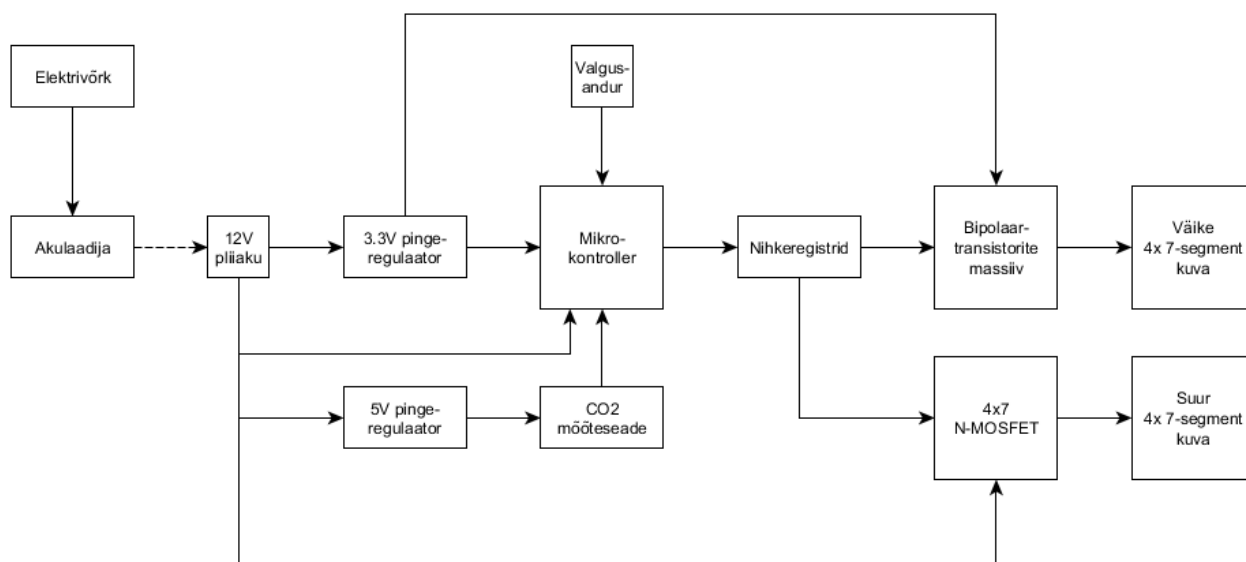
- mõõtevahemik on aktsepteeritav antud lahenduse jaoks ($< \pm (50\text{ppm} + 2\% \text{ mõõtetulemusest})$)[5])
- mõõteulatus katab nõutava vahemiku
- digitaalne väljund tagab selle, et mõõtevahemik ei saa suureneda väljaspool sensorit
- ei vaja küttelelemendi toitmist

2. Struktuurskeemi väljatöötamine

Seadme keskseks osaks on mikrokontroller. Kuna seade on ettenähtud toituma tänavavalgustuse toiteahelast, on seadme koosseisu projekteeritud ka aku tagamaks töö ööpäevaringselt. Aku laadimisega tegeleb ülejäänud seadmest sõltumatult täisautomaatne akulaadija.

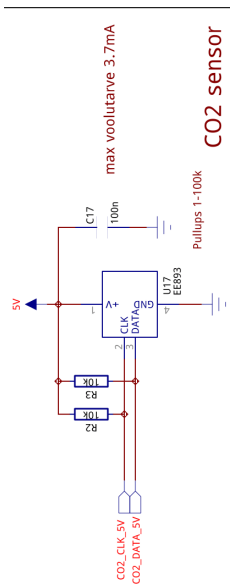
Pliiakust nimipingega 12V saadavast pingest luuakse mikrokontrolleri, loogika ning mõõtemooduli jaoks 5V ja 3.3V. Peamiseks mikrokontrolleri tööülesandeks on näidu lugemine CO₂ mõõtemoodulist ja selle edastamine nihkeregistritesse. Kõrvalülesandena reguleeritakse kuva heledust vastavalt aku laetusetasele ning väliskeskonna valgusintensiivsusele.

Kuva juhtimiseks on kasutatud nihkeregistreid, mille väljunditesse on ühendatud vastavale võimsusele sobivad lülituselemendid.

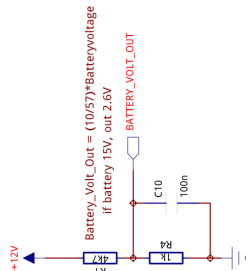


Joonis 2.1: Seadme struktuurskeem

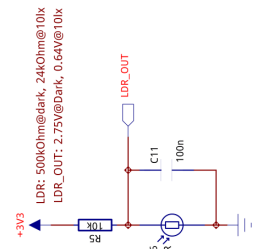
Struktuurskeemil märgitud akut ega täisautomaatset akulaadijat lõputöös ei käsitleta, kuna need on valmiseadmed ja lõputöö kirjelduses vähese tähtsusega.



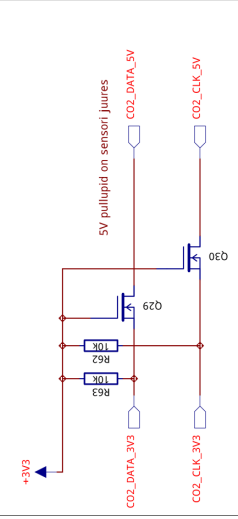
CO2 sensor



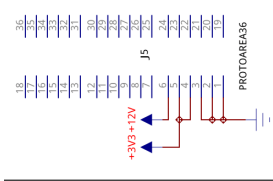
Battery voltage



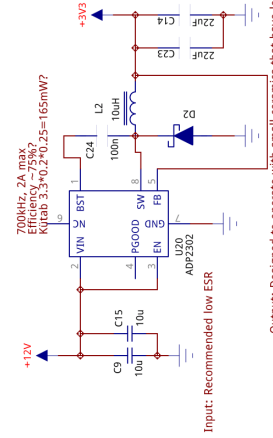
Light sense



Logic level converter

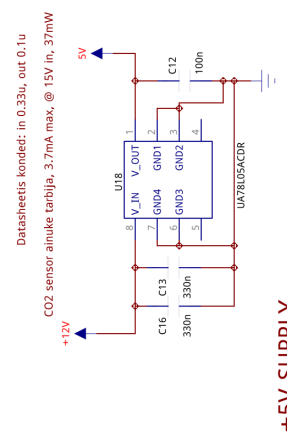


PROTDAREA36

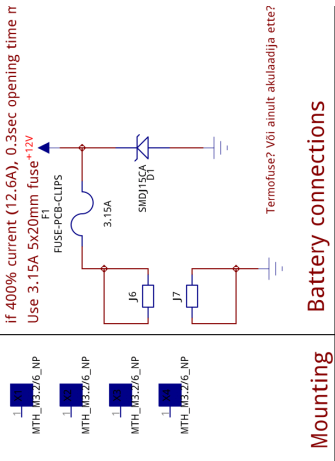


+3.3V POWER SUPPLY

Output: Designed to operate with small ceramics that have low ESR



+5V SUPPLY



Mounting

Termofuse? Või ainult akulaadija ette?

Battery connections

| | | | | | |
|------------------------------------|--|------------------------------|--|-----------------------------|--|
| Sheet Name: POWER/MCU | | Drawing no: <Drawing Number> | | Version | |
| Customer: <Customer Name> | | DRAWN: Deny Aron 16.06.2014 | | Last saved date: 22/07/2014 | |
| Project: CO2 | | CHECKED: <Checked By> | | PAGE 2 OF 2 | |
| Product/module: <Product Name> | | Q/C: <QC By> | | RELEASED: <Release Date> | |
| Confidentiality: <Confidentiality> | | Size: A3 | | | |

