

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

Hendrik Raudik 153409IVEM

DIGITAALNE VALGUSEFEKTISÜSTEEM

Magistritöö

Juhendaja: Eero Haldre
Vaneminsener

Tallinn 2017

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Hendrik Raudik

07.05.2017

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: Digitaalne valgusefektisüsteem

Teema päritolu: Teema on valitud lähtudes enda huvidest.

Lõputöö eesmärgid: Projekteerida valgusdiodvalgusti prototüüp.

Oodatavad tulemused: Valgusti riistvara ja tarkvara testimine läbitakse edukalt.

Lahendatavad küsimused: Valgustussüsteemi üldise arhitektuuri väljatöötamine, valgusti korpuse disainimine, elektriskeemi projekteerimine, trükkplaadi disainimine ning mikrokontrolleri programmeerimine.

Kuupäev:

Üliõpilane:
/allkiri/

Juhendaja:
/allkiri/

Annotatsioon

Magistritöö teema „Digitaalne valgusefektisüsteem” seisneb arvutisüsteemide abil juhitava valgustussüsteemi väljatöötamises kodukasutaja ja väiksemate ürituste tarbeks. Töös pakutakse välja valgustussüsteemi terviklahendus ning peatutakse põhjalikumalt valgusdiodvalgustite projekteerimisel. Antud töö sisaldab valgusti projekteerimisetappide juures tehtud valikute põhjendusi ja vajalikke arvutusi. Töö käigus disainiti, valmistati valgusti korpuse prototüüp. Projekteeriti valgusti elektriskeem ning selle põhjal disainiti ja valmistati trükkplaat. Valgusti ahelaid juhtivale mikrokontrollerile arendati toimiv tarkvara ning valgusti ahelad testiti ja karakteriseeriti.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 46 leheküljel, 10 peatükki, 32 joonist, 11 tabelit.

Abstract

Digital effect lighting system

„Digital effect lighting system” focuses on development of lighting system controlled by computer systems and intended for home use or small events. Full solution of lighting system is introduced, but thesis is mainly focused on LED lighting fixture research and development process. This work contains explanations of made decisions and necessary calculations. As a result of work a prototype of LED fixture enclosure was designed and built. LED fixture schematics were developed and PCB was designed, produced. LED fixture MCU program was fully developed and finally hardware of fixture was tested and characterized.

The thesis is in Estonian and contains 46 pages of text, 10 chapters, 32 figures, 11 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> - Analoog-digitaalmuundur.
BOM	<i>Bill of Materials</i> – Materjalide, komponentide nimekiri.
<i>chaser</i>	Valgusefekt, mis seisneb jadamisi paiknevate valgusallikate üksteise järel süttimises.
<i>debugging</i>	Tarkvara vigade tuvastamine mikrokontrollerisse integreeritud spetsiaalse riistvara abil.
<i>discontinuous mode</i>	Pinget madaldava muunduri režiim, mille korral induktori pulsatsioon ületab enam kui kaks korda muunduri väljundvoolu.
DMX512	Asünkroonne järjestik-digitaalandmeedastusstandard valgustusseadmete juhtimiseks.
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i> - Elektriliselt ümberprogrammeeritav püsimälu.
EIA-422	Arvutite vahelise andmeside füüsilise kihi standard, mida iseloomustab diferentsiaalse signaali kasutamine täisdupleks süsteemides.
EIA-485	Arvutite vahelise andmeside füüsilise kihi standard, mida iseloomustab diferentsiaalse signaali kasutamine pooldupleks süsteemides.
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i> - Ekvivalentne järjestikune sisetakistus.
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i> - Elektrostaatiline lahendus.
Ethernet	Juhtmetega kohtvõrgu tehnoloogia.
<i>gate threshold voltage</i>	Isoleeritud paisuga väljatransistori iseloomustav suurus.
<i>idle</i>	Andmeside signaali rahuolek.
IP	<i>Internet Protocol</i> – Internetiprotokoll.
<i>jumper</i>	Sillusejuhe, kahe klemmi vaheline eemaldatav ühendus.
IDC	<i>Insulation-displacement contact</i> – Signaali ühendus lintkaablile.
<i>input bias current</i>	Operatsioonivõimendi diferentsiaalset sisendit iseloomustav suurus.
<i>kbit/s</i>	<i>Kilobits per second</i> – Kilobitti sekundis.
LAN	<i>Local Area Network</i> – Kohtvõrk.
LED	<i>Light Emitting Diode</i> – Valgusdiod.

MCU	<i>Microcontroller unit</i> – Mikrokontroller.
MLCC	<i>Multi-layer ceramic capacitor</i> – Mitmekihiline keraamiline kondensaator.
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> – Isoleeritud paisuga väljatransistor.
<i>no-name</i>	Väljend teadmata firma päritolu toodete kohta.
PC	<i>Personal Computer</i> – Personaalarvuti.
PPTC	<i>Polymeric Positive Temperature Coefficient</i> – Temperatuuri kasvades takistuse suurenemist iseloomustav suurus.
<i>pull-down</i>	Maajuhtmele ühendatud takisti.
<i>pull-up</i>	Toitejuhtmele ühendatud takisti.
<i>push-pull output</i>	Väljundaste, mis suudab koormust lülitada nii toitejuhtmele kui ka maajuhtmele.
PWM	<i>Pulse-width modulation</i> – Impulsslaiusmodulatsioon.
<i>rail-to-rail</i>	Operatsioonivõimendi sisendeid ja väljundit iseloomustav suurus.
RGB	<i>Red, Green, Blue</i> – Punane, roheline ja sinine.
<i>strobe</i>	Valgusefekt, mis seisneb valgusti kiireloomulises vilgutamises, sarnanedes fotograafias kasutatava välklambi tööga.
SWIM	<i>Single wire interface module</i> – Tootja STMicroelectronics mikrokontrollerite seeria STM8 programmeerimiseks kasutatav jadaliides.
TVS	<i>Transient-Voltage-Suppressor</i> – Ülepingekaitse seadeldis.
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> – Arvutite vaheline universaalne asünkroonne täisdupleks järjestikliides.
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> – Kasutajadatagrammi protokoll.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Arvutite vaheline kiire järjestikliides.
UVLO	<i>Undervoltage-Lockout</i> – Alapinge tuvastamise ahel.
<i>watchdog</i>	Loendur arvuti töös tekkivate vigade tuvastamiseks.
<i>thermals</i>	Trükkplaadi disainielement komponendi jootevälja ja polügooni vahelise soojusjuhtivuse vähendamiseks.
<i>timeout</i>	Loenduri ületäituvuse korral tekkinud olek.
Wi-Fi	Traadita kohtvõrgu tehnoloogia.
XLR	Pistiku standard professionaalse helitehnika ja lavavalgustuse jaoks.

Sisukord

1 Sissejuhatus.....	13
2 Probleemi ülevaade.....	14
3 Süsteemi disain ja funktsionaalne ülevaade.....	16
4 Valgusdiodmooduli valik ja selle karakteriseerimine.....	21
5 Valgusti korpuse disain.....	24
6 Valgusti elektroonika projekteerimine.....	25
6.1 Passiivkomponentide valik.....	25
6.2 Mikrokontrolleri valik.....	26
6.3 Andmeside ahelate koostamine.....	29
6.4 Pinge impulss-stabilisaatorite arvutus.....	31
6.5 Voolu impulss-stabilisaatorite arvutus.....	34
6.6 Valgusdiodide päripinge mõõteskeemi koostamine.....	36
6.7 Valgusti kaitseahelate koostamine.....	38
7 Trükkplaadi disain.....	40
7.1 Ahelate paigutus.....	41
7.2 Alumise kihi maajuhtme polügooni disain.....	42
7.3 Voolu impulss-stabilisaatori disain.....	43
7.4 Pinge impulss-stabilisaatori disain.....	44
8 Tarkvara projekteerimine.....	45
9 Elektrilised mõõtmised.....	48
9.1 Pinge impulss-stabilisaatori väljundpinge pulsatsioon.....	49
9.2 Voolu impulss-stabilisaatori katsetamine.....	50
9.3 Valgusti üle- ja vastupinge kaitseahelate katsetamine.....	52
9.4 Andmeside katsetamine.....	53
10 Majanduslik ülevaade.....	55
Kokkuvõte.....	58
Kasutatud kirjandus.....	59

Lisa 1 – Elektriskeem.....	61
Lisa 2 – Trükkplaadi vasekihtide joonised.....	64
Lisa 3 – Lähtekoodi failid „main.c” ja „led_slave.c”.....	65

Jooniste loetelu

Joonis 1. Tüüpiline valgustussüsteem [1]	14
Joonis 2. Süsteemi ülevaade.....	17
Joonis 3. Andmeside pakett.....	18
Joonis 4. Valgusti plokk skeem.....	19
Joonis 5. Valgusti toiteahelate planeerimine.....	20
Joonis 6. Valgusti valgusdiod moodul.....	21
Joonis 7. Punaste valgusdiodide päripinge sõltuvus temperatuurist.....	23
Joonis 8. Valgusti korpuse prototüüp.....	24
Joonis 9. Samsung MLCC, 0805, X7R, 1uF, 50V mahtuvuse sõltuvus pingest [8]	26
Joonis 10. STM8S003 TSSOP20 väljaviikude kirjeldus [11]	27
Joonis 11. Transiiver ja puhver.....	29
Joonis 12. PESD5V0LBA maksimaalne vooluimpulsi võimsus [4]	31
Joonis 13. +5V impulss-stabilisaator.....	31
Joonis 14. Punaste valgusdiodide voolu impulss-stabilisaator.....	34
Joonis 15. Päripinge mõõteskeem.....	36
Joonis 16. Vastupinge ja ülepinge kaitse.....	38
Joonis 17. Alapinge tuvastamise skeem.....	39
Joonis 18. Ahelate paigutus trükkplaadil.....	41
Joonis 19. Voolu impulss-stabilisaatorite voolude teekond maajuhtme polügoonil.....	42
Joonis 20. Voolu impulss-stabilisaatori disain.....	43
Joonis 21. Pinge impulss-stabilisaatori disain.....	44
Joonis 22. Tarkvara algoritm.....	45
Joonis 23. Kalibreerimise parameetrite kuvamine terminali abil.....	46
Joonis 24. Valgusti monteeritud trükkplaat.....	48
Joonis 25. Pinge pulsatsiooni mõõtmine.....	49
Joonis 26. +5V impulss-stabilisaatori pulsatsioon.....	49
Joonis 27. Valgusdiodmassiivi voolu kasvukiirus.....	50

Joonis 28. Ülepinge ja vastupinge katsetamine.....	52
Joonis 29. Andmeside katsetamise jaoks loodud konverter.....	53
Joonis 30. Juhtkontrolleri ja kahe valgusti andmeside katsetamine.....	53
Joonis 31.Trükkplaadi ülemine vasekiht.....	64
Joonis 32.Trükkplaadi alumine vasekiht.....	64

Tabelite loetelu

Tabel 1. Valgusdiodmooduli massiivide mõõtetulemused.....	22
Tabel 2. Mikrokontrolleri väljaviikude rakendamine.....	28
Tabel 3. Pinge impulss-stabilisaatori induktori leidmine.....	33
Tabel 4. Voolu impulss-stabilisaatorite induktiivsuse arvutus.....	35
Tabel 5. Trükkplaadi disainimise reeglid.....	40
Tabel 6. Tarkvara failid.....	47
Tabel 7. Voolu impulss-stabilisaatorite kasutegur.....	51
Tabel 8. Mikroskeemid ja pooljuhid.....	55
Tabel 9. Takistid.....	56
Tabel 10. Muud passiivsed komponendid.....	56
Tabel 11. Ühendused.....	57

1 Sissejuhatus

Professionaalse valgustehnika valik ja kasutusvaldkond on lai ning mitmekesine. Alates väikestest peosaalidest lõpetades suurte lavadega, millele võib olla paigaldatud sadu arvuti abil juhitavaid valgusteid. Professionaalne valgustehnika ei sobi kodukasutaja või väiksemate pidude tarbeks, kuna on liiga kulukas, seadistamine keeruline ja võtab palju ruumi. Enamik olemasolevatest kodukasutaja jaoks mõeldud valgustitest on olemuselt pigem mänguasjad kui tõsiselt võetavad seadmed ning pakuvad madala kvaliteediga valgusefekte.

Käesoleva magistritöö eesmärk on digitaalselt juhitava valgusefektisüsteemi terviklahenduse väljatöötamine ning valgusdiodvalgustite projekteerimine, valmistamine. Projekteeritav valgusefektisüsteem on ettenähtud eelkõige kodukasutaja ja väiksemate ruumide jaoks. Antud süsteem koosneb jadamisi ühendatud valgusdiodvalgustitest ja juhtkontrollerist, mida juhitakse olemasoleva PC tarkvara abil. Juhtkontroller on reaalaaja sardsüsteem, mis võimaldab valgusteid juhtida väga täpselt ning tekitada kvaliteetseid ja kiireloomulisi valgusefekte.

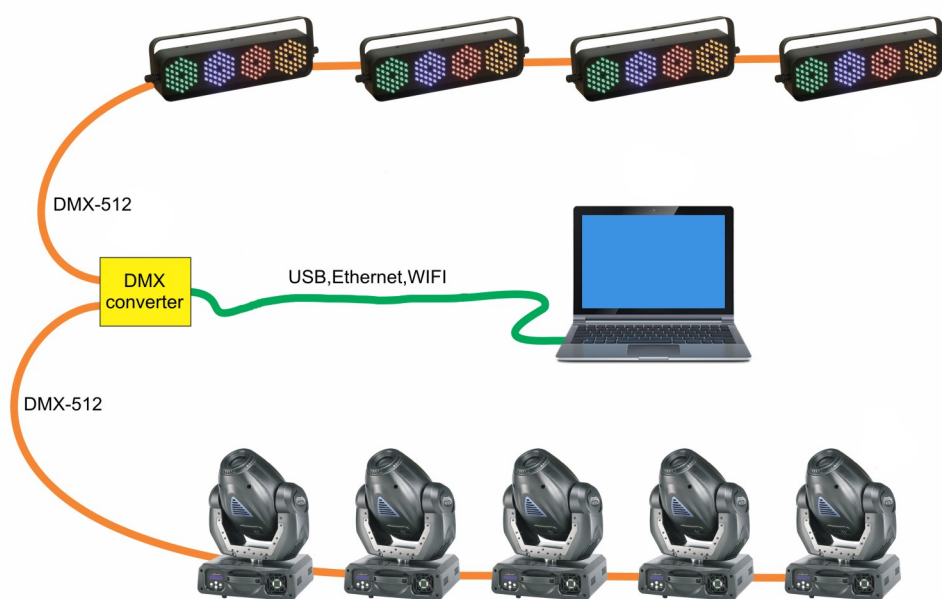
Valgusdiodvalgusti projekteerimine seisneb elektriskeemi projekteerimises, trükkplaadi disainimises ning valgusti tarkvara välja arendamises. Selle tulemusena valmis valgusti prototüüp, mida ka edukalt katsetati.

Töös esitatud arvutusvalemite kaudu leitud parameetrid on arvutatud LibreOffice tabeliarvutus programmiga. Esitatud elektriskeemid ja trükkplaadi joonised on valminud kasutades CadSoft EAGLE tarkvara.

Töös esitatud katsete ja mõõtetulemuste saamiseks kasutati erinevaid mõõteriistu. Temperatuuri mõõtmiseks kasutati sensorit SHT21. Pingete, voolude mõõtmiseks kasutati multimeetrit UNI-T UT71C. Ostsillogrammide ülesvõtmiseks kasutati ostsilloskoopi RIGOL DS1054Z.