3.1 Komponentide nimekiri

| Kogus | Tähistus | Toote nimi | Väärtus | Tarnija | Kirjeldus | Hind [€], km- ta, 1tk | Hind [€] km- ta kokku | Märkused |
|-------|-------------------------|-------------------|---------|--------------|--|--------------------------|--------------------------|---|
| 4 | U1-4 | 74LV4094PW | | Farnell | 8-bitine nihkeregister | 0,94 | 3,76 | |
| 1 | U11 | 78M05 | 5V | Farnell | Lineaarne pingeregulaator | 7,92 | 7,92 | |
| 1 | U20 | ADP2302 | | Farnell | Pinget vähendav regulaator | 1,92 | 1,92 | |
| 30 | Q1-30 | AO3402 | | Farnell | N-kanali MOSFET | 0,18 | 5,37 | |
| 2 | J6-7 | BLADE_CONN | | Farnell | "Blade" tüüpi pistik | 7,92 | 15,84 | |
| 2 | C14 C23 | C080610U,22uF,20% | 22uF | Farnell | SMD 1206 kondensaator, 20% | 0,41 | 0,82 | |
| 14 | C1-8 C10-12 C17 C19 C24 | CAP-0603 | 100n | Farnell | SMD 0603 kondensaator, 20% | 0,07 | 0,97 | |
| 2 | C13 C16 | CAP-0603 | 330n | Farnell | SMD 0603 kondensaator, 20% | 0,04 | 0,09 | |
| 2 | C9 C15 | CAP-1210 | 10u | Farnell | SMD 1210 kondensaator, 20% | 0,80 | 1,60 | |
| 1 | U17 | EE893 | | Elfa | CO2 mõõtemoodul | 114,00 | 114,00 | |
| 1 | F1 | FUSE-PCB-CLIPS | | Farnell | Kaitsmepesa 1.25 X .25" kaitsmele | 0,67 | 0,67 | |
| 1 | F2 | FUSE 3.15A | 3.15A | Farnell | Kaitse, 3.15A | 0,64 | 0,64 | Paigutada pesasse F1. 25V min. |
| 1 | L2 | INDUCTOR_NR3015T | 10uH | Farnell | SMD induktor 3*3*1.5mm | 0,35 | 0,35 | |
| 1 | R6 | LDR | 500k | Farnell | Valgustundlik takisti | 0,41 | 0,41 | |
| 4 | D4-7 | SA56-11EWA | | Farnell | 14.2mm 7-segment, ühine anood | 1,09 | 4,36 | |
| 1 | U9 | LPCXPRESSO1115 | | Farnell | LPCXpresso1115 Cortex-M0 mikrokontroller | 21,28 | 21,28 | |
| 4 | J1-4 | MINIFIT_14PIN | | Farnell | "Minifit" tüüpi pesa | 1,91 | 7,64 | |
| 5 | R2-3 R5 R62-63 | RES-0603 | 10k | Farnell | SMD 0603 takisti, 1% | 0,02 | 0,11 | |
| 1 | R4 | RES-0603 | 1k | Farnell | SMD 0603 takisti, 1% | 0,10 | 0,10 | |
| 28 | R35-61 R65 | RES-0603 | 330R | Farnell | SMD 0603 takisti, 1% | 0,02 | 0,50 | |
| 28 | R7-34 | RES-0603 | 47k | Farnell | SMD 0603 takisti, 1% | 0,04 | 0,98 | |
| 1 | R1 | RES-0603 | 4k7 | Farnell | SMD 0603 takisti, 1% | 0,01 | 0,01 | |
| 1 | D1 | SMDJ15CA | 24.4V | Farnell | TVS diod 15VWM 24.4VC SMD | 0,51 | 0,51 | |
| 1 | D2 | SSB43 | | Farnell | Schottky, 4A, 30V | 0,54 | 0,54 | |
| 4 | U5-8 | ULN2003 | | Farnell | Darlingtonide massiiv, ühine emitter | 0,72 | 2,88 | |
| 1 | PCB | PCB | | Brandner | Trükkplaat, 220x80mm | 273,80 | 273,80 | 4 kihiline, FR4, 35 µm Cu, 1,6 mm, ENIG |
| 4 | X1-4 | MTH_M3.2/6_NP | | | Montaaži auk | | 0,00 | Ladumisel mitteamvestada |
| 1 | J5 | PROTOAREA36 | | | Prototüüpimisala | | 0,00 | Ladumisel mitteamvestada |
| 1 | | RECB320 | | Autokaubad24 | Täisautomaatne akulaadija | 91,60 | 91,60 | Ladumisel mitteamvestada |
| 1 | | EP90 | 12V | Akukeskus | Pliiaku, tootja Electric Power, 90Ah | 71,20 | 71,20 | Ladumisel mitteamvestada |
| | | | | | | Kokku: | 629,87 | [€] |
| | | | | | | Kokku koos KM-ga: | 755,84 | [€] |

4. Mikrokontroller LPC1115

Suhtlemiseks mõõtemooduliga ning tulemuse kuvamiseks oli vajadus lisada seadmele mikrokontroller. Mikrokontrolleri valik oli minimaalselt piiritletud ning vajadus jõudluse järgi oli madal. Ülesannet oleks võinud täita enamiku 8-bitiste mikrokontrolleritega (Microchip PIC, Atmel AVR, Intel 8051 jne).

Valitud kontroller, 32-bitine ARM arhitektuuriga LPC1115, on oma võimekuse poolest antud projekti jaoks suure varuga, aga valik sai tehtud eesmärgiga tutvuda 32-bitiste ARM protsessoritega. Mugavamaks arendamiseks sai valitud üksiku mikroskeemi asemel LPCXpresso1115 moodul, mis sisaldab endas peale kontrolleri ka riistvara hõlpsamaks tarkvara üleslaadimiseks ning silumiseks (debug).

Akupinget jälgitakse mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduriga. Selle eesmärgiks on kaitsta akut liigtühjenemise eest ja pikendada seadme kasutatavuse kestvust lugemismugavuse arvelt. Kuna antud lahenduses ADC täpsus ei ole kriitiline, on referentspinge võetud kontrolleri 3.3V toiteahelast. Sellest tulenevalt on kõrgeim mõõdetav väärtus samuti 3.3V. Kõrgeim ennustatav pinge, mida soovime mõõta, on 16.0V (laadimisel, täis olekus)[6]. Eesmärkidega kaitsta kontrollerit ootamatute olukordade eest üledimensioneerides mõõtevahemikku, sai pingejaguriga määratud suurimaks mõõdetavaks pingeks 18.81V.

Seade sisaldab ka loogikaläve muundureid, sest LPC1115 töötab 3.3V pingel ja E2 suhtlus toimub 5V pingel.

5. Süsihappegaasi mõõtemoodul EE893

Süsihappegaasi mõõtva elemendi valik sai langetatud antud mudeli kasuks, kuna lihtsamate gaasisensorite puhul oli mõõteviga piisavalt suur, et nende valik ei olnud otstarbekas. Samuti aitas see saavutada suuremat täpsust, kuna kõik analoogarvutused on tehtud mooduli sees, mis suurendas häirekindlust. Antud mudeli puhul oli valida 3 variandi vahel, mõõteulatusega 2000, 5000 ja 10000 ppm. Võttes arvesse, et eeldatav mõõtetulemus linnaõhus jääb vahemikku 100 ... 1000 ppm [7], sai valitud mudel ulatusega 0 ... 2000 ppm. Seda valikut õigustab ka asjaolu, et suurema ulatusega kasvas ka mõõteviga [5].

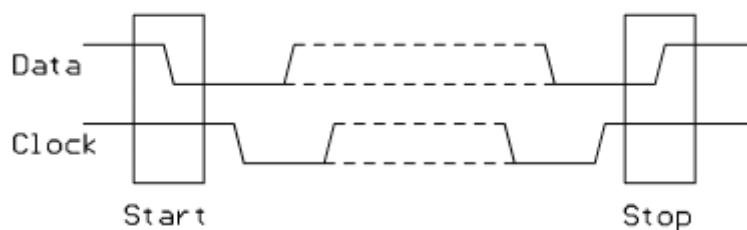
5.1 Protokoll E2

Suhtlus mõõtemooduliga käib E2 protokolliga [8] alusel, mis üldjoontes kattub I²C protokolliga, kuid peamiseks erinevuseks on aadressibittide arv ning suhtluskiirus.

Kuigi LPC1115 omab sisseehitatud I²C kontrolleri, mida oleks tõenäoliselt saanud kasutada E2 protokolliga jaoks, jäi see rakendamata. Selle asemel sai tarkvaras realiseeritud järjestikliides. Kuna varasem kokkupuude I²C protokolliga puudus, sai valitud see lahendus eesmärgiga protokollidega tutvuda.

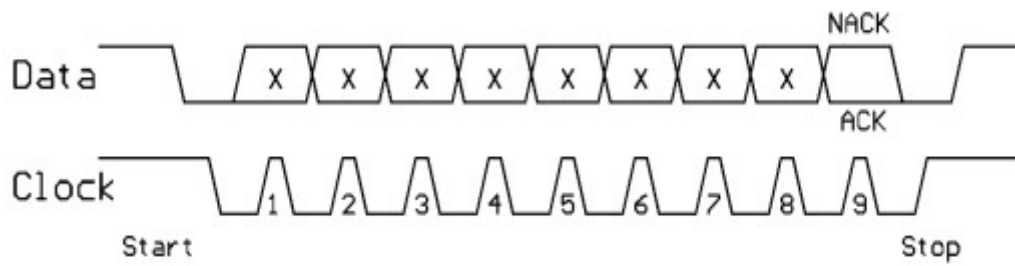
Liinile ühendatud osapooled jaotuvad kaheks: master ja slave. Ühel liinil võib olla vaid üks master rolli täitev seade, aga mitu slave seadet. Iga seade mis täidab slave rolli omab aadressi. Erinevate aadresside korral on võimalik ühel liinil pöörduda mitme seadme poole teineteisest sõltumatult.

Vaikeolekus on liinid seatud kõrgeks kasutades takisteid, mis on paigutatud liini ja toitepinge vahele. Suhtluse teostamiseks on osapooled varustatud lülituselementidega, mis lühistavad liini maaga. Kellatakte teostab vaid master, kuigi slave tohib aeglustada kella, hoides liini madalana kuni on valmis suhtlust jätkama. Andmeliini olekut võib muuta ainult olekus, kus kellaliin on madalale olekus. Vastupidiseid tegevusi kasutatakse suhtluse alustamise ja lõpetamise signaliseerimiseks.



Joonis 5.1: E2 suhtluse algus- ja lõppkonditsioonid

E2 on järjestikliides, see tähendab, et andmeid saadetakse ühe biti kaupa, vanem järk enne ning peale igat baiti vastuvõtja kinnitab eduka vastuvõtmise. Andmeliini olek seatakse paika ja selle järel lülitatakse kellaliin hetkeks kõrgeks. Sel hetkel teab teine osapool, et liinil olev väärtus on õige ning loeb biti väärtuse. Eduka saatmise kinnitus on teostatud madala bitina. See tagab selle, et lahtine liin, kus puudub slave kellega üritatakse suhelda, annab alati veateate.



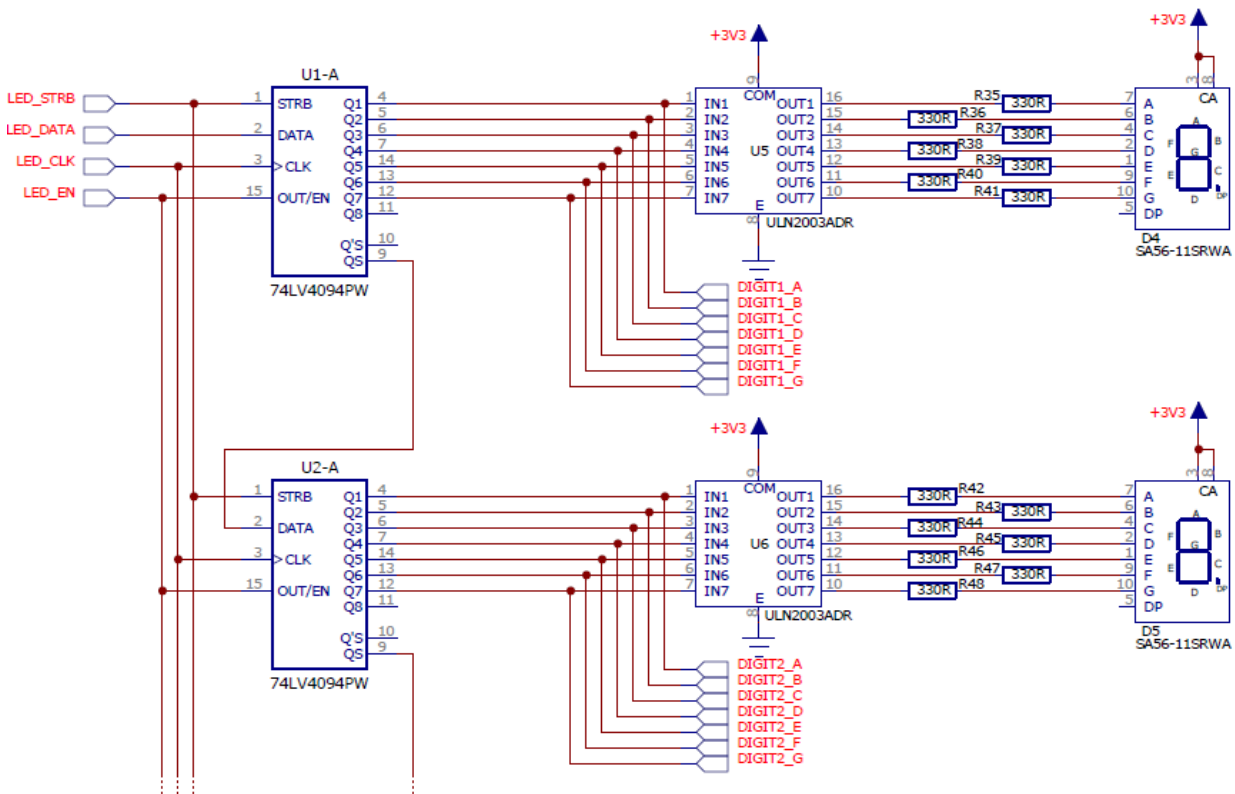
Joonis 5.2: E2 baidi edastamine

E2 protokoll näeb ette kellaliini lülitamist sagedusvahemikus 500 ... 5000 Hz.

Järgnevaid kihte antud lõputöös põhjalikult ei käsitleta, kuna see ülesanne on lahendatud tarkvaras.

6. Kuva

Kuva juhtimiseks on kasutatud nihkeregistreid, et vähese mikrokontrolleri väljundite arvuga kõik kuvasegmendid üheaegselt töös hoida. Kuva on dubleeritud: suur kuva, mida kasutatakse lõpptootes ning väike, mida kasutatakse arendustegevuse käigus (lõpptootel monteerimata).



Joonis 6.1: Kuva nihkeregistrid ning väike kuva

Antud lahenduses ei ole kasutatud dünaamilist juhtimist, sest sellega väheneks veakindlus. Saavutamaks maksimaalset heledust dünaamilise juhtimise korral on vaja suurendada valgusdiodide voolu üle nimivoolu, mis omakorda tarkvara seiskumise korral võib põhjustada kuvaelementide kahjustamist. Seade peab olema loetav eredas päevavalguses ning ei ole nõutud, et kuva oleks uuendatav tihedamini kui kord sekundis, seega nihkeregistrid olid aktsepteeritav valik.

Nihkeregistrid on kasutusel vaid eesmärgiga muuta kontrollerist väljastatav jadainfo paralleelseks. See tähendab, et ka prototüübi kuva jaoks on jõulülitused eraldi, kuna 74LV4094 andmelehes [9] on märgitud suurimaks lubatud väljundvooluks 25mA ning kogu integraalskeemi vooluks 50mA. Kasutatud 7-segment indikaatori SA56-11SRWA andmelehes [10] olev graafik näitab, et 2 ... 20mA voolu korral jääb valgusdiodi pingelang 1.7 ... 1.9V vahemikku. Võttes arvesse ULN2003 kollektor-emitter pingelangu, mis on maksimaalselt 1.2V 100mA juures (andmeleht[11], lk 6) arvutame voolu. Halvimal juhul, ehk 1.7V valgusdiodi pingelanguga, saame 330 oomise takistiga segmendi vooluks

$$I_{SEG} = (U_{TOIDE} - U_{ULN2003} - U_{LED}) : R = (3.3 - 1.2 - 1.7) : 330 = 1.21 (mA)$$

Andmelehes olev teine graafik viitab lineaarsele suhtele voolu ja valgustugevuse vahel.

Arenduseesmärkidel (siseruumide tingimused) on absoluutselt maksimumist (30mA) 4% heledus täiesti piisav.

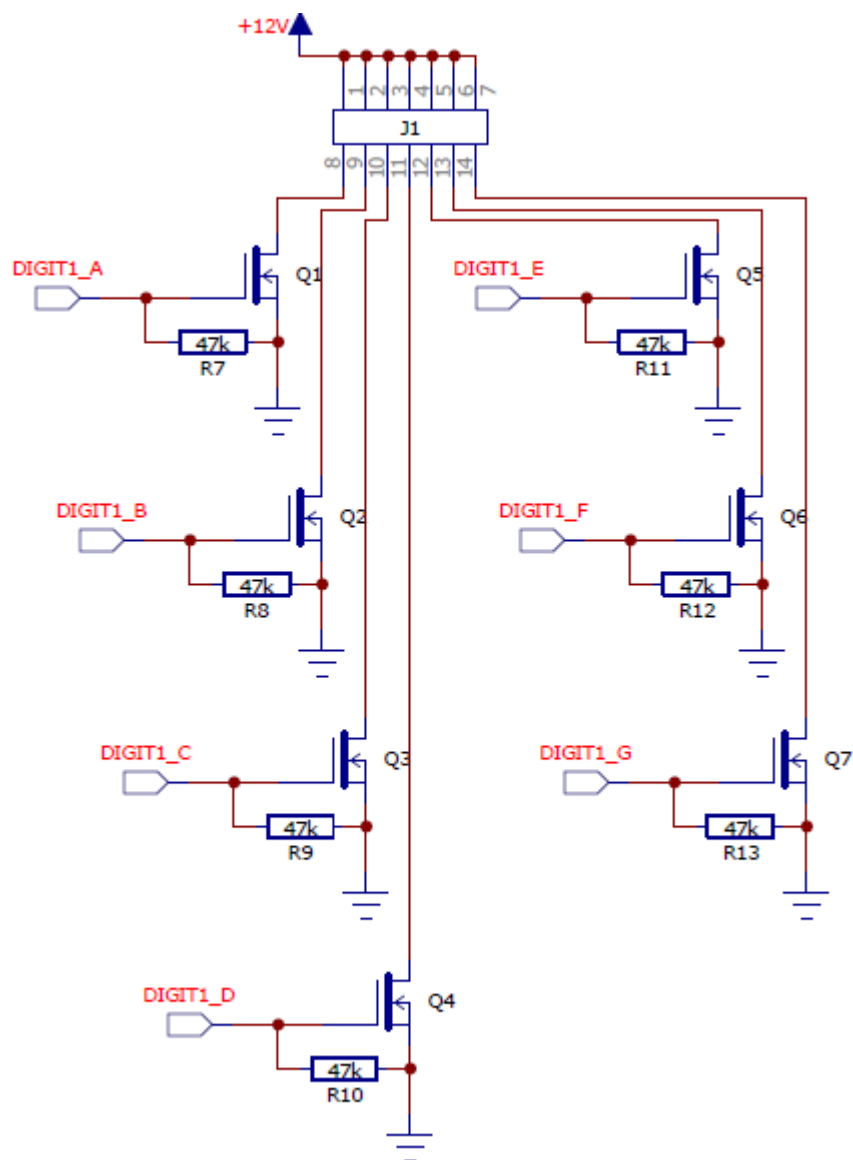
Kuna kõikide segmentide summaarne voolutugevus (nelja 7-segment elemendi korral)

$$I_{SEG\ SUMMA} = n_{NUMBRID} \cdot n_{SEGMENDID} \cdot I_{SEG} = 4 \cdot 7 \cdot 1.21 = 33.88 (mA)$$

ületab rohkem kui kahekordselt nihkeregistri suurimat lubatud voolu, sisaldab skeem ULN2003A NPN-tüüpi Darlington transistorite massiive. Nende skeemi lisamine ei vaja rohkem väliseid komponente, kuna valitud 7-segment indikaatorid on ühise anoodiga, ning ühendades massiivi kollektorid valgusdiodide katoodehelasse on meil kergem viia transistorid küllastusse (bipolaartransistori puhul: mõlemad siirded on päripingestatud[12](lk 37).

Nihkeregistrite EN (väljundi lubamine) ühendusega saame viia väljundid kõrgeimpedantsilisse olekusse (high-Z), millega jääb võimalus kõik segmentid korraga välja lülitada. Seda saame rakendada kuva heleduse tüürimiseks pulsilaiusmodulatsiooniga (PWM).

Prototüüpimiskuva on toidetud mikrokontrolleriga samast 3.3V ahelast ning suure kuva segmente toidetakse pliiaku pingega.