2 Probleemi ülevaade

Professionaalsel tasemel valgustussüsteemid leiavad kasutust kontserditel, teatrites klubides ja muudes meelelahutus, vabaajakeskustes. Selline valgustehnika kodukasutaja või väiksema ürituse korraldamise tarbeks ei ole aga majanduslikult otstarbekas. Samuti on professionaalse valgustehnika paigaldus tülikas ning võtab palju ruumi. Kodukasutaja või väiksemate ürituste tarbeks vajaminev valgustussüsteem peaks olema kompaktne, lihtsasti seadistatav ja taskukohasem. Lisaks peaks antud süsteem saavutama maksimaalselt kvaliteetseid valgusefekte ka väikese arvu valgustite korral.



Joonis 1. Tüüpiline valgustussüsteem [1].

Joonisel 1 on kujutatud tüüpiline klubides ja peosaalides kasutatav valgustussüsteem. Valgusteid juhitakse tavaliselt PC abil, milles jookseb spetsiaalne tarkvara. Tarkvara väljastab DMX512 protokoll, kasutades vahelülina konverterit, mis üldjuhul kasutab USB või Ethernet liidest. DMX512 füüsiliseks kihiks on EIA-485 standard, hõlmates diferentsiaalsignaali kasutamist ning liini lõppude sobitamist $120\ \Omega$ takistusega [2].

DMX512 konverterist väljastatakse 513 baidi pikkuseid pakette, millest esimene bait on alati nullväärtusega. Bitikiiruseks on 250 *kbit/s*, võimaldades antud paketi pikkuse korral kuni 44 Hz kaadrisagedust. Iga andmepaketis saadetud baiti nimetatakse DMX512 kanaliks. Iga valgusti seadistatakse individuaalselt, millist kanalit ta jälgima peab, muutes oma seadeid vastavalt kanalile saadetavale 0...255 väärtusele. Kõige lihtsam prožektor omab vähemalt ühte kanalit, kuid keerukamad valgustid, nagu näiteks liikuvpead võivad omada mõnikümnet kanalit.

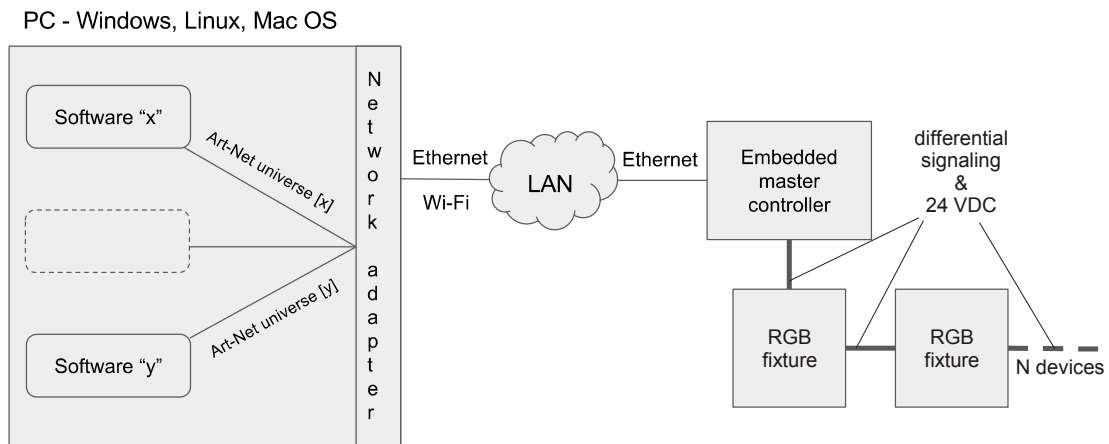
Lisakanaleid kasutatakse valgustisse integreeritud efektide käivitamiseks, seadistamiseks, nagu näiteks „*strobe*” efekt. Valgustite eeldefineeritud efekte saab tarkvara abil käivitada, seadistada, kuid DMX512 abil kiirete efektide tekitamine, sünkroniseerimine on komplitseeritud. Seda eelkõige madala kaadrisageduse ning operatsioonisüsteemi peal jooksva tarkvara tõttu. Kuigi DMX512 kaadrisagedus on maksimaalselt 44 Hz siis tarkvara poolt lisandunud ebatäpsus, ajaline viide vähendab kaadrisagedust tunduvalt. Seega tuleks ajalist täpsust nõudvate efektide jaoks kasutada keerukamaid ja kallimaid valgusteid. Samas erinevate „*chaser*” efektide puhul sõltub ajaline täpsus täielikult tarkvarast, DMX512 kaadrisagedusest ning seega ei piisa ainult keerukamate valgustite kasutamisest.

Käesolevas töös loodav valgustussüsteem peab võimaldama väikese arvu lihtsate valgusdiodvalgustite juhtimist piisavalt täpselt, et luua kiireid ja mitmekesiseid süsteemi poolt eeldefineeritud efekte. Samas peaks süsteem olema kompaktsem ning selle paigaldus, seadistamine lihtsam olemasolevatest professionaalsetest lahendustest.

3 Süsteemi disain ja funktsionaalne ülevaade

Projekteeritava süsteemi põhilised erinevused olemasolevate süsteemiga võrreldes on:

- DMX512 konverter on asendatud paindliku ja võimeka juhtkontrolleriga. Antud seadme eesmärk on käsitleda DMX512 kanaleid kui lülitena. Kanalit kasutatakse efektide lülitamiseks ja konfigureerimiseks. Käesolevas töös esitletakse juhtkontrolleri ideed, kuid selle projekteerimine jääb antud töö skoobist välja.
- Valgustite andmeside füüsiline kiht võimaldab igat valgustit juhtida ilma adresseerimiseta ja seab madalamad nõuded andmeside kaablitele. Adresseerimiseta on valgustite paigaldus, seadistamine tunduvalt lihtsam. Antud andmeside seab piirangud valgustite ühendusviisile – valgusteid saab ühendada ainult jadamisi. Antud süsteemi eesmärk on jadamisi ühendatud valgusdiodvalgustite täpne juhtimine.
- Andmeside protokoll on mõeldud väiksemale arvule seadmetele ning bitikiirus on 500 *kbit/s* , mis on kaks korda kiirem DMX512 bitikiirusest. Kuna juhtkontroller saadab täpselt nii palju baite kui vaja, erinevalt DMX512 protokollist, mis üldjuhul on mõeldud saatma alati 512 baiti, siis on valgustite juhtimise kaadrisagedus tunduvalt suurem.
- Projekteeritavad valgustid ei konkureeri võimsuse poolest professionaalsete valgustitega. Madala energiatarbe tõttu kasutatakse madalpingelist toidet, mis saadetakse valgustini koos andmesidekaabliga. Sel viisil väheneb ühendatavate kaablite hulk, paraneb kasutusmugavus ning saab kasutada ühte võimsamat vooluvõrgu toiteplokki valgustite toitmiseks.

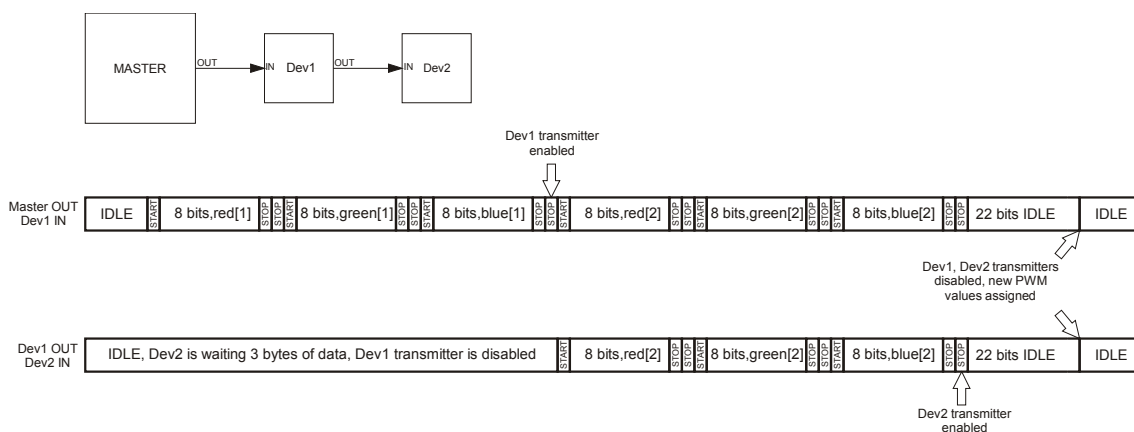


Joonis 2. Süsteemi ülevaade.

Joonisel 2 on kujutatud terviklik ülevaade valgustussüsteemist. Spetsiaalne valgustite juhtimiseks mõeldud tarkvara („*Software*”) suhtleb juhtkontrolleriga („*Embedded master controller*”) Art-Net protokolliga kasutades. See on protokoll DMX512 pakettide edastamiseks üle arvutivõrgu, kasutades transpordi kihina UDP protokoll [5]. Art-Net võimaldab kasutada mitut tarkvara korraga, saates ühele IP aadressile mitut erinevat DMX512 paketti korraga („*Art-Net universe*”). Sel viisil saab erinevaid tarkvarasid kombineerides ühe juhtkontrolleri seadeid samaaegselt muuta. Näiteks võib ühe tarkvara abil saata muusikaga sünkroniseerimiseks vajalikku infot, teisega aga seadistada värvusi, intensiivsust, efekte. Kasutades Wi-Fi võrku, on võimalik kasutada Art-Net protokolliga toega mobiilseid rakendusi, juhtides valgustussüsteemi nutitelefoniga või tahvelarvuti abil. Kasutajasõbraliku ja konkurentsivõimelise süsteemi loomiseks on vajalik arendada spetsiaalne tarkvara antud süsteemi jaoks.

Juhtkontroller kasutab arvutivõrguga suhtlemiseks Ethernet liidest ning valgustite („*RGB fixture*”) juhtimiseks kasutatakse diferentsiaalsignaali („*differential signaling*”), mille andmeside on ühesuunaline ning seetõttu on ainult vastuvõtja poolne sisend takisti abil sobitatud. Juhtkontrolleri lähedal asub 24 VDC toiteplokk, mille väljund on viidud juhtkontrolleri väljundpistikuni. Andmeside ja toite jaoks tuleb kasutada neljajuhtmelist kaablit, millest kaks juhet võiksid moodustada keerupaari.

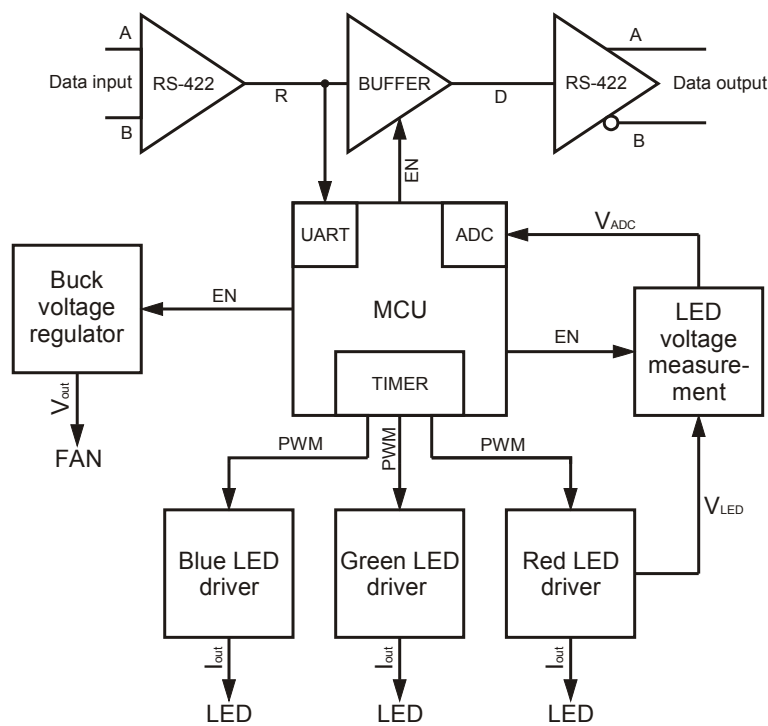
Kuna valgustite vaheline distant on väike, siis võib teha järelandmisi andmeside kaablite osas ning diferentsiaalpaari asemel võib kasutada tavalisi juhtmeid. Valgustid ühendatakse jadamisi ning nende vaheline distant on tavaliselt 1 kuni 2 meetrit. Esialgne planeeritud maksimaalne jadamisi ühendatud valgustite arv on 15 tükki. Peamine valgustite arvu piiravad faktorid on toitekaablite ja pistikute lubatavad voolutugevused. Ühe valgusti maksimaalseks voolutarbeks on arvestatud 0,7 A, mis eeldab, et 15 valgusti puhul suudab toiteplokk välja anda vähemalt 10 A ning toitejuhtmed, ühendused on ettenähtud 10 A voolu jaoks.



Joonis 3. Andmeside pakett.

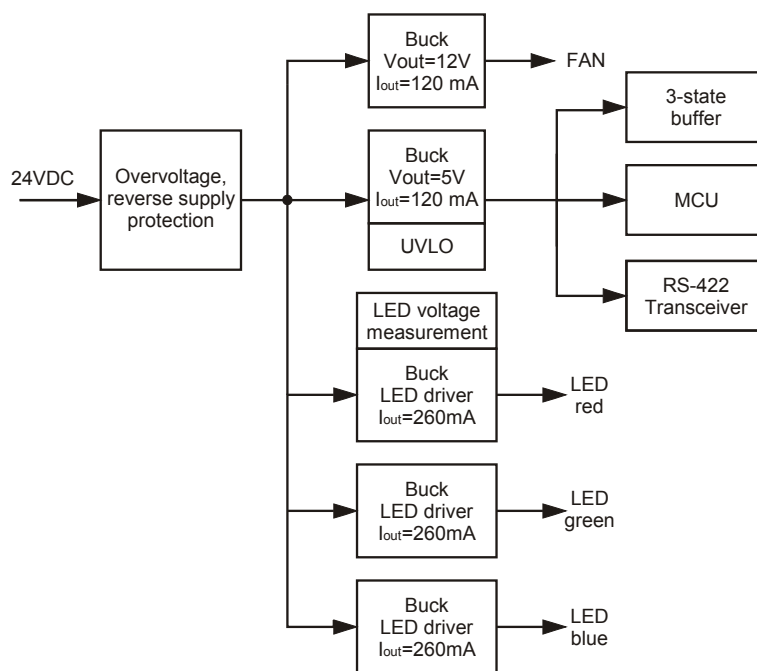
Joonisel 3 on kujutatud juhtkontrolleri ja kahe valgusti vaheline kommunikatsioon, mille tööpõhimõte sarnaneb valgusdiodribades kasutatavaga [6]. Igale valgustile kolme järjestikuse baidi saatmine baseerub teatepulga edasiandmise analoogial. Juhtkontroller saadab välja kolm esimest baiti, mis vastavad värvustele punane, roheline ja sinine. Kolm esimest baiti võtab vastu juhtkontrollerile kõige lähim valgusti. Kolme esimese baidi saatmise ajal on esimese valgusti väljund suletud ning alles peale kolme baidi vastuvõtmist väljund aktiveeritakse. Väljundi aktiveerimine tähendab seda, et väljund kopeerib sisendisse saabuvat signaali ning järgmised juhtkontrollerist saadetavad baidid jõuavad teise valgusti sisendisse. Kui juhtkontroller on saatmise lõpetanud sulgevad kõik valgustid samaaegselt oma väljundid ning uutele vastuvõetud väärtustele vastavalt seadistatakse kõikide valgusdiodide valgusvoog. Andmeside kiiruseks on 500 kbit/s ning maksimaalne kaadrisagedus 15 seadme puhul on 400 Hz.

45 baidi saatmiseks kulub $990\ \mu\text{s}$ ning pakettide vahe peab olema vähemalt $1,5\ \text{ms}$, mis on vajalik valgusdiodide temperatuuri mõõtmiseks.



Joonis 4. Valgusti plokkskeem.

Joonisel 4 on näidatud valgusti plokkskeem. Valgusti elektroonika ahelaid juhib mikrokontroller (MCU). Kuna valgusdiod moodul sisaldab kolme põhivärvust, vajatakse iga värvi jaoks eraldiseisvat vooluallikat („LED driver”). Vooluallikate juhtimiseks on kasutusel PWM, sagedusega $1\ \text{KHz}$ ja resolutsiooniga 8 bitti. Valgusdiodide temperatuuri jälgimiseks kasutatakse punaste valgusdiodide siirdepinge sõltuvust temperatuurist („LED voltage measurement”). Antud meetodi eeliseks on vähenenud monteerimiskulud ja väiksem juhtmete arv korpuses, kuna eraldiseisev sensor vajab lisajuhtmeid ning selle monteerimine kitsastesse oludesse on tülikas. Temperatuuri tõustes lülitatakse sisse ventilaatori toiteallikas („Buck voltage regulator”) ning kui temperatuuri tõus jätkub, tuleb valgusdiodide voolu piirata. Andmesideks kasutatakse EIA-422 standardile vastavat transiiverit. Transiiveri vastuvõtja väljund ja saatja sisend ühendatakse omavahel puhvri abil („BUFFER”).



Joonis 5. Valgusti toiteahelate planeerimine.

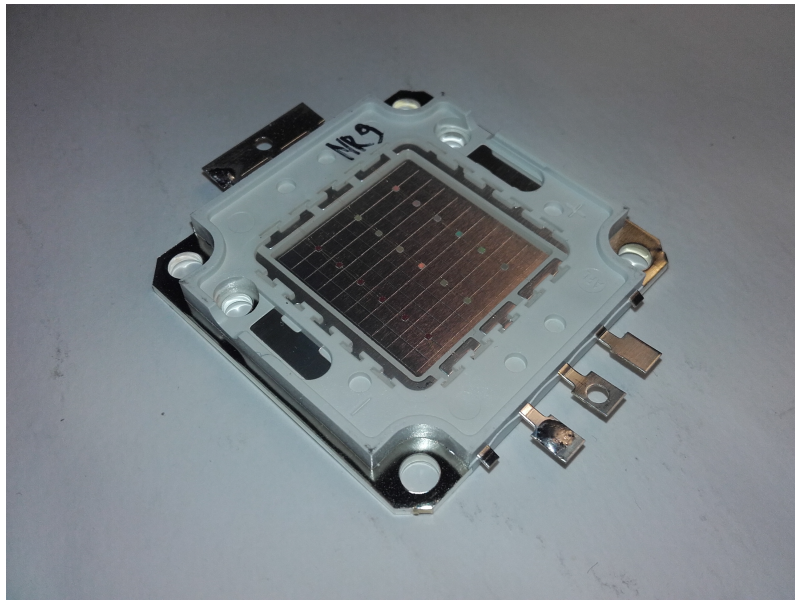
Joonisel 5 on esitatud valgusti toiteahelate ülesehitus. Valgusti on mõeldud töötama 24 voldise toitepingega. Toitepinge ei tohiks ületada 26 V, kuna see on pinge impulssstabilisaatorite soovitatav maksimaalne tööpinge. Siniste, roheliste valgusdiodide päripinge on ligikaudu 20 V ning seetõttu peaks toitepinge igal juhul antud pingest kõrgem olema. Eelnevast lähtuvalt otsustati valgusti töökindluse tõstmiseks luua ülepinge, vastupinge ja alapinge kaitseahelad („*Overvoltage, reverse supply protection*” ; „*UVLO*”).

Valgusti toiteahelate topoloogia valikul lähtuti eelkõige efektiivsusest. See on vajalik selleks, et minimeerida paralleelselt ühendatud valgustite voolutarvet. Samas säilitada võimalikult madal trükkplaadi temperatuur, kuna valgusdiodide voolu toimel soojenev korpus trükkplaadi temperatuuri veelgi täiendavalt tõstab. Sellest lähtuvalt on kasutatud ainult impulssstabilisaatoreid.

4 Valgusdiodmooduli valik ja selle karakteriseerimine

Valgusdiodide valik on mitmekesine ja lai. Paljud tuntud tootjad nagu Lumileds ja Osram pakuvad karakteriseeritud, usaldusväärseid ja võimsaid valgusdioode, kuid on hinna poolest küllaltki kallid. Hiina päritolu nn. „no-name” valgusdiodmoodulid on laialt levinud ning hinna poolest tunduvalt odavamad. Miinuseks nende moodulite puhul on igasuguse informatsiooni, parameetrite, karakteristikute puudumine. Samuti on suure tõenäosusega nende moodulite efektiivsus ja eluiga lühem tuntud tootjate toodangust. Kasutades „no-name” mooduleid seeriatootmises, tuleks eelnevalt sooritada hulgaliselt katseid, veendumaks nende töökindluses ja sobivuses.

Antud projekt algatati eelkõige selle tõttu, et võimsad, kuid odavad valgusdiodmoodulid on kättesaadavad ning on esmase prototüübi valmistamise jaoks sobiv valik.



Joonis 6. Valgusti valgusdiodmoodul.

Joonisel 6 on valgustis kasutatav valgusdiodmoodul, mida on võimalik tellida internetipoe Ebay.com vahendusel [33]. Antud RGB valgusdiodmoodul koosneb kuuest punasest, rohelisest ja sinisest valgusdiodist, mis on liimitud alumiiniumist alusele ning on valatud silikooni sisse. Sama värvusega valgusdiodid on ühendatud jadamisi, moodustades valgusdiodmassiivi. Sel viisil tagatakse igale valgusdiodile üksteise suhtes võrdse suurusega vool.

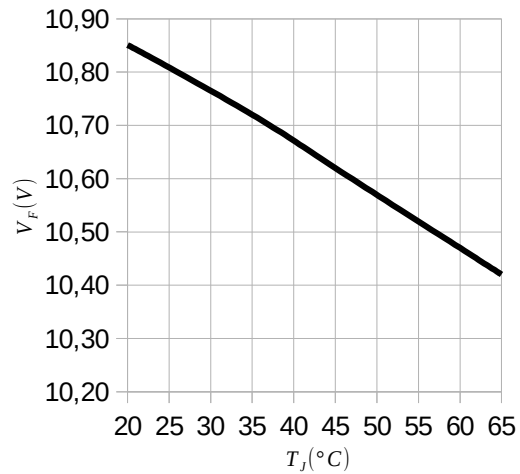
Ainsad tootja poolt väidetavad näitajad antud mooduli kohta on nimivõimsus ning voolutugevus. Nimivõimsus on 20 W ning voolutugevus iga värvuse kohta 300 mA. Kuigi esitatud näitajad ei ole usaldusväärsed, siiski esialgu arvestatakse, et valgusdiodide vool ei ületaks 300 mA ning projekteeritava voolu impulss-stabilisaatori keskmiseks vooluks on 256 mA.

Tabel 1. Valgusdiodmooduli massiivide mõõtetulemused.

Parameeter	Tingimused	Punane LED	Roheline LED	Sinine LED	Ühikud
V_{F1}	$I_F = 256 \text{ mA}$	12.8	19.8	19.0	V
P_{LED}	$V_F = V_{F1}; I_F = 256 \text{ mA}$	3.28	5.07	4.86	W
$P_{LEDtotal}$	$V_F = V_{F1}; I_F = I_{F1}$	13.2			W
ΔV_F	$I_F = 10 \text{ mA}; \Delta T_j = 65 - 25^\circ \text{C}$	-430	-320	-390	mV

Tabelis 1 esitatud parameeter V_{F1} on valgusdiodmassiivi päripingelang 256 mA korral ning P_{LED} on reaalne massiivil eralduv võimsus. Koguvõimsus $P_{LEDtotal}$ on 13,2 W, mis on tunduvalt madalam väidetavast nimivõimsusest.

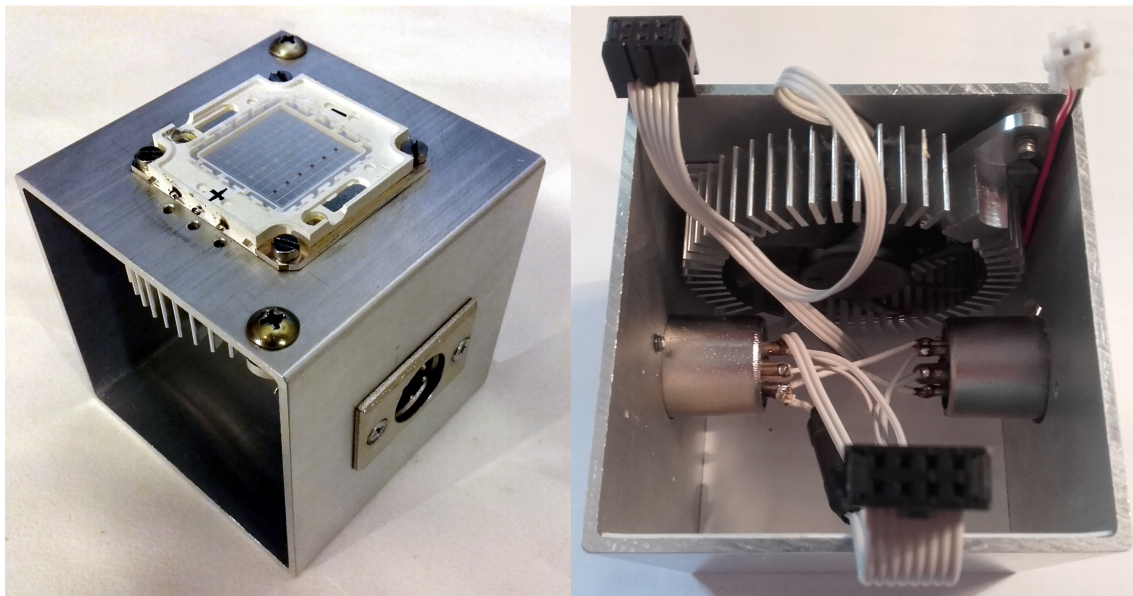
Parameeter ΔV_F näitab valgusdiodide massiivi päripinge muutust, kui siirdetemperatuur tõusis toatemperatuurist 40 kraadi võrra kõrgemale ning seda konstantse 10 mA voolu korral. Sel viisil saab määrata valgusdiodi siirdetemperatuuri, mis antud rakenduses kasutust leiab. Kuna punaste valgusdiodide päripinge on madalam ning pinge sõltuvus temperatuurist on suurim, siis temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse punaseid valgusdiodide.



Joonis 7. Punaste valgusdiodide päripinge sõltuvus temperatuurist.

Joonisel 7 on esitatud punaste valgusdiodide päripinge sõltuvus temperatuurist, kui valgusdiodide vool on 10 mA. Antud graafik on koostatud kolme valgusdiod mooduli mõõtetulemuste keskmise põhjal. Selleks mõõdeti iga valgusdiod mooduli päripinget viie erineva temperatuuri korral.

5 Valgusti korpuse disain



Joonis 8. Valgusti korpuse prototüüp.

Joonisel 8 esitatud valgusti korpuse prototüüp on valmistatud 2 mm paksuse seinaga alumiiniumprofiilist, mille külge on kinnitatud valgusdiodmoodul ning nelja klemmiga XLR pistikud. Antud pistik on mõeldud kuni 10 A voolutugevuse jaoks ning on seetõttu antud rakenduse jaoks sobilik [7]. Profiili lahtised küljed tuleb katta metallvõrega ning trükkplaat kinnitatakse vabaks jäänud tagumisele siseküljele. Ventilaator koos radiaatoriga on eelkõige mõeldud PC protsessorite jahutamiseks, kuid on oma mõõtmete ja hinna tõttu sobilik antud rakendusse. Ventilaatori sisse lülitamine on eelkõige mõeldud palavates oludes ning valgusdiodide maksimaalse võimsuse kasutamise korral. Jahutuse efektiivsuse tõstmiseks tuleb valgusdiod mooduli ja radiaatori vahelised pinnad katta termopastaga. Korpuse suutlikkus valgusdiodmoodulit piisavalt jahedana hoida tehti kindlaks katseliselt. Toatemperatuuril, koos ventilaatoriga ning valgusdiodide maksimaalse voolu korral ei tõusnud valgusdiodmooduli temperatuur üle +40 °C.

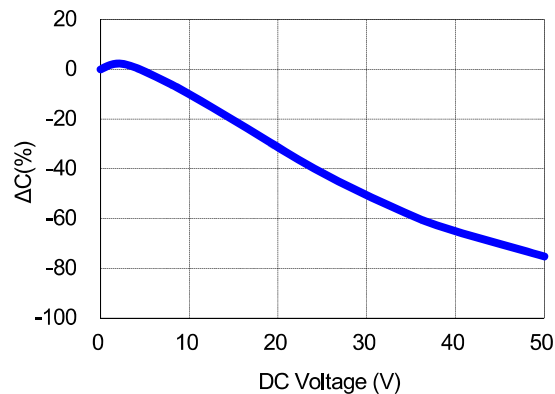
6 Valgusti elektroonika projekteerimine

Elektriskeemi koostamisel lähtuti eelkõige saadaval olevate komponentide hinnast. Komponentid valiti Farnell ja TME kataloogidest. Projekteerimise lihtsus ja kogemused varasemalt kasutatud komponentidega on teisejärguline.

6.1 Passiivkomponentide valik

Kõik trükkplaadil olevad takistid on 0603 korpusega ning omavad standardset täpsusklassi 1 %. Nende saadavus ja hind on võrdne 0402 tüüpi korpusega, kuid 0603 jootmine käsitsi kui ka tootmises on hõlpsam. 0402 tüüpi korpus võtab vähem ruumi ning on sobilikum kõrgsageduslikes skeemides kasutamiseks. Samas on lubatav hajuvõimsus 0402 puhul väiksem 0603 korpusega takistist. Takisti väärtuste valikul optimeeriti nominaalide koguarvu selliselt, et võimalusel saaks ühes ahelas kasutatud takisti nominaali ka teistes ahelates kasutada.

Kõikide mikroskeemide toiteklemmidele tuleb ühendada filterkondensaator, et tagada mikroskeemile piisavalt stabiilne, väikese pulsatsiooniga toitepinge. Samuti tuleb muundurite väljundpinge silumiseks lisada piisaval hulgal mahtuvust. Tavaliselt kasutatakse keraamilisi mitmekihilisi kondensaatoreid (MLCC), kuna omavad madalat sisendtakistust (ESR) ja on hinna poolest soodsad. Kõige levinumad on X7R ja X5R tüüpi dielektrikut kasutavad kondensaatorid. Nende peamiseks puuduseks on mahtuvuse sõltuvus temperatuurist ja pingest (Joonis 9.). Seetõttu on kondensaatorid valitud enam kui poole suurema pinge nominaaliga tööpingest.



Joonis 9. Samsung MLCC, 0805, X7R, 1uF, 50V mahtuvuse sõltuvus pingest [8] .