Joonis 6.2: Suure kuva ühe numbri lülitused

Suure kuva segmentide lülitamiseks on kasutatud N-kanaliga MOSFET transistore AO3402. Transistoride paisu tüürid on niikeregistrid ning paisude ja lätete vahele on paigutatud 47kOhm takistid tagamaks transistoride sulgumise niikeregistri väljundite kõrgeimpedantsilise oleku korral. AO3402 andmelehes [13] on märgitud 2.5V paisu-lätte pinge korral neelu-lätte takistuseks vähem kui 85mOhm. Antud lahenduses on paisu-lätte pingeks 3.3V, seega on oodata väiksemat takistust. Soojusarvutus on tehtud üledimensioneeritud 1A neeluvoolu juures, mis annab maksimaalseks võimsuskaoks:

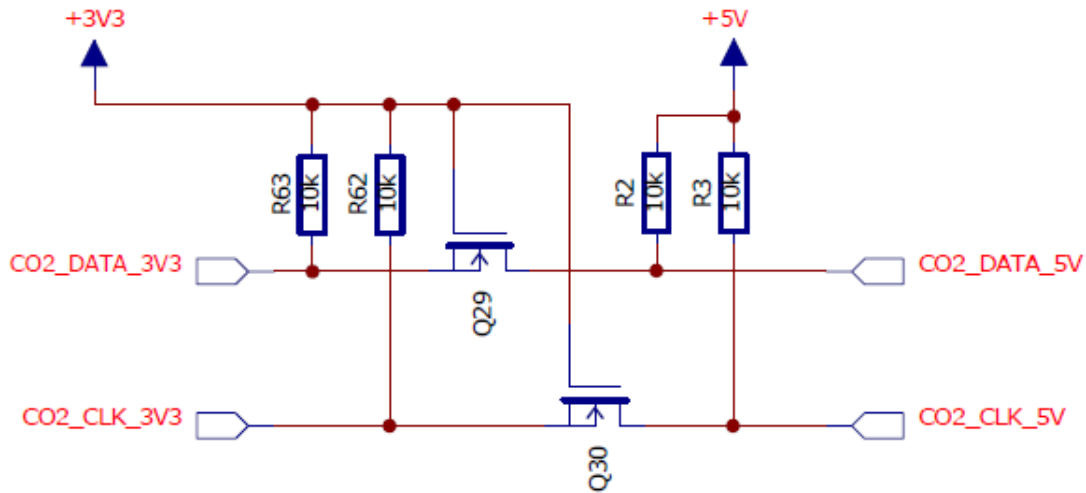
$$P_{KADU(MOSFET)} = I_{D(MOSFET)}^2 \cdot R_{DSon} = 1^2 \cdot 0.085 = 85 (mW)$$

ning tingimusel 125°C/W tekitab see 10.6°C temperatuurikasvu.

Kasutatavad kuvasegmenid ühendatakse seadme külge tootja Molex "Minifit" pesaga. Mugavamaks kaablite ühendamiseks on igale segmendile välja toodud ühine toiteühendus eraldi.

6.1 Loogikaläve muundurid

E2 protokollriistvarakiht on teostatud takistitega, mis hoiavad liini kõrge ja lülituselementidega, mis hoiavad liini madalana, seega saame kasutada loogikalävede teisendamiseks skeemi kahe N-kanaliga MOSFETiga (AO3402) ning mõlemale poolele lisades takistid mis hoiavad liini vaikeolekus ettenähtud pingega kõrgel nivool.



Joonis 6.3: Loogikaläve muundur

Muunduri tööpõhimõte:

Kui üks pool lühistatakse maaga, siis mõjub see ka teisele poolele. Ühel juhul, kui madalale nivoole seatakse kõrgema pingega pool, avaneb vastuvooludiod. Teisel juhul, kui madalale nivoole seatakse madalama pingega pool, on pinge transistori paisul kõrgem kui lättel ja transistor avaneb, lühistades teise poole samuti madalale nivoole.

7. Toitepingete moodustamine

Seadme toiteosa, mis on ette nähtud toituma 12V nimipingega pliiakust, reguleerib sellest 3.3V ja 5V.

Trükkplaadi toitesisendis on kasutatud blade-tüüpi ühendusi ja toiteahel on kaitstud ülekoormuse eest sulavkaitsme ning ülepinge eest unipolaarse TVS diodiga.

7.1 Regulaator väljundiga 5V

Ainuke tarbija 5V liinil on CO₂ mõõtemoodul EE893, mille andmelehes [5] on märgitud keskmiseks tarbimiseks 15s mõõteintervalli korral 3.7mA. Selle tarbimise juures soojuskaot väike suurus õigustas lineaarregulaatori kasutamist. Soojuskaot oli:

$$P_{KADU(LINEAARREGULAATOR, 5V)} = (V_{SISSE} - V_{VÄLJA}) \cdot I_{5V} = (12 - 5) \cdot 3.7 \cdot 10^{-3} = 25.9(mW)$$

Samuti oli märgitud mõõtmise keskmiseks vooluks 120mA 350ms perioodi jooksul 350mA tipuga. Algselt prototüüpimise käigus tuli välja, et 100mA väljundvooluga lineaarregulaator UA78L05 koos 4700uF väljundkondensaatoriga sinna ei sobi. Põhjuseks oli tekkiv pingelang mõõtmishetkel, mis põhjustas EE893 poolse suhtluse katkestamise. Pingelanguks oli:

$$\Delta U = \Delta t \cdot (I_{VÄLJA} - I_{SISSE}) : C = 0.350 \cdot (0.12 - 0.10) : (4.7 \cdot 10^{-3}) = 1.49(V)$$

Sellest tulenevalt sai lõppskeemis kasutatud LM78M05, mille väljundvooluks on 500mA.

Skeem pärineb lineaarregulaatori andmelehes [14] pakutud tüüplahendusel. Väljundkondensaatoriks on kasutatud andmelehes soovitatud 100nF, aga 330nF sisendkondensaator sai dubleeritud, kompenseerimaks keraamilise kondensaatori mahtuvuse pöördvõrdelist muutust kondensaatorile rakendatud pinge suhtes.

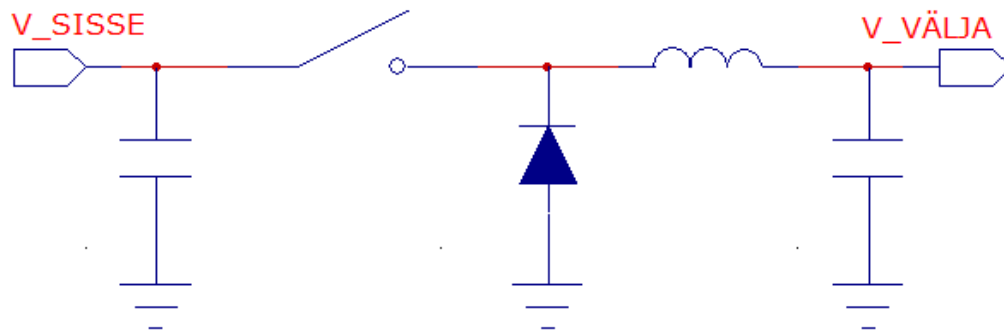
7.2 Regulaator väljundiga 3.3V

3.3V regulaatori valikul sai arvestatud maksimaalseks voolutarbeks 200 ... 300 mA. Väike kuva, mis on monteeritud ainult arenduse käigus kasutataval seadmel, tarbib maksimaalselt 150mA ja muu ettenähtav tarbimine (valgusandur, E2 liinid, mikrokontroller - 0.33 mA, 0.67 mA ja 3 mA vastavalt) jääb alla 10mA. Lineaarregulaator langes valikust välja, sest 200mA juures on soojuskadu lineaarse regulaatoriga:

$$P_{KADU(LINEAARREGULAATOR, 3.3V)} = (V_{SISSE} - V_{VÄLJA}) \cdot I_{3.3V} = (12 - 3.3) \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 1740(mW)$$

See suurus ei ole aktsepteeritav temperatuurikasvu tõttu. Kasutades näiteks LM7833, mille temperatuur muutub 65°C/W [15], tõuseks temperatuur 113,1°C võrra.

Alternatiiviks on pinget vähendav muundur.



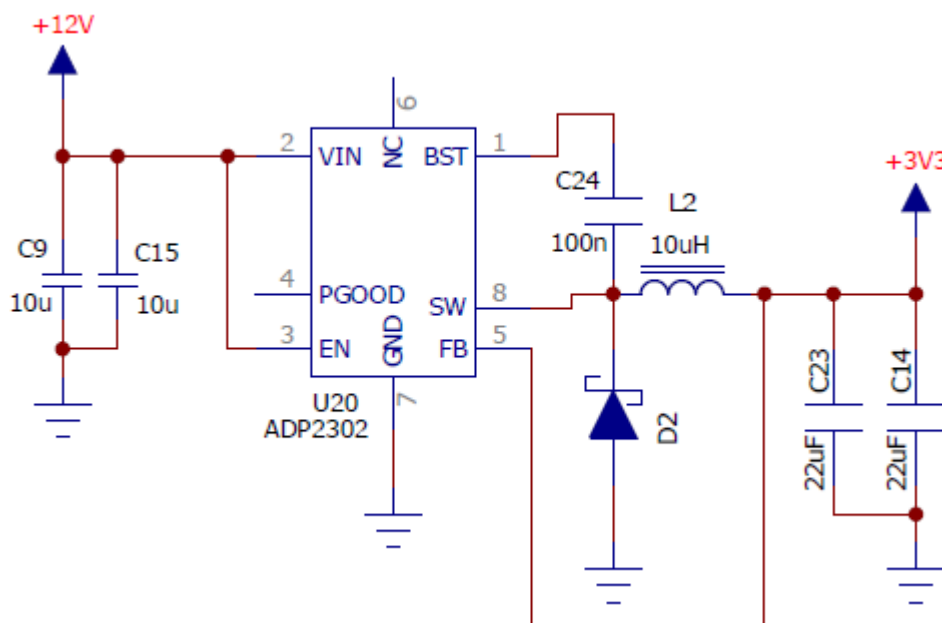
Joonis 7.1: Pinget vähendava muunduri topoloogia

Üldine pinget vähendava muunduri tööpõhimõtte (joonise 7.1 põhjal): sisend on ühendatud väljundiga läbi ühe induktori. Induktori ja sisendi vahele on paigutatud lülituselement. Suletakse vooluring avades lülituselement. See põhjustab voolu kasvu induktoris, mille tõttu hakkab väljundkondensaatoril pinge tõusma. Kui saavutatakse soovitud väljundpinge, suletakse lülituselement ning vool seda enam ei läbi. Induktori omaduse tõttu hoida voolu püsivana avaneb diod, ning vool induktoris sujuvalt väheneb. Suurema induktiivsuse korral on voolu muutus induktoris väiksem, mis tagab meile väiksema pulsatsiooni väljundis.