6.2 Mikrokontrolleri valik

Antud rakenduses on sobilik kasutada madala integratsiooni mikrokontrollerit. Rakendusest lähtuvalt seati mikrokontrollerile järgmised nõuded:

- Vähemalt kolm PWM väljundit.
- UART moodul.
- Kahe sisendiga ADC.
- Hõlpsasti kättesaadavad arendustööriistad.

Valik tehti kolme juhtiva tootja Texas Instruments, STMicroelectronics ja Atmel mikrokontrollerite vahel:

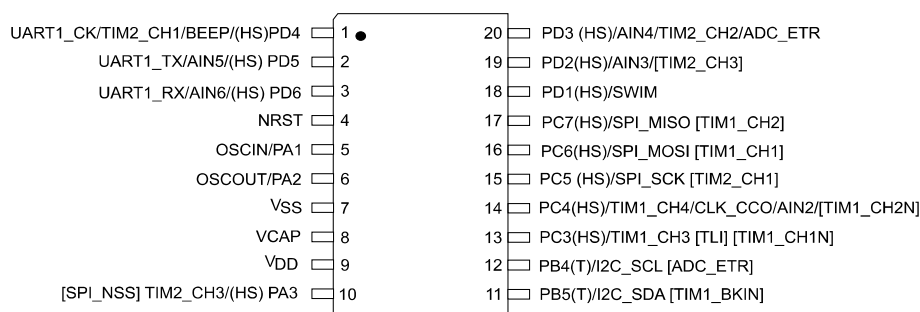
- MSP430G2553, TSSOP20 (€1.65).
- STM8S003, TSSOP20 (€0.51).
- ATMega48, TQFP32 (€1.91).

Valituks osutus STMicroelectronics STM8S003F3, kuna lisaks soodsamale hinnale on ka arendustööriistad kättesaadavamad.

Programmeerimiseks ja „debugging” läbiviimiseks kasutati „STM8S value line discovery” arendusplaadi juurde kuuluvat ST-LINK programmaatorit [9] .

Mikrokontrolleri taktsignaali sageduseks valitakse maksimaalne taktsagedus 16 MHz, kuna 500 kbit/s andmeside on sellise väikese MCU jaoks küllaltki kiire ning puhvri lülitamine peab toimuma minimaalse viitega. Taktsignaali allikaks valiti 16 MHz väline keraamiline resonaator, kuna sisemise resonaatori täpsus on kõigest $\pm 5\%$ [11] . Asünkroonselt edastatava start biti, stopp biti ja andmebaidi ajaline kestvus on 20 μ s. Sellest viie protsendisele hälbele vastab 1 μ s, mis on võrdne poole biti kestvusega, mis omakorda tähendab, et viimane bitt võidakse võendada liiga vara või hilja. Välise resonaatori täpsus on $\pm 0.5\%$, mis tagab piisavalt täpselt ajastatud, usaldusväärse andmeside [10] .

Järgnevalt on toodud mikrokontrolleri väljaviikude konfiguratsioon antud rakenduse tarbeks (Joonis 10. ja Tabel 2.).



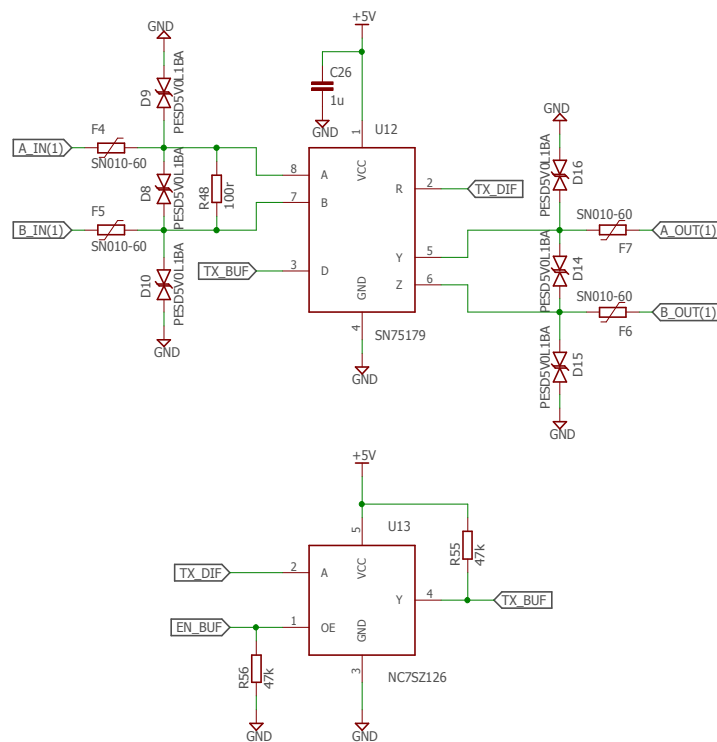
Joonis 10. STM8S003 TSSOP20 väljaviikude kirjeldus [11] .

Tabel 2. Mikrokontrolleri väljaviikude rakendamine.

Välja- viigu nr.	Välja- viigu nimi	Kasutatav funktsioon	Elektriskeemi signaali nimi	Kirjeldus
1	PD4	<i>push-pull output</i>	EN_BUF	3-oleku puhvri lülitamine
2	PD5	UART1_TX	TEST	Kalibreerimine, diagnostika
3	PD6	UART1_RX	TX_DIF	Andmeside sisend
4	NRST	-	RESET	„Reset”, vajalik programmeerimiseks
5	PA1	OSCIN	OSCIN	16 MHz resonaatori sisend
6	PA2	OSCOUT	OSCOUT	16 MHz resonaatori väljund
7	VSS	-	GND	Ühine maa klemm
8	VCAP	-	VCAP	1.8V sisemise pingeregulaatori lahtisidestus kondensaatori ühendamiseks
9	VDD	-	+5V	Digitaal-, analoogosa toide
10	PA3	-	-	Pole kasutusel
11	PB5	-	-	Pole kasutusel
12	PB4	-	-	Pole kasutusel
13	PC3	TIM1_CH3	PWM_R	Punane valgusdiod
14	PC4	<i>push-pull output</i>	EN_FAN	Ventilaatori lülitamine
15	PC5	<i>push-pull output</i>	SW_MEAS	Mõõteskeemi lülitamine
16	PC6	TIM1_CH1	PWM_G	Roheline valgusdiod
17	PC7	TIM1_CH2	PWM_B	Sinine valgusdiod
18	PD1	SWIM	SWIM	Programmeerimine ja „debugging”
19	PD2	AIN3	ADC_REF	Tugipinge ADC kalibreerimiseks
20	PD3	AIN4	ADC_LED	Mõõteskeemi pinge väljund - ADC sisend

Pinge impulss-stabilisaatori poolt tekitatud pulsatsiooni minimeerimiseks lisati VDD toiteklemmide lisaks 100 nF kondensaatorile veel üks 1 μ F kondensaator. Lisaks tuleb VCAP sisendisse lisada 470 – 3300 nF suurusega kondensaator ning NRST klemmi külge tuleb ühendada 10 – 100 nF kondensaator [11].

6.3 Andmeside ahelate koostamine



Joonis 11. Transiiver ja puhver.

Joonisel 11 on esitatud transiiver ja puhver. SN75179 transiiveril on diferentsiaalne sisend ja väljund üksteisest eraldatud, võimaldades selle kasutamist täisdupleks süsteemides [14]. Enamik EIA-485 transiiveritel on aga sisend ja väljund samade klemmide alla ühendatud, võimaldades ainult pooldupleks andmesidet [13]. Kuna kommunikatsioon on ainult ühesuunaline, siis ühendatakse 100 Ω sobitustakisti R48 ainult vastuvõtja poolele. Kolme olekuga puhver NC7SZ126 on mikrokontrolleri poolt juhitud ning ühendab transiiveri vastuvõtja väljundi saatja sisendiga [15]. „Pull-up” takisti R55 ja „pull-down” takisti R56 hoiavad signaali nivood ettenähtud tasemetel, juhul kui puhvri või MCU väljund muutub kõrgeoomiliseks.

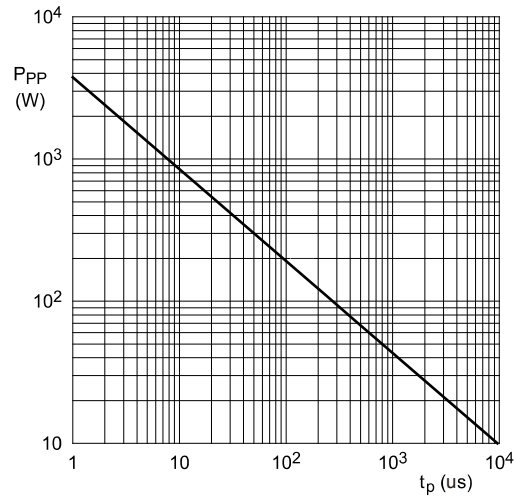
Transiiveri sisend kui ka väljund on varustatud PPTC kaitsmete ja TVS diodidega. Kaitseahelate eesmärk on muuta sisendid, väljundid immuunseks ESD ja XLR pistiku valesti ühendamise vastu [17]. Defektse või mittesobiliku kaabli kasutamise korral võib 24 V toitepinge sattuda andmeside ahelatesse. Transiiveri maksimaalne lubatud pinge

on aga -10 V kuni $+15\text{ V}$ transiiveri maa suhtes. Kaitseahelad koosnevad kaheasuunalistest TVS diodidest PESD5V0LBA ja PPTC kaitsmetest SN010-60. TVS diodid ei lase sisendile, väljundile rakendatud pingel tõusta üle 10 voldi ning kaitseb diferentsiaalse, kui ka maa suhtes ülepingestamise eest. Valitud TVS diodid on spetsiaalselt mõeldud andmeside sisendite, väljundite kaitsmiseks, kuna omavad väikest siirdemahtuvust [4]. PPTC kaitsmete eesmärk on piirata TVS dioode läbivat voolu. TVS diodi läbilöögi korral leiab aset voolu kasv, mille tagajärjel kaitsme takistus suureneb.

PPTC kaitsme valimisel peeti silmas järgmist:

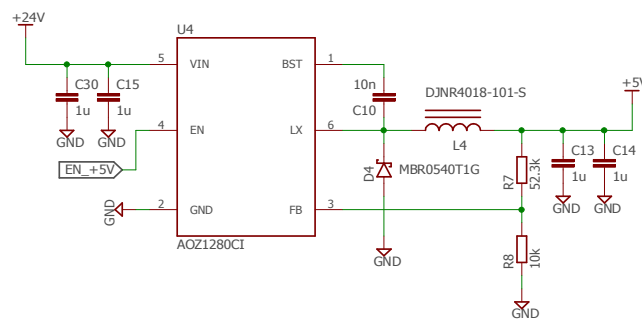
- Maksimaalne vool, mille korral kaitse ei rakendu peab olema suurem, kui sobitustakistit läbiv vool, mis on maksimaalselt 50 mA .
- Kaitsme rakendumine peab olema piisavalt kiire, et ei ületaks TVS diodi maksimaalset lubatavat hetkelist hajuvõimsust.
- Kaitsmele rakendatav maksimaalne tööpinge peab olema vähemalt 15 V .

Hinnang PPTC ja TVS diodi sobivusele antud rakendusse on leitav järgneva arvutuskäigu kaudu. Käsitleme olukorda, mille korral maa ja ühe sisendi vahele rakendatakse 24 V toitepinge. TVS diodil tekkiv pingelang on 9 V ja kaitsmel tekkiv pingelang on 15 V . Hetkeline vool 24 V rakendamise hetkel on ligikaudu $1,8\text{ A}$, kuna PPTC takistus on keskmiselt $8,3\ \Omega$ [16]. TVS diodil eralduv maksimaalne hajuvõimsus on seega 16 W . Joonis 12 näitab TVS diodi vooluimpulsi kestvuse ja selle maksimaalse võimsuse sõltuvust. 16 W tippvõimsuse korral võib impulsi pikkus olla ligikaudu 5 ms . PPTC reageerimisaeg on $1,8\text{ A}$ korral ligikaudu 10 ms . Lugeses PPTC takistuse suurenemise tõttu kiirelt väheneva voolutugevuse kõvera võrdseks TVS diodi standardiseeritud „8/20 μs ” impulsi kujuga, järeldub, et maksimaalne lubatav hetkeline võimsus on ületatud. Siiski katsetamise tulemusel selgus, et antud kaitseahelad on antud rakenduse jaoks sobilikud. Sisendi ja maa klemmi vahele rakendati 24 V toitepinget ning katset korraldati enam kui sada korda. TVS diodid läbisid katsetused edukalt.



Joonis 12. PESD5V0LBA maksimaalne vooluimpulsi võimsus [4] .

6.4 Pinge impulss-stabilisaatorite arvutus



Joonis 13. +5V impulss-stabilisaator.

Joonisel 13 on esitatud antud rakenduses kasutatav pinge stabilisaator. Stabilisaator baseerub AOZ1280CI mikroskeemil, mida on lihtne kasutada ning võtab plaadil vähe ruumi. Maksimaalne toitepinge on kuni 30 V ja väljundvool on kuni 1,2 A. Lülitussagedus on 1,5 MHz, võimaldades kasutada väiksemat induktorit ja mahtuvust [18] .

Stabilisaatori väljundpinge leitakse järgmiselt:

$$V_o = 0,8 * \left(1 + \frac{R_7}{R_8} \right) \quad (1) [18]$$

Takisti R_8 väärtuseks valitakse 10 k Ω . Antud takisti korral on pingejaguri vool 80 μ A, mis on tagasiside „*input bias current*” väärtusest ligikaudu 160 korda suurem, tagades, et „*input bias current*” poolt põhjustatud viga on piisavalt väike [19]. Valemi (1) järgi valiti +5V stabilisaatori R_7 väärtuseks 52,3 k Ω ja +12 V stabilisaatori R_9 väärtuseks 150 k Ω . Valitud R_9 korral on väljundpinge +13 V, et saavutada maksimaalne ventilaatori võimsus.

Diodiks valiti MBR0540T1G Schottky diood, mis omab madalat siirde mahtuvust ning päripingelangu. Valitud dioodi maksimaalne keskmine vool on 500 mA ja maksimaalseks vastupingeks on 40V [20]. Skeemi optimeerimise huvides on antud diood kasutusel mõlemas pinge impulss-stabilisaatoris ja kõigis kolmes voolu impulss-stabilisaatoris.

Induktori induktiivsus on leitav andmelehes antud valemi abil:

$$\Delta I_L = \frac{V_O}{f \times L} \times \left(1 - \frac{V_O}{V_{IN}} \right) \quad (2) [18]$$

Valemis (2) esitatud ΔI_L on induktori voolu pulsatsioon. ΔI_L suurus on üldjuhul 30% maksimaalsest keskmisest väljundvoolust. Maksimaalne väljundvool +5 V stabilisaatori puhul on ligikaudu 100 mA, mis tekib transiiveri diferentsiaalse väljundi lühistamise korral. Ventilaatori toitmiseks vajatav vool on samuti ligikaudu 100 mA. Samuti tuleb arvestada pingestabilisaatori minimaalse väljundvooluga. Stabilisaatori minimaalne väljundvool ei tohi olla üle kahe korra väiksem induktori voolu pulsatsioonist, kuna vastasel juhul läheb regulaator katkendlikku režiimi („*discontinuous mode*”) [21]. +5V stabilisaatori minimaalne väljundvool esineb transiiveri diferentsiaalse väljundi lahtikoormamise korral. Järgnevalt leitakse pinge impulss-stabilisaatorite induktorite väärtused (Tabel 3).

Tabel 3. Pinge impulss-stabilisaatori induktori leidmine.

Parameeter	+5V stabilisaator	+12V stabilisaator	Ühik	Kirjeldus
V_{IN}	24	24	V	Sisendpinge
V_O	5	13	V	Väljundpinge
I_O	100	100	mA	Maksimaalne väljundvool
f	1500	1500	KHz	Lülitussagedus
ΔI	30	30	mA	Induktori voolu pulsatsioon
L	89	132	μH	Arvutatud induktiivsus

Optimeerimise huvides valiti mõlemale pingestabilisaatorile 100 μH induktorid DJNR4018-101-S [24]. Induktori valimisel tuleb jälgida, et rakenduses kasutatav maksimaalne vool ei ületaks induktori küllastumise voolu.

Sisendisse lisatav mahtuvus on leitav järgmise valemiga.

$$\Delta V_{IN} = \frac{I_O}{f \times C_{IN}} \times \left(1 - \frac{V_O}{V_{IN}}\right) \times \frac{V_O}{V_{IN}} \quad (3) [18]$$

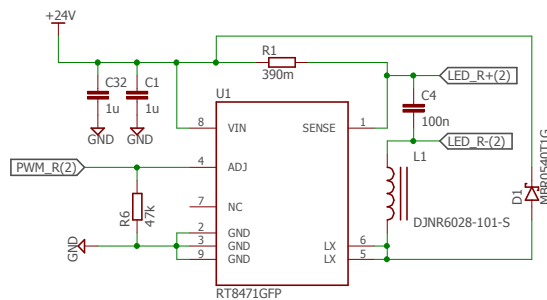
Valemis (3) esitatud ΔV_{IN} on pinge pulsatsioon. Antud rakenduses arvestame, et pulsatsioon ei ületaks 10 mV_{pp} ning seda seetõttu, et hoida +5 V stabilisaatori tekitatud müra võimalikult madal. Kuna +5 V tarbitav vool on väike, siis sedavõrd väike pulsatsioon on saavutatav küllaltki väikese mahtuvusega. Arvutuslikult tuleks lisada 1 μF kondensaator, kuid arvestades mahtuvuse vähenemist pinge kasvades lisatakse paralleelselt kaks 1 μF mahtuvusega kondensaatorit.

Väljundisse lisatav mahtuvus on ligikaudu avaldatav järgmise valemi abil.

$$\Delta V_O = \Delta I_L \times \left(\frac{1}{8 \times f \times C_O}\right) \quad (4) [18]$$

+5V toite pulsatsioon ΔV_O ei tohiks ületada 5 mV_{pp} , kuna ADC toide ja tugipinge on +5 V toitega ühendatud. 10-bitise ADC madalamale bitile vastab ligikaudu 5 mV ning seega ei tohiks pulsatsioon ületada 1 LSB suurust pinget. Arvutuslikult piisaks 560 nF kondensaatorist, kuid reaalselt vajatakse vähemalt 2 μF mahtuvust. Arvutusliku ja reaalse mahtuvuse neljakordne vahe tuleneb trükkplaadi disaini eripärasusest ning reaalse kondensaatori parameetritest.

6.5 Voolu impulss-stabilisaatorite arvutus



Joonis 14. Punaste valgusdiodide voolu impulss-stabilisaator.

Voolu impulss-stabilisaator baseerub RT8471GFP mikroskeemil, mis on spetsiaalselt ettenähtud võimsate valgusdiodide toitmiseks (Joonis 14). Mikroskeem võimaldab kuni 1,2 A väljundvoolu ning lubatav toitepinge on kuni 36 V [22]. Töösagedus on kuni 1 MHz, võimaldades regulaatorit tüürida PWM-ga, mille sagedus on 1 KHz ja resolutsioon 8 bitti. Kasutatava PWM impulsi reguleerimise sammuks on 3,9 μs. Seega võiks regulaatori sageduse periood olla vähemalt kaks korda lühem kui 3,9 μs.

Regulaatori töösagedus sõltub peamiselt induktorist, toitepingest ja valgusdiodi päripingest. Vooluregulaatori aktiveerimisel sisendi ADJ abil avaneb jõulüliti, mille tagajärjel tekib kasvav vool läbi takisti R1, valgusdiodide ja induktori. Kui takistil R1 tekkiv pinge ületab 115 mV, jõulüliti sulgub ja kahanev induktori vool läbib diodi D1. Jõulüliti avaneb uuesti kui vool on langenud sedavõrd, et R1 peal mõõdetav pinge on väiksem kui 85 mV.

Regulaatori voolu häälestamiseks tuleb valida sobiv mõõtetakisti suurus. Antud rakenduses kasutatava mooduli nii punase, rohelise kui ka sinise valgusdiodmassiivi maksimaalseks vooluks on 300 mA. Regulaator häälestatakse aga 260 mA voolu jaoks, kuna voolu pulsatsioon on 30 % voolu keskmisest. Seega on maksimaalseks vooluks 300 mA ja minimaalseks 220 mA. Mõõtetakisti suurus on leitav järgmisest seosest:

$$I_{OUTavg} = \frac{0.1V}{R_S} \quad (5) [22]$$

I_{OUTavg} on mõõtetakistit läbiv keskmine vool ja 0,1 V on mõõtetakistil hoitav keskmine pinge. Valituks osutus takisti nominaaliga 390 mΩ.

Induktori induktiivsus on leitav tootja poolt esitatud valemite kaudu:

$$t_{ON} = \frac{L \times \Delta I_L}{V_{IN} - V_{OUT} - I_{OUT}(R_{SEN} + R_L + R_{DS(ON)})} \quad (6) [22]$$

$$t_{OFF} = \frac{L \times \Delta I_L}{V_{OUT} + V_D + V_{SEN} + (I_{OUT} \times R_L)} \quad (7) [22]$$

t_{ON} on jõulüliti avatud oleku aeg ja t_{OFF} on jõulüliti suletud oleku aeg. Tootja poolt määratud minimaalsed t_{ON} ja t_{OFF} on vastavalt 210 ns ja 170 ns. Tegemist on minimaalsete suurustega ning tegelikkuses võiksid need olla suuremad. Seega määratakse t_{ON} ja t_{OFF} vastavalt 420 ns ja 340 ns.

Tabel 4. Voolu impulss-stabilisaatorite induktiivsuse arvutus.

Parameeter	Punane LED	Roheline LED	Sinine LED	Ühik	Kirjeldus
V_{IN}	24	24	24	V	Sisendpinge
V_{OUT}	12,8	19,8	19,0	V	Valgusdiodi massiivi päripinge
V_{SEN}	100	100	100	mV	Vooluanduri tugipinge
R_{SEN}	390	390	390	mΩ	Voolu mõõtmise takisti
I_{OUT}	256	256	256	mA	Keskmine väljundvool
ΔI_L	80	80	80	mA	Induktori voolu pulsatsioon
$R_{DS(ON)}$	350	350	350	mΩ	Jõulüliti takistus
V_D	400	400	400	mV	Schottky diodi päripinge
R_L	1	1	1	Ω	Induktori tüüpiline takistus alalisvoolule
t_{OFF}	340	340	340	ns	Jõulüliti suletud oleku aeg
L	60	91	87	μH	Arvutatud induktiivsus

Tabelis 4 on toodud lähteandmed ning nende põhjal arvutatud induktiivsused. Arvutamisel on kasutatud valemit (7), kuna roheline ja sinise valgusdiodi puhul on vooluregulaatori täitetegur ~80%. Seega $t_{OFF} \ll t_{ON}$ ning kriitiline parameeter,

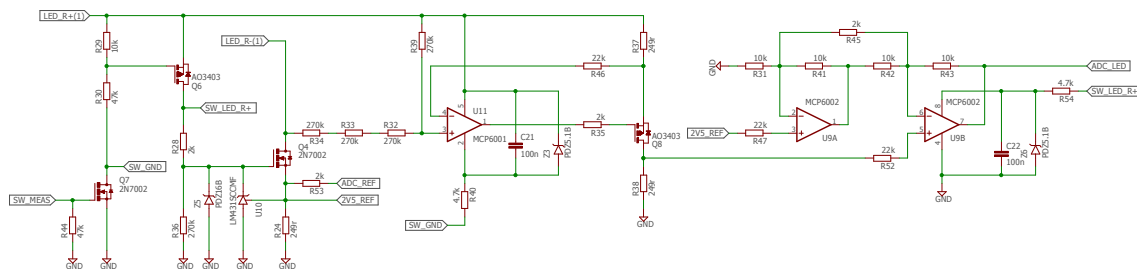
millega tuleks arvestada on t_{OFF} . Kõigi kolme voolu impulss-stabilisaatori tarbeks valiti optimeerimise huvides 100 μH väärtusega DJNR6028-101-S induktorid [23].

Järgmisena leiti toitesisendisse lisatav mahtuvus, mis on leitav valemiga:

$$\Delta V_{IN} = \frac{I_O}{f \times C_{IN}} \times \left(1 - \frac{V_O}{V_{IN}}\right) \times \frac{V_O}{V_{IN}} \quad (8) [18]$$

Arvestades, et lubatav ΔV_{IN} on 50 mV_{pp} , väljundvool I_O on 0,26 A ja kolme impulss-stabilisaatori keskmine väljundpinge ehk valgusdiodide pingelang on 16 V, siis lisatakse iga stabilisaatori toitesisendisse paralleelselt kaks 1 μF mahtuvusega kondensaatorit.

6.6 Valgusdiodide päripinge mõõteskeemi koostamine



Joonis 15. Päripinge mõõteskeem

Joonisel 15 on kujutatud punaste valgusdiodmassiivi päripinge mõõteskeem, mille abil tehakse kindlaks valgusdiodide temperatuur. Antud elektriskeemi arendamise protsessi kiirendamiseks kasutati LTSpice tarkvara. Skeemi võib jaotada kolmeks osaks: valgusdiodide vooluallikas, valgusdiodimassiivi pinge muundamine vooluks ja diferentsvõimendi. Transistoride Q7 ja Q6 abil lülitatakse operatsioonivõimendite ja rööpstabilisaatori toidet sisse või välja.

Rööpstabilisaator U10 ja transistor Q4 moodustavad vooluallika, mille vool sõltub takistist R24 [25]. Takisti R24 tekkiv pinge on võrdne U10 sisemise tugipingega, milleks on $2,495 \text{ V} \pm 0,5 \%$. Seega on takisti R24, transistori Q4 ja valgusdioode läbiv vool 10 mA. Lisaks on takistil R24 tekkiv pinge kasutusel ADC kalibreerimisel ja diferentsvõimendi tugipingena.

Valgusdiodide pinge muundatakse vooluks operatsioonivõimendi U11 baseerual tüüpskeemil [28] . Võimendi toitepinget reguleerib 5,1 V stabilitron Z3, hoides võimendi VDD klemmi, mis on ühendatud valgusdiodi anoodiga, ja VSS klemmi vahelist pinget ühtlasena. Võimendi valimisel antud rakendusse on oluline, et sisendid ja väljund oleksid „*rail-to-rail*” tüüpi ning „*input bias current*” oleks võimalikult väike [28] . Kuna MCP6001 maksimaalne toitepinge on 5,5 V , siis jagatakse valgusdiodi massiivi pinge kõrgeoomilise pingejaguri abil neljaks [29] . Pingejagur koosneb neljast 270 K Ω takistist R34, R33, R32 ja R39. Sel viisil saavutatakse küllaltki täpne pinge jagamine kasutades tavalisi, laialt levinud takisti väärtuseid. Antud skeemis hoiab U11 takistite R39 ja R37 pinged omavahel võrdsed. Takistil R37 pingelangu tekitamiseks reguleerib U11 transistori Q8 paisu pinget ning vool suunatakse läbi takisti R38, mis on ühendatud vastu ühist maad. Kuna R38 ja R37 takistused ja voolud on omavahel võrdsed, siis on maa suhtes mõõdetav pinge takistil R38 neli korda väiksem valgusdiodide massiivi pingest.

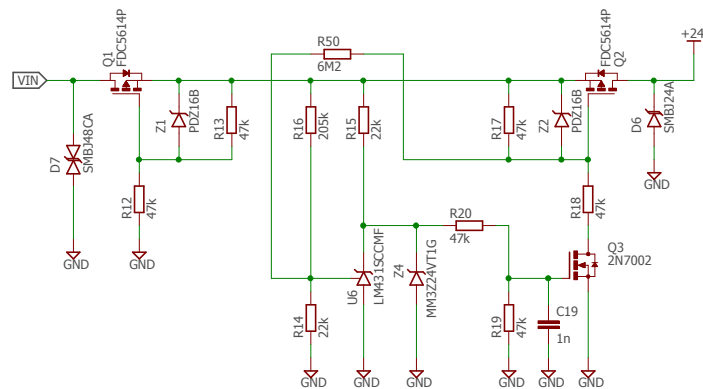
Diferentsvõimendi eesmärk on takistil R38 tekkiva 2,495 V nihkepinge elimineerimine ning võimendamine ainult 2,495 V suhtes. Punase valgusdiodide massiivi pinge 10mA korral on alati suurem kui 10 V. Seega tuleb eraldada 10 V nihkepinge ning võimendada ainult 10 V suuremat pinget. Antud juhul on valgusdiodide pinge jagatud neljaga ning maha lahutatakse 10 V asemel 2,495 V suurusega pinge. Diferentsvõimendi baseerub MCP6002 operatsioonivõimendil, mis sisaldab kahte võimendit ühes korpuses [29] . Antud skeemi eelis on see, et vajatakse ainult kahte võimendit ning mõlemad sisendid on kõrgeoomilised [26] . Võimendi U9 toide on sarnaselt U11 toitega lahendatud stabilitron Z6 abil. Diferentsvõimendi võimendus sõltub takisti R45 suurusest. Takisti R45 ära jätmisel saavutatakse kahekordne võimendus. Antud rakenduses on takisti R45 väärtuseks valitud 2 K Ω , mille korral on võimendustegur 12.

Eelnevat kokkuvõttes on valgusdiodide pinge V_{LED} mõõteskeemi väljundpinge „ADC_LED” kaudu leitav valemiga:

$$V_{LED} = 4 * \left(\frac{ADC_LED}{12} + 2,495 \right)$$

6.7 Valgusti kaitseahelate koostamine

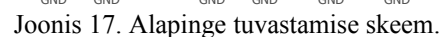
Valgusti kaitseahelate eesmärk on süsteemi kaitsta ülepinge, vastupinge eest ning tuvastada süsteemi tööks mittesobiv alapinge. Antud funktsionaalsuse saavutamiseks võib kasutada spetsiaalset mikroskeemi või projekteerida see diskreetsetest komponentidest. Mikroskeemide puhul on arendustöö lihtsam ja kiirem, kuid on hinna poolest kallid. Seetõttu otsustati kaitseahelad valmistada diskreetsetest komponentidest. Järgnevalt esitatud kaitseahelate arendamise protsessi kiirendamiseks kasutati LTSpice tarkvara.



Joonis 16. Vastupinge ja ülepinge kaitse.