Kasutatud impulssstoitemuundur, mis on koostatud ADP2303-3.3 baasil, võimaldab maksimaalselt tarbida 2 A. Muundur on pinget vähendava topoloogiaga. Pinget vähendavate muundurite puhul võime oodata efektiivsust vahemikus 70 ... 95% [16](lk 11). Antud seadme andmelehe alusel võime oodata 200mA tarbimise juures kasutegurit 70 ... 80%. Võttes halvema juhu, ehk 70%, saame arvutada eralduva soojuse:

$$P_{KADU(MUUNDUR)} = (1 - KASUTEGUR) \cdot V_{VÄLJA} \cdot I = (1 - 0.70) \cdot 3.3 \cdot 0.2 = 198 (mW)$$

Andmelehest [17] näeme, et antud integraalskeemi temperatuur tõuseb 58.5°C/W, seega oodatav temperatuuritõus maksimaalsel koormusel on 11.6°C.



Joonis 7.2: Muundur 3.3V ahelale

Viimane tähelepanuväärne erinevus tavalisest pingest vähendavast muundurist ADP2302 puhul on BST (bootstrap) ühendus. Selle ühenduse ja lülituselemendi ning induktori vahele on ühendatud kondensaator. Mikroskeemi sees oleva vooluringi ja selle kondensaatori koostöös luuakse sisendpingest vähemalt 1.2V kõrgem pinge, millega juhitakse sisemist lülituselementi, milleks on N-kanaliga MOSFET. See võimaldab madalama sisendpingega saavutada sisemisele lülituselemendile vajalik lävepinge.

Sobiva induktiivsuse arvutamiseks kasutasin andmelehes pakutud valemit. Arvutustes on sisendpingeks kasutatud pliiaku nimipinget (12V).

$$L = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{0.3 \cdot I_{LOAD(max)} \cdot f_{sw}} \cdot \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN} + V_D} = \frac{12 - 3.3}{0.3 \cdot 2 \cdot 700 \cdot 10^3} \cdot \frac{3.3 + 0.4}{12 + 0.4} = 6.18 \cdot 10^{-6} [H] = 6.18 [\mu H]$$

Valemi selgitus:

| Tähistus | Selgitus | Ühik |
|-----------------|----------------------------|------|
| V_{IN} | Sisendpinge | [V] |
| V_{OUT} | Väljundpinge | [V] |
| $I_{LOAD(max)}$ | Suurim lubatud koormusvool | [A] |
| f_{sw} | Lülitussagedus | [Hz] |
| V_D | Diiodi pingelang | [V] |
| L | Induktiivsus | [H] |

Tabel 7.1: Induktiori valemi liikmete selgitus

Sai valitud 10 μH induktor, kuna suurema induktiivsusega ainuke kaasnev negatiivne külg on induktori suuremad füüsilised mõõtmed.

Diodiks (catch diode) sai valitud ADP2303 andmelehel soovitatud Schottky diod SSB43L. See on piisavalt kiire, et olla kasutatav 700kHz lülitussagedusel ning selle madal pingelang (0.4V) hoiab kaod väiksemad võrreldes tavalise ränidiodiga (pingelang 0.7V).

8. Trükkplaadi väljatöötamine

Trükkplaat on 4-kihiline ning selle ülesehitus on järgnev:

| Kiht | Kihi nimi | Tüüp | mm |
|------|---|--------------------------------------|-------|
| 1 | Väline vask | 18 μ m + GalvCu 35 μ m | 0.053 |
| | Isolatsioon | 7628-45 (0,18mm) | 0.180 |
| 2 | Sisemine vask | 35 μ m | 0.035 |
| | Alusmaterjal | High Tg 1,08mm 35 μ m/35 μ m | 1.080 |
| 3 | Sisemine vask | 35 μ m | 0.035 |
| | Isolatsioon | 7628-45 (0,18mm) | 0.180 |
| 4 | Väline vask | 18 μ m + GalvCu 35 μ m | 0.053 |
| | Materjali paksus (mm) \pm 10% | | 1.616 |

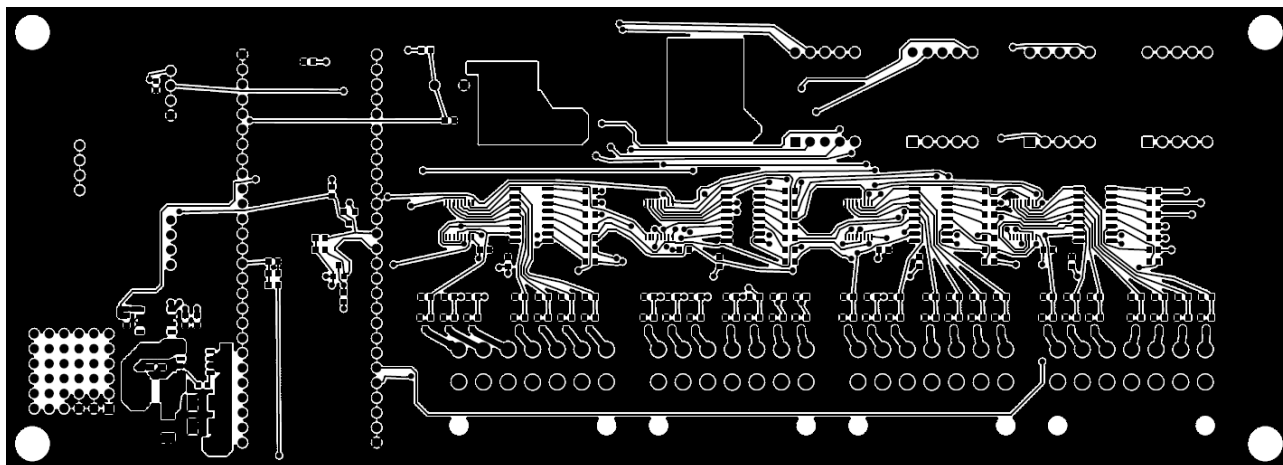
Tabel 8.1: Trükkplaadi ülesehitus

Kihid 1 ning 4 on kasutatud signaalide marsruutimiseks. Kiht 2 on kasutatud maa-kihina (valdavalt maaühendused) ning kiht 3 on toitekiht (valdavalt 3.3V).

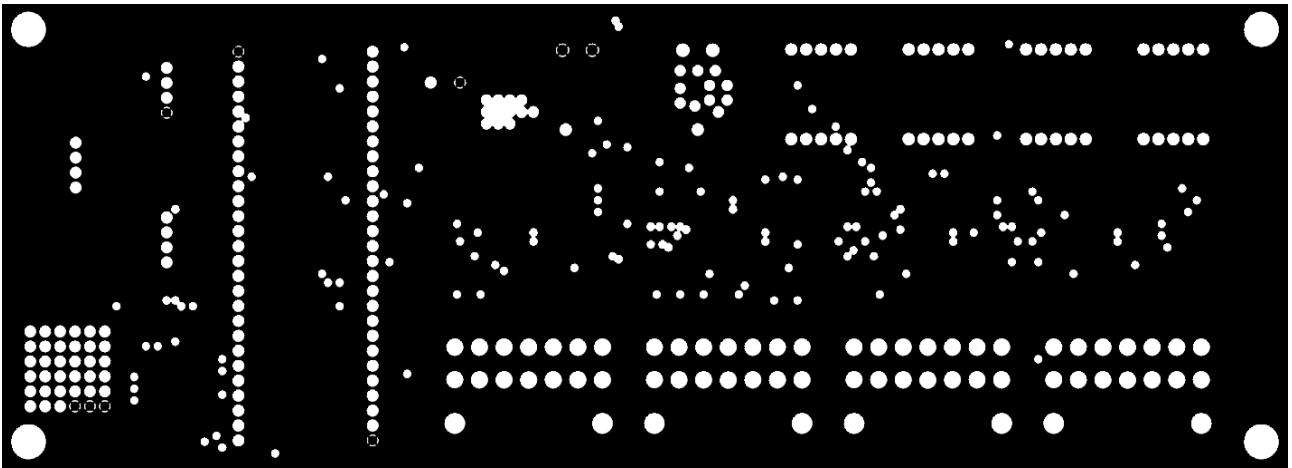
Trükkplaadi tootmisel on lisatud ka roheline jootemask ning ühepoolne valge siiditrükk. Jooteväljad on ENIG pinnakattega, mis on tavalise tinakattega võrreldes tasasem (muudab pindliite komponentide montaaži lihtsamaks) ning oksüdeerub vähem.

Seadme trükkplaadi väljatöötamiseks on kasutatud tarkvara PADS Layout ja PADS Router, tootjalt Mentor Graphics.

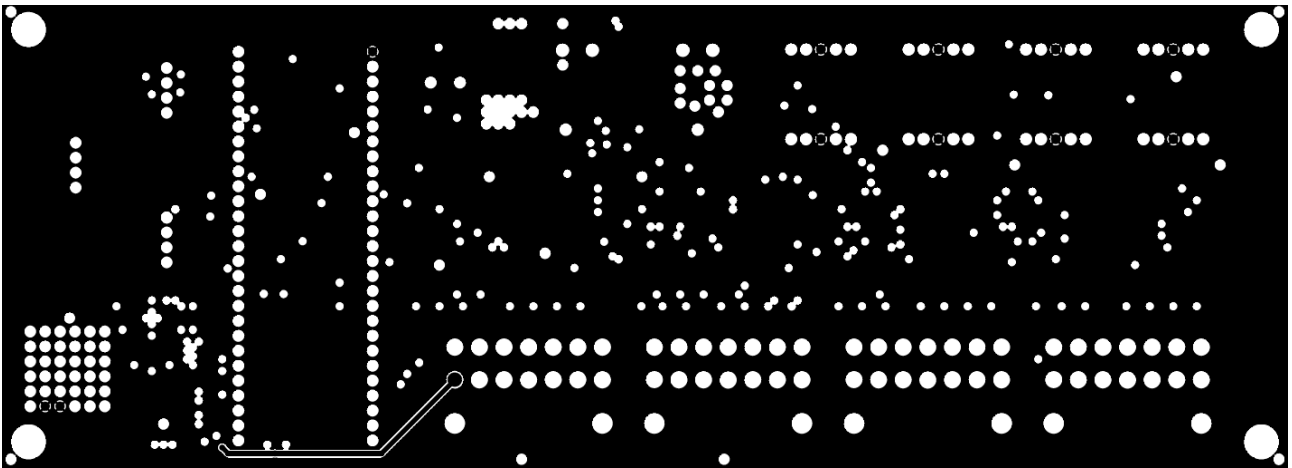
Trükkplaadile on lisatud ka prototüüpimisala, mis kujutab endast 6 x 6, 2.54mm sammuga välja läbiviikudega komponentide jootmiseks. Hõlpsamaks prototüüpimiseks on seal välja toodud toiteühendused: 3x maa, 2x 3.3V, 1x 12V



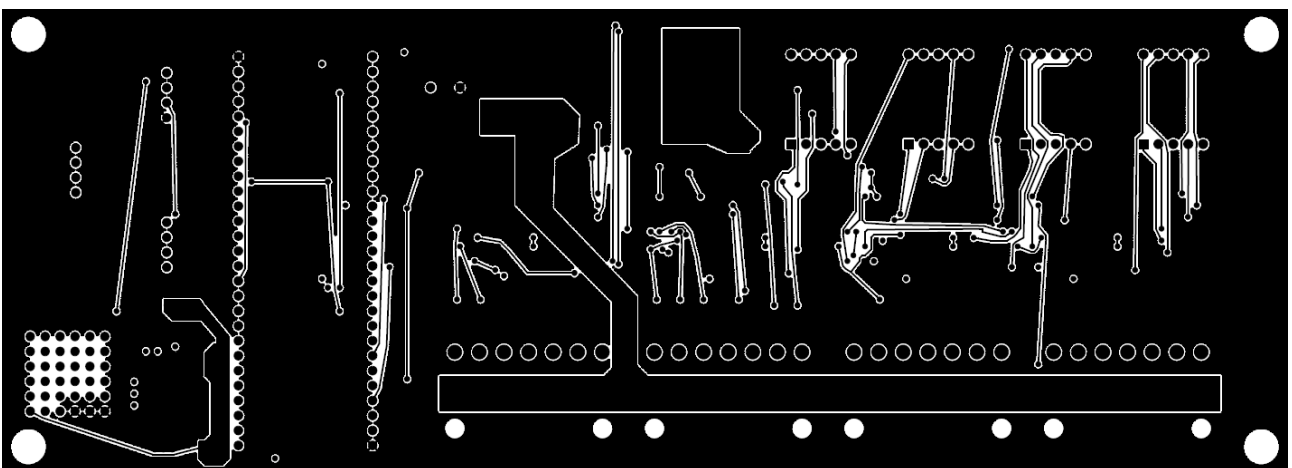
Joonis 8.1: Trükkplaadi pealmine kiht (1. kiht)



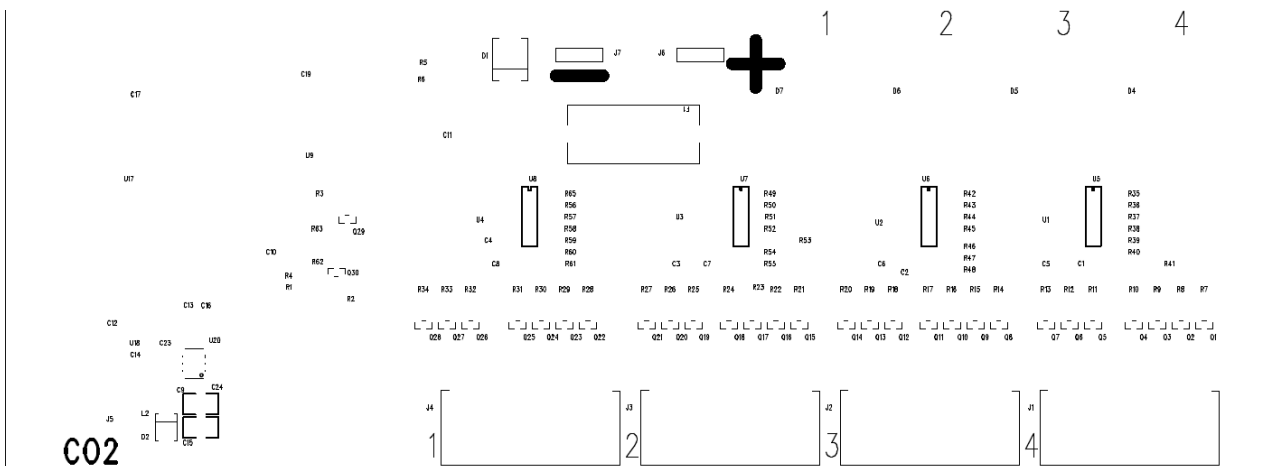
Joonis 8.2: Trükkplaadi maakiht (2. kiht)



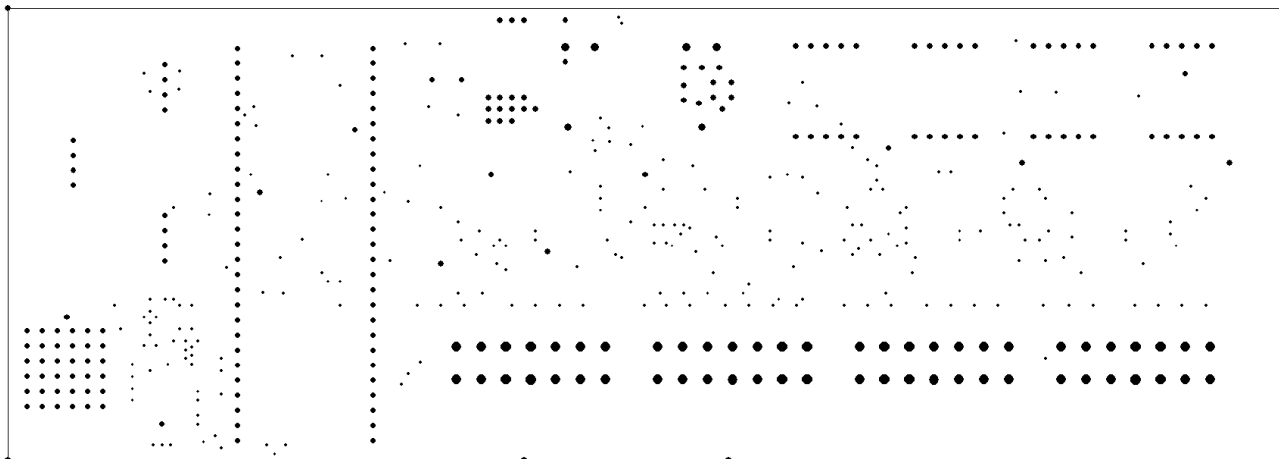
Joonis 8.3: Trükkplaadi toitekiht (3. kiht)



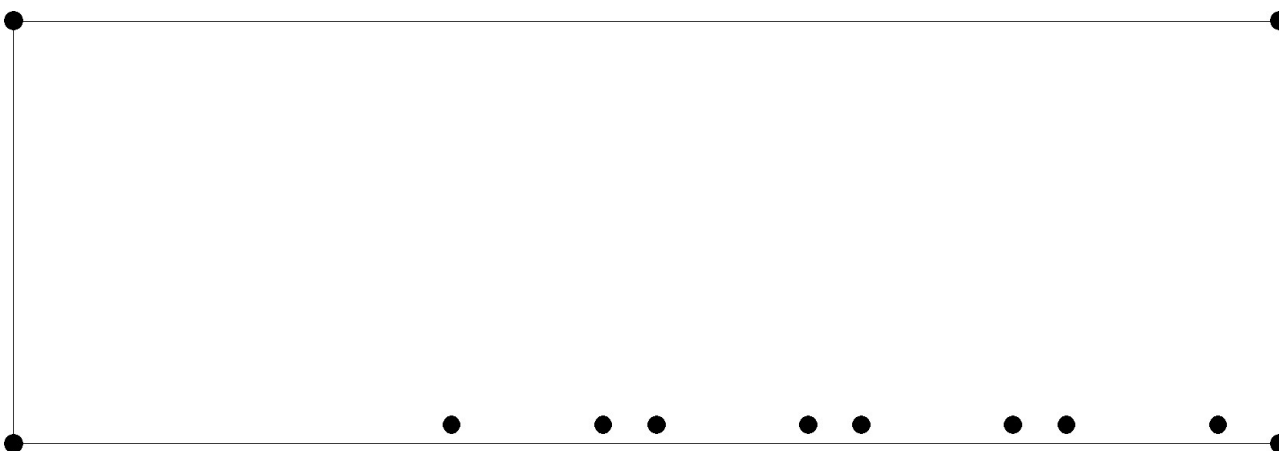
Joonis 8.4: Trükkplaadi alumine kiht (4. kiht)