Joonisel 16 esitatud kaitseahel on asetatud toitesisendi „VIN” ja elektriskeemi ühise „+24V” toitesignaali vahele. Enne toitesisendit „VIN” on paigaldatud trükkplaadi väliselt 1A sulavkaitse, mis tagab ohutuse seadme rikkevoolu korral. Projekteeritav kaitseahel pakub kaitset ± 48 voldise pinge eest. Sellest kõrgema pinge korral rakendub kahesuunaline TVS diod D7. Vastupingestamise vastu on kasutusel transistoril Q1 põhinev skeem, mis kasutab Schottky diodi asemel P-kanaliga MOSFET transistori [30]. Arvestades, et maksimaalne seadme poolt tarbitav vool on 0,7 A ja Schottky diodi päripingelang on 0,4 V ning FDC5614P maksimaalne kanalitakistus on 105 m Ω saame leida pooljuhtidel eralduva võimsuse [32]. Diodi puhul 280 mW ja transistori puhul 50 mW. Arvestades transistori pingestamiseks mõeldud pingejaguri hajuvõimsust, milleks on 6 mW, siis on transistori kasutav lahendus viis korda efektiivsem tavalisest Schottky diodist.

Kui LM431 „REFERENCE” klemmipinge ületab sisemist tugipinget, siis mikroskeemi sees olev katoodi ja anoodi vaheline transistor küllastub, mille tagajärjel pinge takistil R19 langeb madalamale kui transistori Q3 „*gate threshold voltage*” väärtus ning transistor Q3 sulgub. Transistori Q3 sulgumise korral takistite R17 ja R18 vool lakkab ning transistori Q2 lätte, paisu vaheline pinge on ligikaudu 0 V, mille tulemusel vool läbi Q2 katkeb. Takisti R50 abil on seatud positiivne tagasiside, et tekitada umbes 400 mV suurune hüsterees.



39

7 Trükkplaadi disain

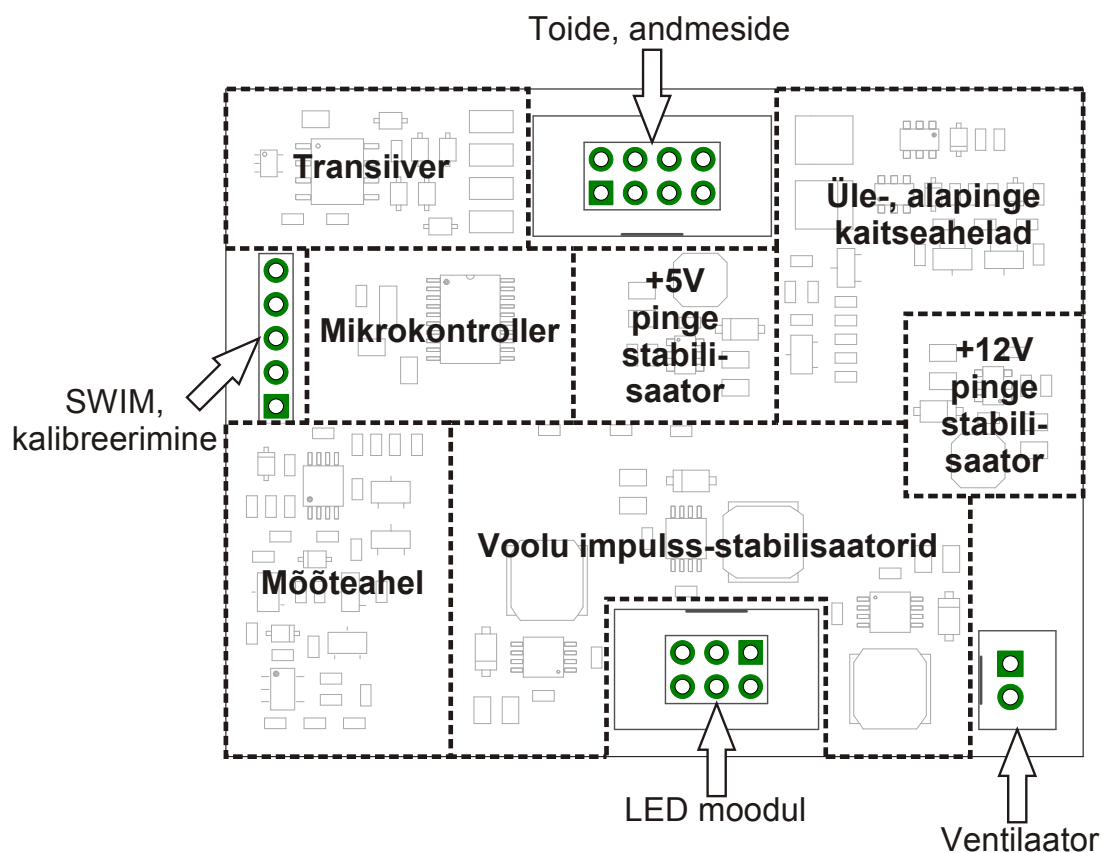
Antud rakenduse jaoks projekteeriti kahepoolne trükkplaat. Kahepoolne trükkplaat on soodsaim ning kuna plaadil on ruumi piisavalt puudub vajadus enamate kihtide jaoks. Odavamaks tootmiseks on pindmonteeritavad komponendid paigutatud ainult ülemisele kihile. Läbilaotavad komponendid lükatakse läbi aukude ülalt ning joodetakse kinni alumisel kihil, võimaldades kasutada lainejootmist.

Tabel 5. Trükkplaadi disainimise reeglid.

Parameeter	Suurus
Minimaalne rada, vahe	0.25 mm
Kasutatavad puurid	0.5 mm; 1.1 mm; 1.2 mm
Minimaalne avade distants	0.75 mm
Trükkplaadi pikkus	64 mm
Trükkplaadi laius	50 mm
Trükkplaadi paksus	1.6 mm
Vasekihtide paksus	35 μ m

Tabelis 5 esitatud nõuded on enamike trükkplaadi tootjate poolt aktsepteeritavad ning valitud eesmärgiga disainimaks võimalikult väikeste tootmiskuludega trükkplaat. Seetõttu on minimaalseks puuriks valitud 0,5 mm. Läbilaotavate komponentide puhul tuleb arvestada, et peale metaliseerimist kahaneb puuritud augu läbimõõt tavaliselt 0,1 mm võrra [34]. Jootemaski puhul püüti vältida väiksemat vahet kui 0,25 mm ning jooteväljade disainimise puhul on aktiveeritud „*thermals*” atribuut, et käsitsi jootmine oleks hõlpsam.

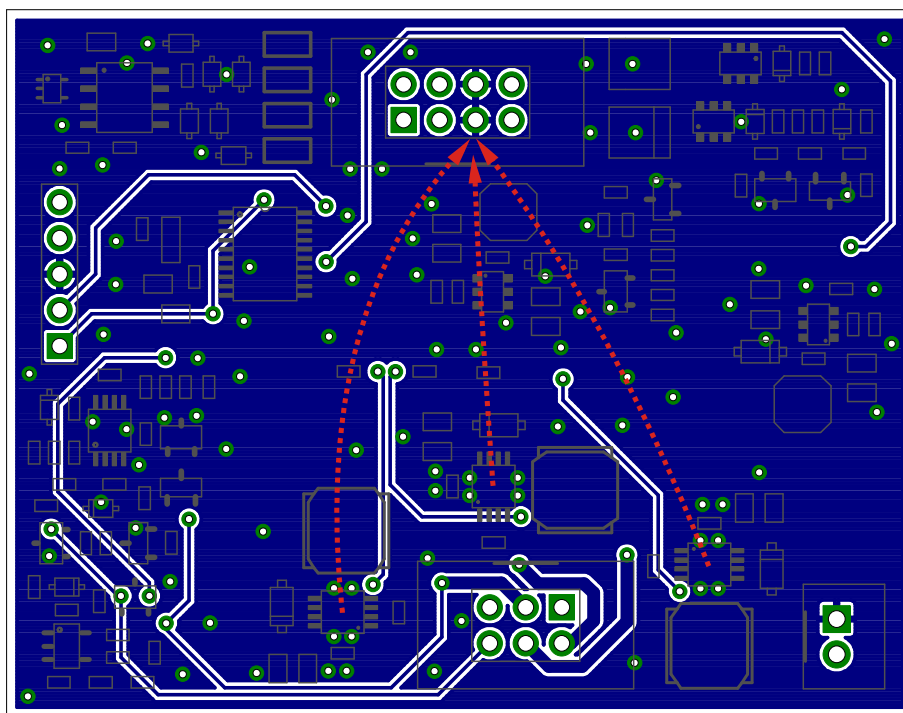
7.1 Ahelate paigutus



Joonis 18. Ahelate paigutus trükkplaadil.

Joonisel 18 on kujutatud ahelate ja pistikute paigutus trükkplaadil. Toide ja andmeside on viidud 8-klemmise IDC ühenduse alla. Seetõttu tuleb transiiver ja kaitseahelad pisikule võimalikult lähedale paigutada. Mööteahel on müra vähendamiseks viidud muunduritest võimalikult kaugemale, kuid samas võimalikult lähedale mikrokontrollerile ja valgusdiodmooduli pistikule. Valgusdiodmooduli ühendamiseks on kasutatud 6-klemmilist IDC pistikut ning voolu impulss-stabilisaatorid on paigutatud sellele võimalikult lähedale. Komponentide paigutamisel arvestati, et nende minimaalne omavaheline distant oleks 0603 korpuste puhul võrdne nende kõrgusega. Suuremate komponentide puhul sätestati minimaalseks distantiks pool madalama komponendi kõrgusest.

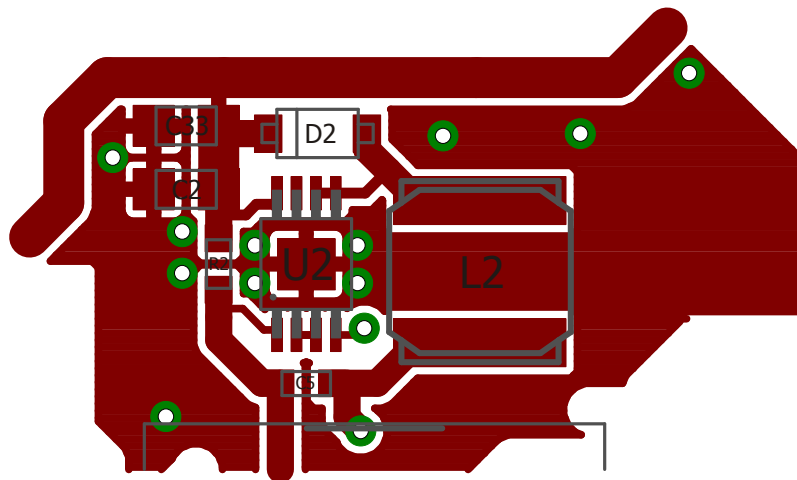
7.2 Alumise kihi maajuhtme polügooni disain



Joonis 19. Voolu impulss-stabilisaatorite voolude teekond maajuhtme polügoonil.

Joonisel 19 on esitatud trükkplaadi alumine vasekiht ning ülemisel kihil asuvate komponentide asukohad. Kuna trükkplaat on kahepoolne, tuleb võimalikult palju signaali ja toite radasid viia ülemisele kihile, et alumine maajuhtme polügoon oleks suure pindalaga ja võimalikult tugev. Alumise kihi vooluradade vahele tuleks jätta piisavalt ruumi maajuhtme polügooni jaoks ning nõrgavoolulised rajad tuleks paigutada nõnda, et need ei takistaks suurevooluliste radade teekonda. Voolu impulss-stabilisaatori ülemisel kihil asuv maa klemm on ühendatud nelja läbiviigu abil alumisele maajuhtme polügoonile. Antud läbiviikude ja toitepistikute vahele on loodud võimalikult lai vasekihi ala ühise maa signaali jaoks, et maajuhtme pingelang ja müratase oleks minimaalne. Joonisel 19 on näidatud voolu impulss-stabilisaatorite voolude teekond toitepistikuni.

7.3 Voolu impulss-stabilisaatori disain

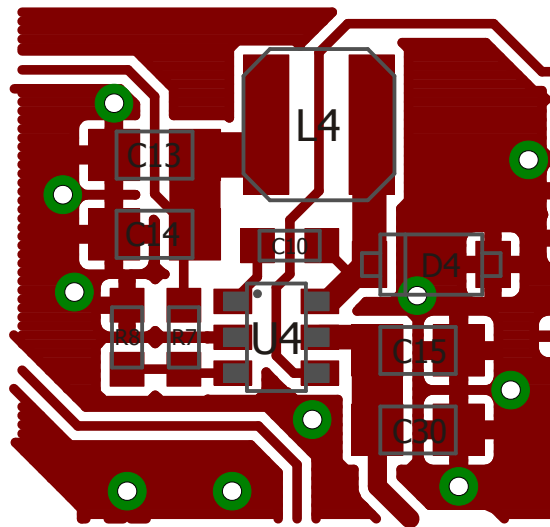


Joonis 20. Voolu impulss-stabilisaatori disain.

Joonisel 20 on kujutatud valgusdiodide voolu impulss-stabilisaatori paigutus trükkplaadil. Olulisemad punktid komponentide paigutuse juures on:

- Voolu mõõtetakisti R2 tuleb paigutada mikroskeemile U2 võimalikult lähedale ja mõõtepunktid peaksid olema võimalikult lähedal takisti jooteväljadele.
- U2 korpuse all olev metallist plaat ühendatakse maasihiga, et tagada mikroskeemile parem jahutus. Selleks on viidud hulgaliselt läbiviike alumisele maasihile.
- Lahtisidestus kondensaatorite C33 ja C2 paigutamisel tuleb jälgida, et induktori, diodi, kondensaatorite vaheline teekond oleks võimalikult lühike ning samas oleks C33 ja C2 maaga ühendatud klemmid võimalikult lähedal U2 maaga.

7.4 Pinge impulss-stabilisaatori disain

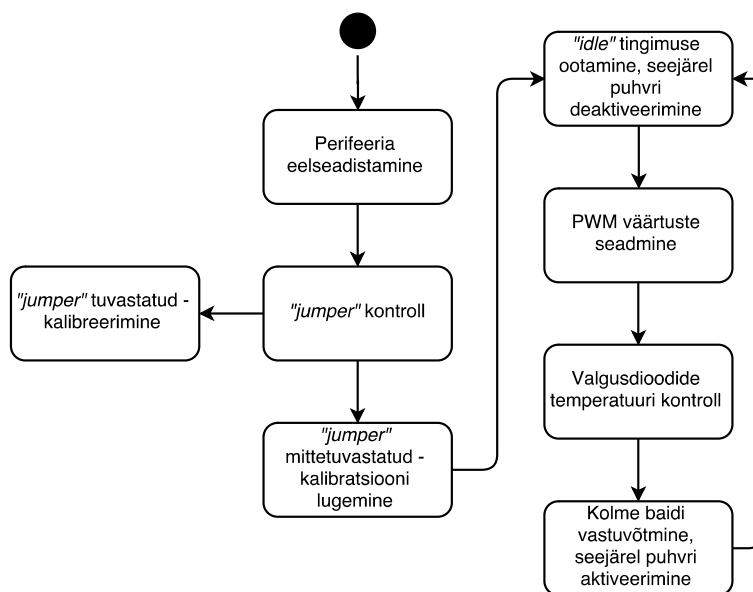


Joonis 21. Pinge impulss-stabilisaatori disain.

Joonisel 21 on kujutatud pinge impulss-stabilisaatori paigutus trükkplaadil. Olulisemad punktid komponentide paigutuse juures on:

- Kondensaatorid C15, C30 on paigutatud võimalikult lähedale diodile D4. Jõulüliti avanemisel toimub päripingestatud diodi vastupingestamine, mille tagajärjel tekib suur vooluimpulss. Diodi mahtuvuse ümberlaadimisel tekib diodist, kondensaatoritest ja jõulülitist koosnev vooluring.
- Tagasiside pingejaguri takistid R7 ja R8 asuvad mikroskeemile U4 võimalikult lähedal.
- Stabilisaatori väljundpinge ja tagasiside on võetud kondensaatoritelt, mitte induktori klemmi pealt.