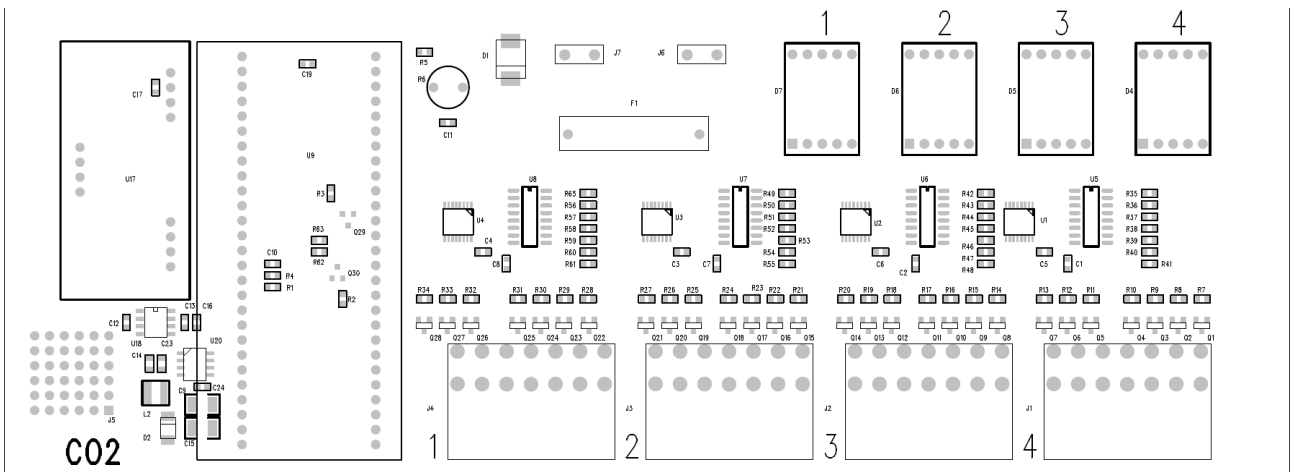
Joonis 8.5: Trükkplaadi siiditrükk



Joonis 8.6: Trükkplaadi läbivasestatud augud



Joonis 8.7: Trükkplaadi vasestamata augud



Joonis 8.8: Trükkplaadi montaažijuhis

9. Mikrokontrolleri tarkvara väljatöötamine

Tarkvara põhiprotsessideks on CO₂ sisalduse mõõtmine E2 protokolliga ning väärtuse keskmistamine, valgustugevuse mõõtmine, akupinge mõõtmine, CO₂ sisalduse kuvamine ning näidu heleduse reguleerimine.

9.1 Mõõtmine ning väärtuse keskmistamine

EE893 moodul on kasutusel kõige tihedama mõõtmisagedusega, seega sooritab see uue mõõtmise iga 15 sekundi tagant, senikaua edastab viimast mõõtetulemust. Et luua kasutajale illusioon seadme kiiremast reaktsioonist, küsitletakse seadet iga 1.5 sekundi tagant ja kuvatakse keskmist viimase 20 lugemi väärtustest.

9.2 Valgustugevuse mõõtmine

Valgustugevuse mõõtmine on lahendatud pingejaguriga, mille üheks komponendiks on valgustundlik takisti (LDR). Pingejaguri väljund on suunatud LPC1115 ühte analoog-digitaal-muunduri sisendisse.

9.3 Akupinge mõõtmine

Akupinge on jaotatud 4 astmeks.

| Pingetase | Pingevahemik | Koefitsient |
|-----------|-----------------|-------------|
| 0 | < 10.5 V | 0.00 |
| 1 | 10.5 ... 11.6 V | 0.25 |
| 2 | 11.6 ... 12.5 V | 0.50 |
| 3 | > 12.5 V | 1.00 |

Tabel 9.1: Kuva heleduse sõltuvus toitepingest

Valgusandurist saadud soovitatav heledus korrutatakse läbi koefitsendiga. Pingetasemel 0 lülitatakse kuva alati välja.

Aku pingetaseme jälgimine on lahendatud pingejaguriga, sest mikrokontrolleri mõõtevahemik on 0 ... 3.3V. Pingejaguri väljund on suunatud LPC1115 ühte analoog-digitaal muunduri sisendisse.

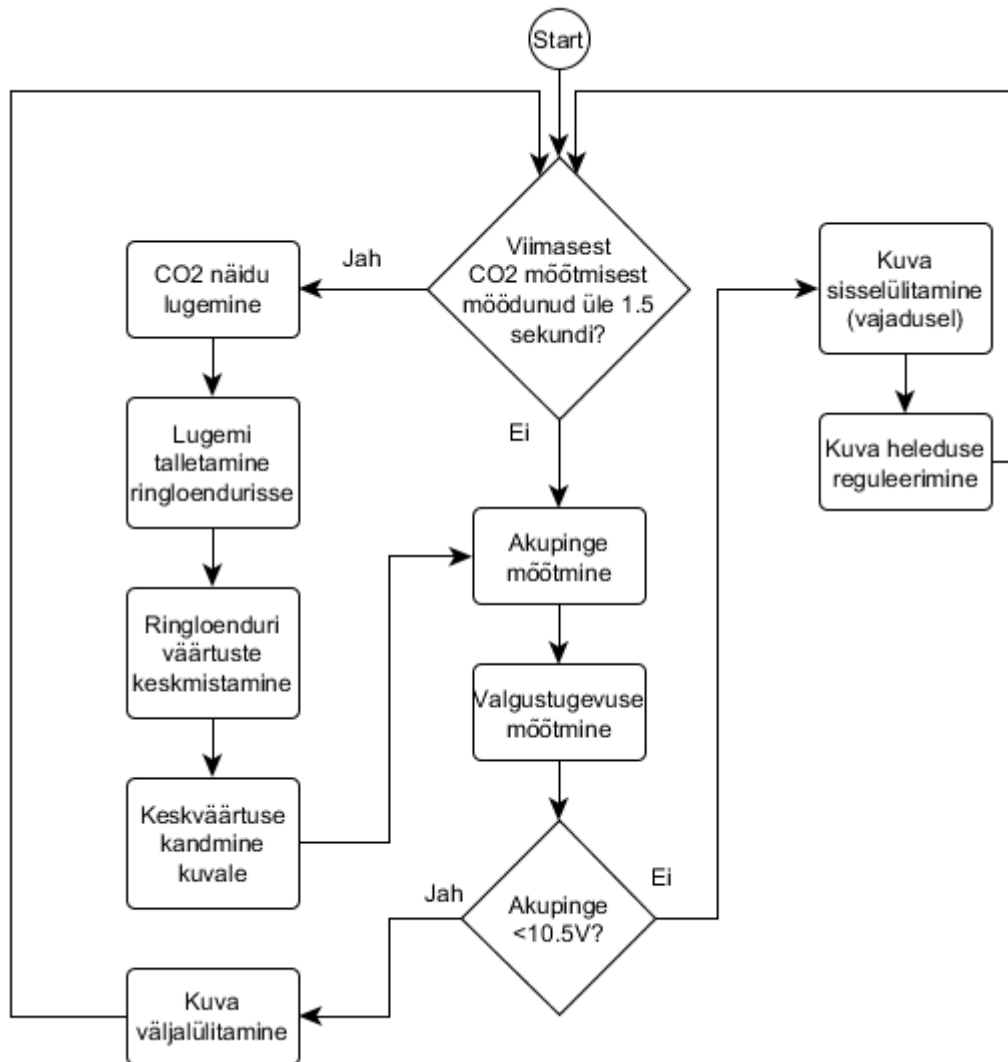
9.4 Süsihappegaasi sisalduse kuvamine

Nihkeregistritesse kirjutatakse ühekaupa sisse kuva segmentide olekud. Selleks seatakse DATA liinile viimase segmenti olek, antakse hetkeks CLK (clock) liinile signaal, seejärel DATA liinile eelviimase segmenti olek, antakse hetkeks CLK liinile signaal jne. Kui kõigi segmentide olekud on nihkeregistritesse kirjutatud, lülitatakse hetkeks STRB (strobe) sisendit, et lubada uued olekud väljunditesse.

9.5 Kuva heleduse reguleerimine

Kuva heledust reguleeritakse nihkeregistri EN (enable) sisendiga, mis lülitab madalas olekus nihkeregistri väljundid kõrge impendantsiga olekusse, mida seejärel väljundtransistorite pais-lätte takistid hoiavad madalana, peatades vool transistorites (mis tingib segmentide kustumise). EN sisendit lülitatakse kindla sagedusega, kuid selle kõrge-madal oleku suhet muudetakse tarkvaras.

9.6 Programmi algoritm



Joonis 9.1: Mikrokontrolleri programmi algoritm

Programmi tsükkel algab kontrolliga kas viimasest mõõtetulemuse lugemisest on möödunud üle 1.5 sekundi. Kui see periood on möödunud, siis võetakse mõõtemoodulist mõõtetulemus ning kantakse see ringloendurisse. Ringloenduri väärtus keskmistatakse ning tulemus kantakse kuvale. Ringloenduri vajadus on põhjustatud mõõtemooduli eripärast, milleks on minimaalne 15-sekundiline ajavahemik kahe mõõtmise vahel. Vahepeal korratakse viimase mõõtmise tulemust. Lahendus ringloenduriga aitab tekitada kasutajale illusiooni pidevamast mõõtmisest.

Peale mõõtetulemuse lugemist mõõdetakse akupinget ning valgustugevust. Kui akupinge langeb piisavalt madalale, et edasine tarbimine võib seda kahjustada, lülitakse kuva välja. Vastasel juhul, lülitatakse kuva vajadusel sisse ning selle heledust reguleeritakse vastavalt akupingele ning valgusintensiivsusele.

10. Väljatöötatud seadme katsetustulemused

Seadme prototüübiga on teostatud ka mõõtmisi. Iga mõõtmise puhul on võetud minutiliste vahedega 5 mõõtmistulemust.