8 Tarkvara projekteerimine

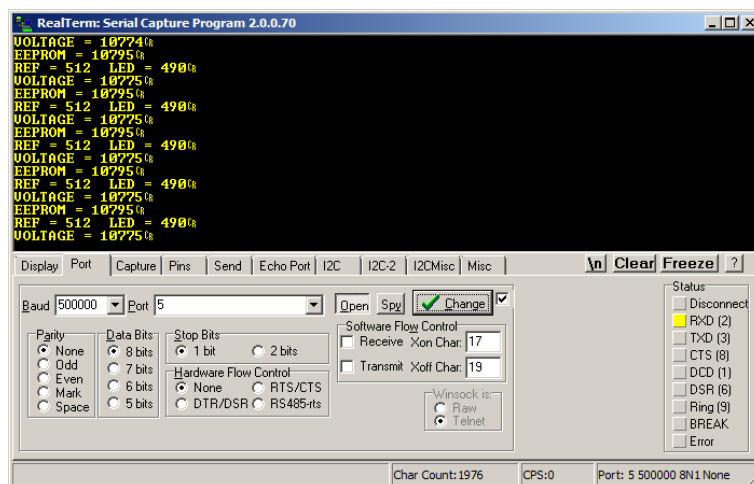


Joonis 22. Tarkvara algoritm.

Joonisel 22 on esitatud valgusti tarkvara lihtsustatud algoritm. Mikrokontrolleri toite sisse lülitamise korral saavad kõik registrid automaatselt oma vaikeväärtused. Seejärel algab kasutaja poolt loodud programm ning esimesena seadistatakse rakenduseks vajalikud perifeeria moodulid.

Valgusdiodi pingemõõtmisvea vähendamiseks teostatakse kalibratsioon toatemperatuuril. Sellega kõrvaldatakse nihkepingest tekkinud viga. Kalibreerimiseks tuleb signaal „TEST” „pull-down” takisti abil maandada (vt. Lisa 1 – Elektriskeem). Kalibreerimise režiimis käitub „TEST” nii sisendi kui väljundina. Väljundina selles tähenduses, et iga sekundi tagant väljastatakse kalibreerimiseks vajalikud parameetrid UART mooduli kaudu ning kui andmeid parasjagu ei väljastata, muutub „TEST” sisendiks ning toimub „TEST” nivoo kontrollimine. „Pull-down” takisti lahtiühendamise korral muutub „TEST” nivoo kõrgeks ning kalibratsiooni väärtus salvestatakse koos kontrollsummaga EEPROM mälusse. Kalibreerimise režiimist

väljumiseks on vajalik toite maha võtmine. Joonisel 23 on ekraanitõmmis RealTerm terminalis kuvatavatest kalibreerimise parameetritest.



Joonis 23. Kalibreerimise parameetrite kuvamine terminali abil.

Programmi alguses teostatud kontrolli käigus „*jumper*” mittetuvastamisel loetakse EEPROM mälust kalibratsioon. Kui kalibreerimise väärtus on piiridest väljas või kontrollsumma ei klapi, siis läheb programm lõputusse tsükklisse ning punased valgusdiodid hakkavad vilkuma, tähistamaks seadmel tekkinud viga.

Pärast kalibratsiooni väärtuse lugemist siseneb programm lõputusse peatsükklisse, mis koosneb neljast järjestikusest ülesandest. Andmeside liini „*idle*” tingimuse ootamine tähendab seda, et oodatakse olukorda, kus järjestikuseid baite juhtkontrolleri poolt enam ei saadeta. Kui selline tingimus on toimunud lülitatakse puhver välja ning juhtkontroller peab pidama vähemalt 2 ms pikkuse pakettide vahelise pausi, mis on vajalik pakettide eraldamiseks ning valgusdiodide temperatuuri määramiseks. Peale puhvri välja lülitamist ja paketi lõppu seadistatakse uued PWM väärtused ning seejärel teostatakse valgusdiodide pinge mõõtmine.

Pinge mõõtmise jaoks lülitatakse müra vähendamiseks kõik voolu impulssstabilisaatorid välja. Valgusdiodide hetkelist kustumist pole praktiliselt märgata, kuna pinge mõõtmise protsess toimub ühe millisekundi jooksul. Pinge mõõtmise kaudu tehakse kindlaks valgusdiodide temperatuur, millele vastavalt lülitatakse sisse ventilaator või piiratakse valgusdiodide voolu ülekuumenemise korral.

Peatsükli lõppu on lisatud „*watchdog*” loenduri nullimine, mille „*timeout*” on seadistatud ühe sekundi pikkuseks. See on vajalik programmi algolekusse toomiseks seadme rikke või andmeside katkemise korral.

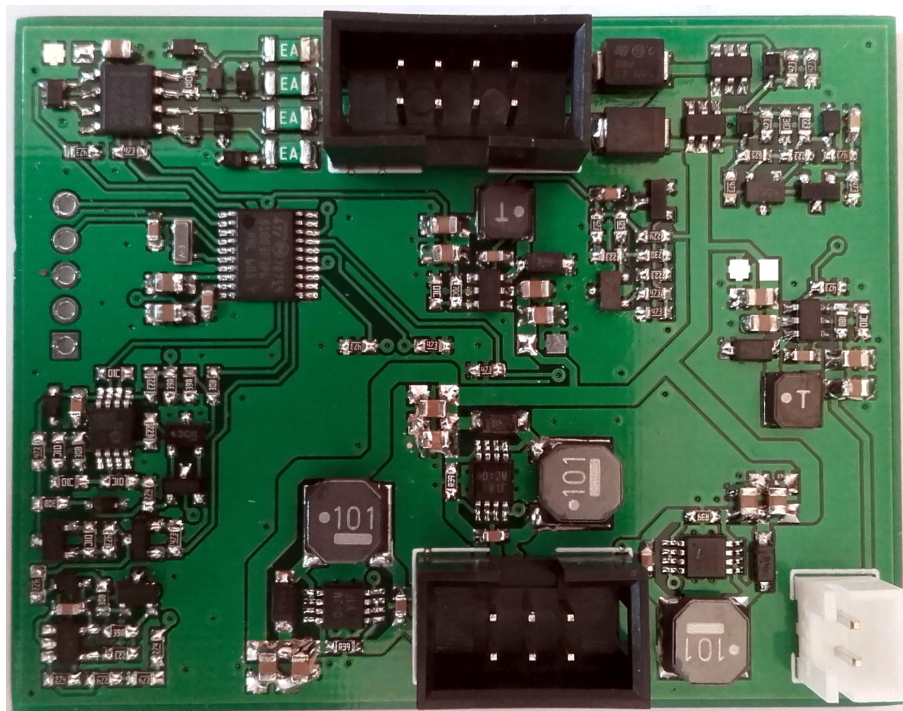
Tarkvara loomiseks kasutati IAR Embedded Workbench koodiarenduskeskkonda. Tarkvara kirjutamisel jagati programmikood võimalikult optimeeritult erinevatesse failidesse, et hilisem muutmine oleks hõlpsam ja koodi lugemine arusaadavam. Samuti saab loodud alamprogrammide, funktsioonide koosnevaid faile kasutada järgmistes projektides. Tabelis 6 on esitatud tarkvara failid ja nende kirjeldused. Failide „*main.c*” ja „*led_slave.c*” lähtekood on esitatud käesoleva töö lõpus (Lisa 3 – Lähtekoodi failid „*main.c*” ja „*led_slave.c*”).

Tabel 6. Tarkvara failid.

Faili nimi	Kirjeldus
adc.h ; adc.c	ADC seadistamine, pinge mõõtmine.
clock.h ; clock.c	Taktsignaali seadistamine.
eeeprom.h ; eeprom.c	Kalibratsiooni kirjutamine, lugemine, valideerimine kontrollsumma abil.
gpio.h ; gpio.c	Mikrokontrolleri sisendite, väljundite seadistamine.
led_slave.h ; led_slave.c	Peatsükli kasutatavad alamprogrammid.
main.c	Peatsükkel ja kalibratsioon.
pwm.h ; pwm.c	PWM väljundite seadistamine.
timer2.h ; timer2.c	Kasutatakse sekundite loendamiseks.
timer4.h ; timer4.c	Kasutatakse lühiajaliste viidete tekitamiseks.
uart.h ; uart.c	UART mooduli abil diagnostika kuvamine, andmeside seadistamine.
wdt.h ; wdt.c	„ <i>watchdog</i> ” loenduri seadistamine.

9 Elektrilised mõõtmised

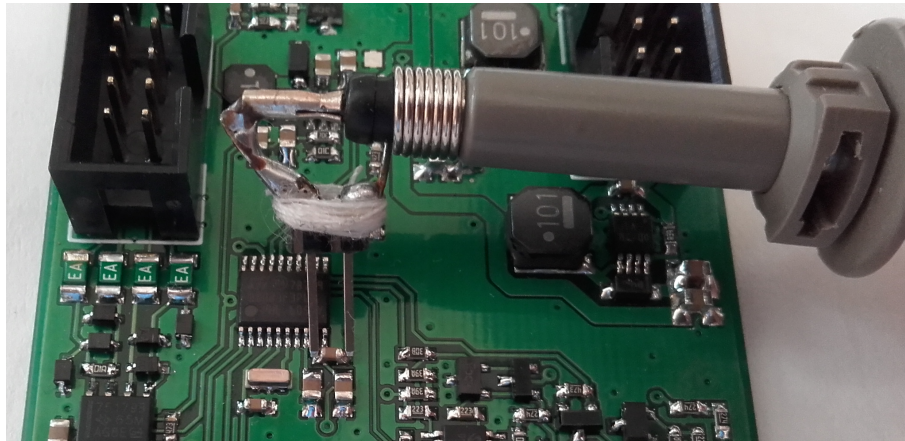
Järgmise etapina telliti trükkplaadid tootjalt EasyEDA ning komponendid joodeti käsitsi. Joonisel 24 on esitatud trükkplaadi viimane versioon. Eelnevalt tellitud trükkplaadi esimene versioon vajas muudatusi skeemis ja trükkplaadi disainis ning seetõttu telliti teine versioon, mille mõned katsetulemused on antud peatükis esitatud. Esitatud viimase versiooni trükkplaadil on mõned kondensaatorid jootmata, kuna katsete põhjal tehti elektriskeemis veel mõned muudatused.



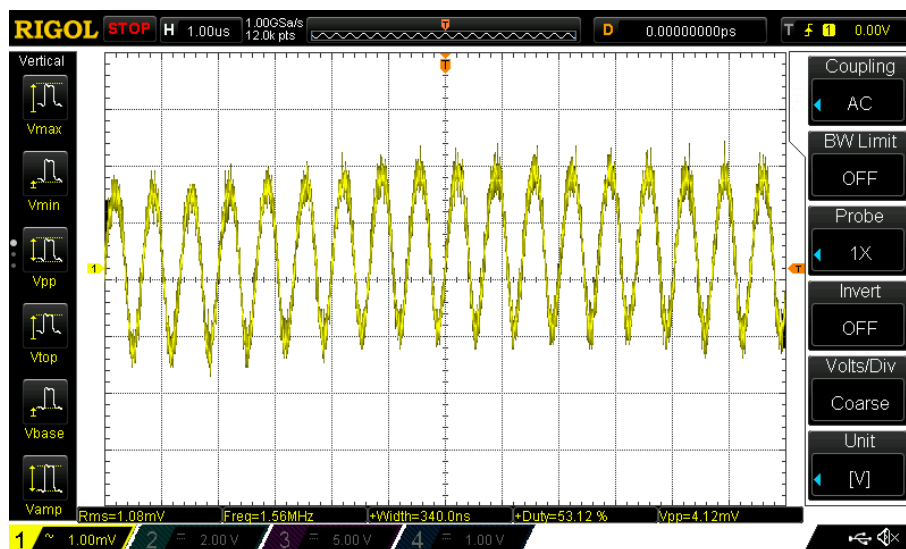
Joonis 24. Valgusti monteeritud trükkplaat.

9.1 Pinge impulss-stabilisaatori väljundpinge pulsatsioon

Järgnevalt tehti kindlaks +5V väljundpingega impulss-stabilisaatori pulsatsioon ja kasutegur. Pulsatsiooni mõõdeti mikrokontrolleri lahtisidestus kondensaatorilt C7. Joonisel 25 on näidatud mõõteotsiku konfiguratsioon pulsatsiooni mõõtmiseks. Mürade minimeerimiseks on mõõteotsiku maaühendus kinnitatud võimalikult otse ja tugevalt.



Joonis 25. Pinge pulsatsiooni mõõtmine.



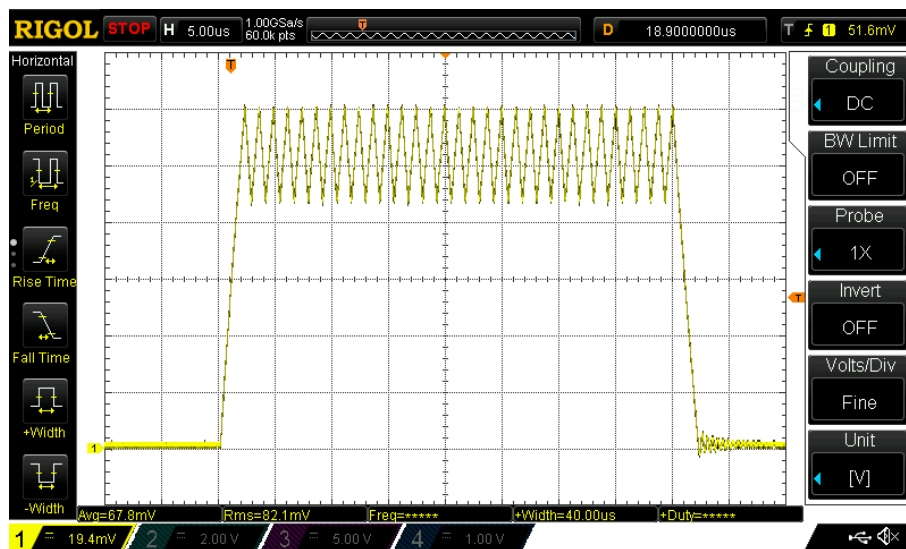
Joonis 26. +5V impulss-stabilisaatori pulsatsioon.

Joonisel 26 on esitatud +5 V impulss-stabilisaatori poolt tekitatud pinge pulsatsioon. Signaali tipust-tippu amplituud on ligikaudu 4 mV ja sagedus 1,5 MHz on vastavuses AOZ1280 lülitussagedusega. Mikrokontrolleri ADC samm suurus on ligikaudu 5 mV ning seega on pulsatsiooni mõju ADC mõõtetulemusele piisavalt väike.

Järgmisena leiti +5 V stabilisaatori kasutegur. Selleks ühendati seadmele +24 V toide ja transiiveri väljundisse 100 Ω sobitustakisti. Kõik ülejäänud ahelad peale transiiveri, mikrokontrolleri ja kaitseahelate olid välja lülitatud. Mõõdetud voolutarve oli 22,4 mA. Seejärel maandati signaal „EN_+5V”, mis +5 V stabilisaatori välja lülitab ning tarbitav vool oli 3,8 mA. Leitud vool koosneb peamiselt kaitseahelate ja voolu impulss-stabilisaatorite poolt tarbitavast tühijooksu voolust. Järelikult on +5V impulss-stabilisaatori tarbitav vool 18,6 mA. Järgnevalt toideti transiiverit ja mikrokontrollerit programmeerimis pistikust ning +5 V stabilisaator oli lahti ühendatud. Tarbitav vool oli 56,5 mA. Seega väljundvõimsus on 283 mW ja tarbitav võimsus on 446 mW ning kasutegur on ligikaudu 63 %.