10.1 Mõõtetulemused

Asukoht ja aeg: Pärnu rand, 9. mai 2015, 14:45

Tulemused:

- 487 ppm
- 446 ppm
- 437 ppm
- 398 ppm
- 445 ppm

Asukoht ja aeg: Pärnu kesklinn, 9. mai 2015, 15:30

Tulemused:

- 447 ppm
- 479 ppm
- 475 ppm
- 490 ppm
- 472 ppm

Asukoht ja aeg: Urge küla, Pärnumaa, 9. mai 2015, 16:35

Tulemused:

- 452 ppm
- 424 ppm
- 418 ppm
- 438 ppm
- 441 ppm

Asukoht ja aeg: Männipark, Tallinn, 14. mai 2015, 20:05

Tulemused:

- 398 ppm
- 389 ppm

- 401 ppm
- 374 ppm
- 380 ppm

10.2 Mõõtetulemuste analüüs

Kõik mõõtetulemused langevad kokku ennustatud vahemikuga (233 ... 1000 ppm). Antud mõõtmised on teostatud mõõtemooduli tehasekalibratsiooniga. Kalibreerides moodul täpse mõõteseadme järgi on võimalik täpsust parandada. Seadme võrdlemine kalibreeritud etalonseadmega osutus rahaliselt ebaotstarbekaks seadmete rendi suure hinna tõttu.

Kokkuvõte

Antud töö raames teostati riistvaraline ning tarkvaraline lahendus täitmaks püstitatud ülesannet. Esimese sammuna koostati ülesandepüstitus ja määratleti nõudmised. Sellele järgnevalt jaotati ülesanne osadeks ning osade omavaheline kokkusobivus märgiti üles kasutades struktuurskeemi. Selle alusel alustati riistvara arendusega, mille käigus loodi tööskeem, valiti komponendid, töötati välja trükkplaat ning monteeriti seadme prototüüp.

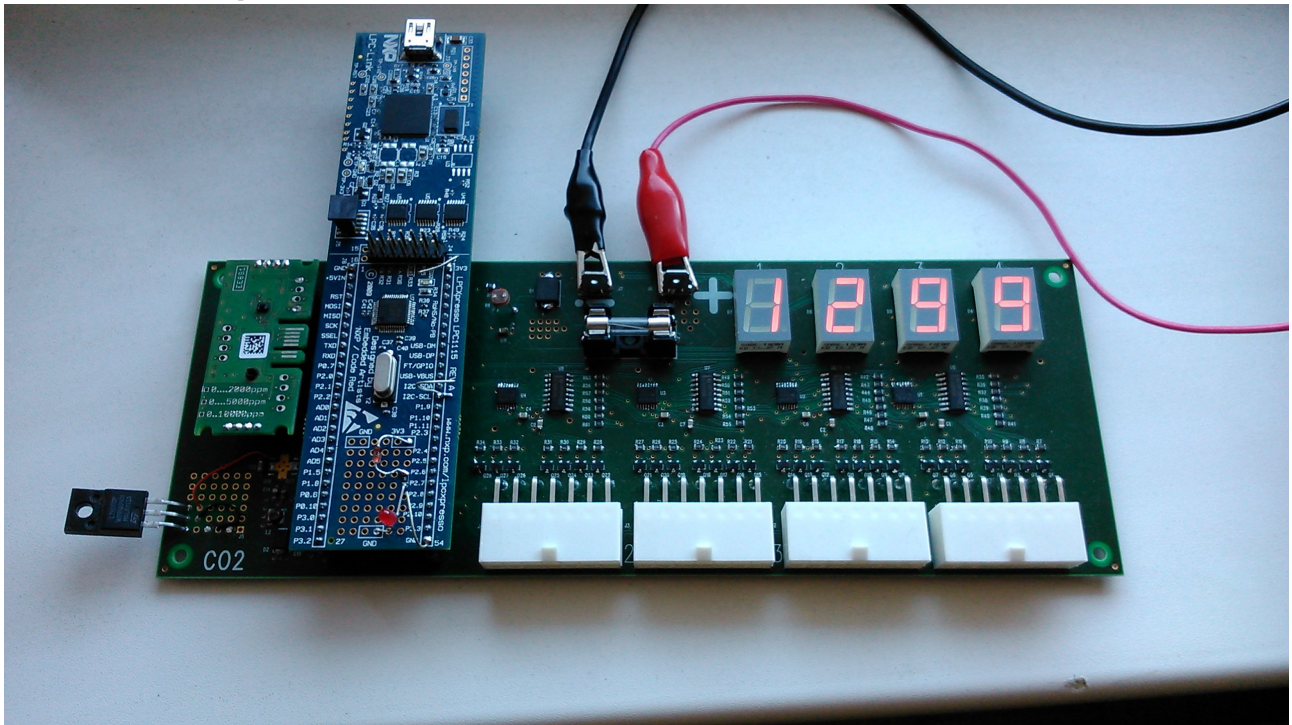
Peale riistvara valmimist, tarkvaraarenduse käigus, ilmnisid prototüübil mõningad toiteprobleemid. Antud probleemid said hõlpsalt lahendatud kasutades trükkplaadile lisatud prototüüpimisala. Peale paranduste elluviimist, kinnitas prototüüp valitud lahenduste toimimist ning seadme võimekust oma tööülesandeid täita, milleks oli süsihappegaasi sisalduse mõõtmine õhus ning selle kuvamine.

Kirjandus

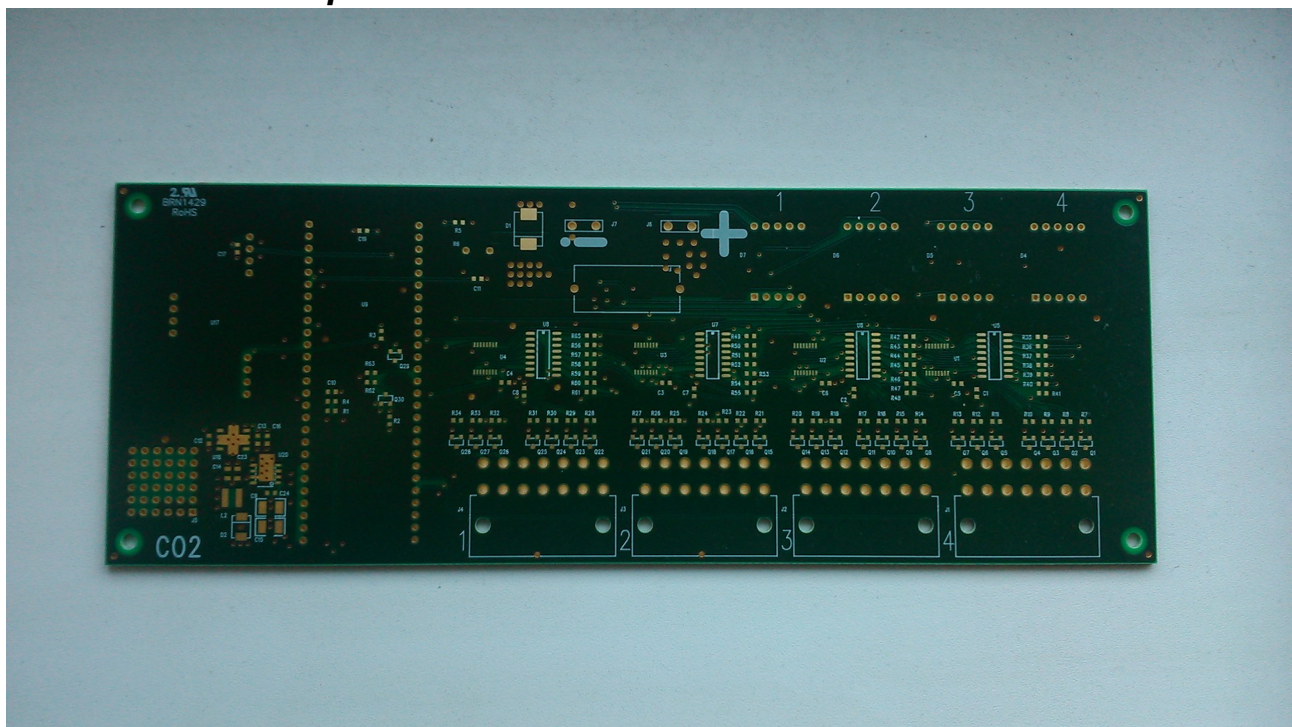
1. Austin, J., Brimblecombe, P., Sturges, W., Air pollution science for the 21st century, Elsevier Science Ltd., 2002
2. <http://www.intl-lighttech.com/applications/light-sources/ndir-gas-sensor-lamps>, 13.04.2015
3. <http://www.intlsensor.com/pdf/electrochemical.pdf>, 13.04.2015
4. <http://www.cooking-hacks.com/skin/frontend/default/cooking/pdf/MG811Datasheet.pdf>, 13.04.2015
5. http://www.epluse.com/fileadmin/data/product/ee893/Datasheet_EE893.pdf, 29.03.2015
6. http://www.arttec.net/Solar_Mower/4_Electrical/Battery%20Charging.pdf, 13.04.2015
7. <http://www.co2science.org/subject/u/summaries/urbanco2dome.php>, 29.03.2015
8. http://www.epluse.com/fileadmin/data/sw/Specification_E2_Interface.pdf, 02.03.2015
9. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74LV4094.pdf, 28.03.2015
10. <http://www.us.kingbright.com/images/catalog/spec/SA56-11SRWA.pdf>, 28.03.2015
11. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf>, 12.04.2015
12. G. W. Neudeck, The bipolar junction transistor (Volume III), Addison-Wesley Publishing Company, 1989
13. <http://www.aosmd.com/pdfs/datasheet/AO3402.pdf>, 28.03.2015
14. <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM78M05.pdf>, 29.03.2015
15. <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/173527/UTC/LM7833-TA3-G-T.html>, 29.03.2015
16. Pressman, A., Billings, K., Morey, T., Switching power supply design, McGraw-Hill Companies, 2009
17. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP2302_2303.pdf, 29.03.2015

Lisad

Prototüüp



Seadme trükkplaat



Seadme katsetamine välitingimustes



Foto: Urge küla, Pärnumaa, 9. mai 2015