9.2 Voolu impulss-stabilisaatori katsetamine

Järgnevalt katsetati voolu impulss-stabilisaatori voolu kasvu kiirust ning leiti kasutegur.



Joonis 27. Valgusdiodmassiivi voolu kasvukiirus.

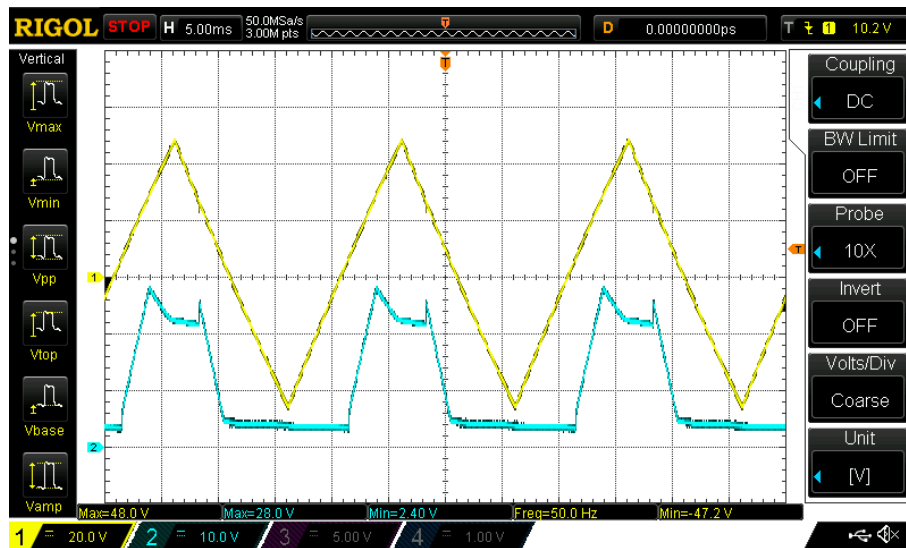
Joonisel 27 on näha valgusdiodmassiivi voolu kasvu kiirus mõõdetuna $390 \text{ m}\Omega$ takistilt R1. Ühele ruudule vertikaalis vastab ligikaudu 50 mA ning keskmine vool on ligikaudu 260 mA . Kolmnurksignaali kujuline valgusdiodide voolu pulsatsioon on ligikaudu 80 mA . Antud joonisel on vooluimpulsi pikkuseks $40 \mu\text{s}$, mis on saavutatud mikrokontrollerist väljastatava PWM signaaliga, omades täitetegurit $10/255$. Voolutugevuse 260 mA ja seejärel 0 mA saavutamine võtab aega ligikaudu $2,5 \mu\text{s}$, mis tähendab, et täiteteguri $1/255$ korral vool 260 mA suuruseks kasvada ei jõua. Küll aga $1/255$ suurema täiteteguri korral on voolu kasvu kiirus piisav.

Voolu impulss-stabilisaatorite kasuteguri määramiseks leiti iga stabilisaatori tarbitav võimsus ja valgusdiodidel eralduv võimsus. Kasuteguri määramisel oli toitepinge 24 V ja täitetegur $255/255$. Lahutades $+5 \text{ V}$ stabilisaatori, kaitseahelate voolutarbimised, leiti voolu impulss-stabilisaatorite voolutarbed. Samal ajal mõõdeti iga valgusdiodmassiivi päripinge. Tabelis 7 on esitatud leitud suurused ja arvutatud kasutegurid.

Tabel 7. Voolu impulss-stabilisaatorite kasutegur.

Parameeter	Punane LED	Roheline LED	Sinine LED	Ühikud	Kirjeldus
I_{IN}	170	240	234	mA	Stabilisaatori tarbitav vool
I_{LED}	256	256	256	mA	Valgusdiodi massiivi vool
V_F	12.7	19.2	18.8	V	Valgusdiodi massiivi pinge
P_{IN}	4.08	5.76	5.62	W	Tarbitav võimsus
P_{OUT}	3.25	4.92	4.81	W	Valgusdiodmassiivil eralduv võimsus
η	78	85	86	%	Kasutegur

9.3 Valgusti üle- ja vastupinge kaitseahelate katsetamine

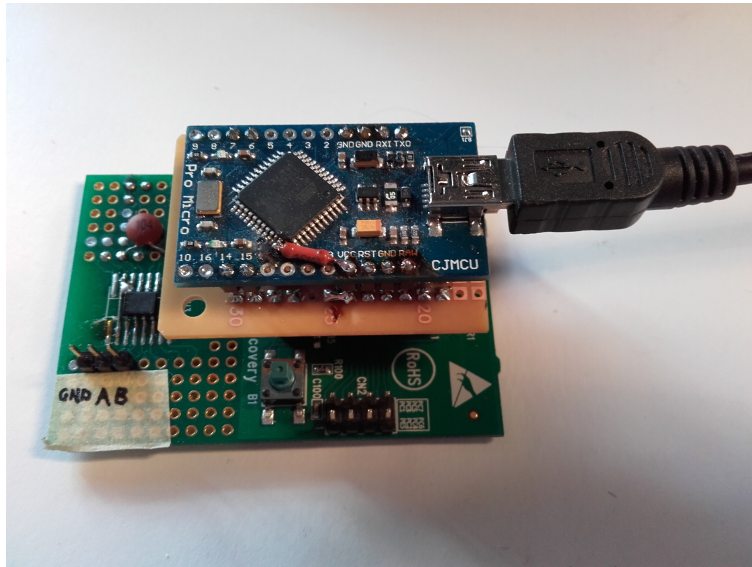


Joonis 28. Ülepinge ja vastupinge katsetamine.

Joonisel 28 on kollase joonega tähistatud toitepistikust X3 siseneva pinge kuju ning sinise joonega on tähistatud elektriskeemi signaal „+24V”. Toitepistikuga ühendatud helivõimendi väljund genereeris 50 Hz kolmnurksignaali maksimumiga +48 V ja miinimumiga -48V. Toitesiooni signaali pealt „+24V” mõõdetud maksimaalne pinge on 28 V, jäädes lubatud piiridesse. Vastupingestamise korral on pinge miinimumiks 2,4 V, mis tähendab, et vool on tõkestatud ning toimub aeglane pinge langemine toitekondensaatorite tühjenemise tõttu.

9.4 Andmeside katsetamine

Andmeside katsetamiseks ühendati omavahel kaks valgustit ja juhtkontrolleri asemel kasutati katsetamise eesmärgil loodud konverterit (Joonis 29). Antud konverter väljastab diferentsiaalset signaali kümne valgusti jaoks. Konverter ühendatakse USB liidese abil PC-ga ning valgustite juhtimiseks kasutatakse DMXControl tarkvara [3].



Joonis 29. Andmeside katsetamise jaoks loodud konverter.



Joonis 30. Juhtkontrolleri ja kahe valgusti andmeside katsetamine.

Joonisel 30 tähistab kollane joon juhtkontrolleri väljundit ja esimese valgusti sisendit. Sinise joonega on tähistatud esimese valgusti väljund ja teise valgusti sisend. Violetne joon tähistab esimese valgusti „EN_BUF” signaali (vt. Lisa 1 – Elektriskeem). Antud juhul saadab juhtkontroller välja 30 baiti, kusjuures iga baiti väärtus on null. Kui esimene valgusti on kolm baiti vastu võtnud muutub signaali „EN_BUF” nivoo kõrgeks ning puhver lülitatakse sisse. Puhvri lülitamine toimub peale esimest stopp bitti ning seda 1 μ s jooksul. Kui puhver on aktiveeritud, järgib esimese valgusti väljund juhtkontrolleri poolt edastatud signaali. Pärast 30 baiti saatmist on juhtkontrolleri väljund „idle” olekus. Kui valgusti tuvastab, et „idle” olek on kestnud üle 30 μ s, lülitatakse puhver välja ning oodatakse kolme uut baiti.

10 Majanduslik ülevaade

Järgnevalt on esitatud nimekiri trükkplaadil olevatest komponentidest (BOM).

Tabel 8. Mikroskeemid ja pooljuhid

Kirjeldus	Viide skeemile	Tootja	Tootja kood	Tüki hind
Pinge impulss-stabilisaator	U4, U5	Alpha & Omega Semiconductor	AOZ1280CI	0,240
Rööp-stabilisaator 2.5V	U6, U7, U10	Fairchild Semiconductor	LM431SCCMF	0,059
Operatsioonivõimendi	U11	Microchip Technology	MCP6001T-I/OT	0,166
Operatsioonivõimendi	U9	Microchip Technology	MCP6002-E/MS	0,242
3-oleku puhver	U13	Fairchild Semiconductor	NC7SZ126P5X	0,031
Voolu impulss-stabilisaator	U1, U2, U3	Richtek	RT8471GFP	0,418
Transiiver	U12	Texas Instruments	SN75179BD	0,170
Mikrokontroller	U8	STMicroelectronics	STM8S003F3P6	0,506
MOSFET N-tüüpi kanaliga	Q3, Q4, Q5, Q7	Infineon	2N7002H6327X TSA2	0,022
MOSFET P-tüüpi kanaliga	Q6, Q8	Alpha & Omega Semiconductor	AO3403	0,067
MOSFET P-tüüpi kanaliga	Q1, Q2	Fairchild Semiconductor	FDC5614P	0,132
Schottky diood	D1, D2, D3, D4, D5	On Semiconductor	MBR0540T1G	0,032
TVS kaitsedioid madala siirdemahtuvusega	D8, D9, D10, D14, D15, D16	Nexperia	PESD5V0L1BA	0,063
48V TVS kaitsedioid	D7	STMicroelectronics	SMBJ48CA-TR	0,090
24V TVS kaitsedioid	D6	Vishay	SMBJ24A-E3/52	0,057
16V stabilitron	Z1, Z2, Z5	Nexperia	PDZ16B	0,013
5.1V stabilitron	Z3, Z6	Nexperia	PDZ5.1B.115	0,015
24V stabilitron	Z4	On Semiconductor	MM3Z24VT1G	0,014

Tabel 9. Takistid.

Väärtus	Viide skeemile	Tüki hind
390 mΩ	R1, R2, R3	0,042
22 kΩ	R14, R15, R21, R22, R46, R47, R52	0,001
205 kΩ	R16	0,001
169 kΩ	R23	0,001
249 Ω	R24, R37, R38	0,001
270 kΩ	R25, R32, R33, R34, R36, R39	0,001
2 kΩ	R28, R35, R45, R53	0,001
47 kΩ	R4, R5, R6, R11, R12, R13, R17, R18, R19, R20, R26, R27, R30, R44, R49, R55, R56	0,001
4,7 kΩ	R40, R54	0,001
100 Ω	R48	0,001
6.2 MΩ	R50	0,001
1.2 MΩ	R51	0,001
52,3 kΩ	R7	0,001
10 kΩ	R8, R10, R29, R31, R41, R42, R43	0,001
150 kΩ	R9	0,001

Tabel 10. Muud passiivsed komponendid

Kirjeldus	Viide skeemile	Tootja	Tootja kood	Tüki hind
Resonaator 16 MHz	Y1	Murata	CSTCE16M0V53-R0	0,208
Induktor 100 μH	L1, L2, L3	Ferroc core	DJNR6028-101-S	0,094
Induktor 100 μH	L4, L5	Ferroc core	DJNR4018-101-S	0,072
Kondensaator, 1 μF, 0805, 50V, X7R	C1, C2, C3, C12, C13, C14, C15, C17, C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34	Samsung	CL21B105KBFNNNG	0,014
Kondensaator, 100 nF, 0603, 50V, X7R	C4, C5, C6, C7, C21, C22, C24	Samsung	CL10B104KB85PNC	0,006
Kondensaator, 10 nF, 0603, 50V, X7R	C10, C11, C20	Murata	GRM188R71H103KA01D	0,004
Kondensaator, 1 nF, 0603, 50V, X7R	C19	Samsung	CL10B102KB8NNND	0,003
PPTC kaitse	F4, F5, F6, F7	ECE	SN010-60	0,070

Tabel 11. Ühendused

Kirjeldus	Viide skeemile	Tootja	Tootja kood	Tüki hind
Toide, andmeside	X3	Amphenol	T821-1-08-S1	0,180
Valgusdiodid	X1	Amphenol	T821-1-06-S1	0,120
Ventilaator	X2	JST	JST-B2B-XH-A	0,083

Kõik tabelis esitatud komponendid on valitud Farnell ja TME kataloogidest. Väljatoodud hinnad kehtivad 100+ koguste korral ning on esitatud eurodes ja ilma käibemaksuta. Ühe trükkplaadi valmistamiseks vajalike komponentide hind on 6,06 eurot. Erinevaid trükkplaadi tootjate hindasid uurides kujuneb monteerimata trükkplaadi keskmiseks hinnaks ligikaudu 0,75 eurot sajakordse koguse korral.

Korpuse prototüübi materjalikulu koos pistikute, ventilaatori ja valgusdiod mooduliga on ligikaudu 7 eurot, kuid antud hind on kehtiv materjalide miinimum koguste korral.

Hinnanguliselt oleks ühe valgusti materjalikulu ligikaudu 14 eurot, kui toodetavate seadmete arv oleks mõnisada tükki. Selle sisse pole arvestatud korpuse töötlemise, trükkplaadi monteerimise, valgusti monteerimise kulusid.

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli välja pakkuda valgusefektisüsteemi lahendus kodukasutaja ja väiksemate ürituste korraldamise tarbeks. Valgustussüsteem koosneb juhtkontrollerist ning selle külge jadamisi ühendatud valgustitest. Süsteemi juhitakse arvutivõrgu kaudu, kasutades spetsiaalset tarkvara. Antud valgustussüsteemi eesmärgiks on tekitada mitmekesiseid, võimalikult kvaliteetseid valgusefekte, kasutades lihtsaid valgusdiodvalgusteid. Antud süsteemi üheks põhiliseks eripäraks võrreldes olemasolevate süsteemidega on tavalise DMX512 konverteri asendamine paindliku juhtkontrolleriga. Erinev on valgustite andmeside protokoll, mis võimaldab väikest arvu valgusteid juhtida suure kaadrisagedusega ning ilma adresseerimiseta.

Lisaks tervikideele projekteeriti ja valmistati valgusdiod valgusti prototüüp, mis hõlmas endas korpuse, elektriskeemi, trükkplaadi ja tarkvara disainimist. Valgusti korpus valmistati alumiiniumist, mille välimisele küljele kinnitati RGB valgusdiodmoodul. Korpuse sisse kinnitati trükkplaat ning radiaator koos ventilaatoriga. Valgustit juhib STM8S003F3 mikrokontroller, millele antud töö raames täisfunktsionaalne tarkvara loodi. Töökindluse suurendamiseks on valgusti toitesisend varustatud kaitseahelatega vastupinge, ülepinge ja alapinge eest. Valgusti efektiivsuse tõstmiseks on valgusdiodide voolu reguleerimiseks ja pinge muundamiseks kasutatud impulss-stabilisaatoreid. Valgusdiodide temperatuuri määramiseks mõõdetakse punaste valgusdiodide päripinget, mis temperatuuri kasvades langeb, konstantse mõõtevoolu korral.

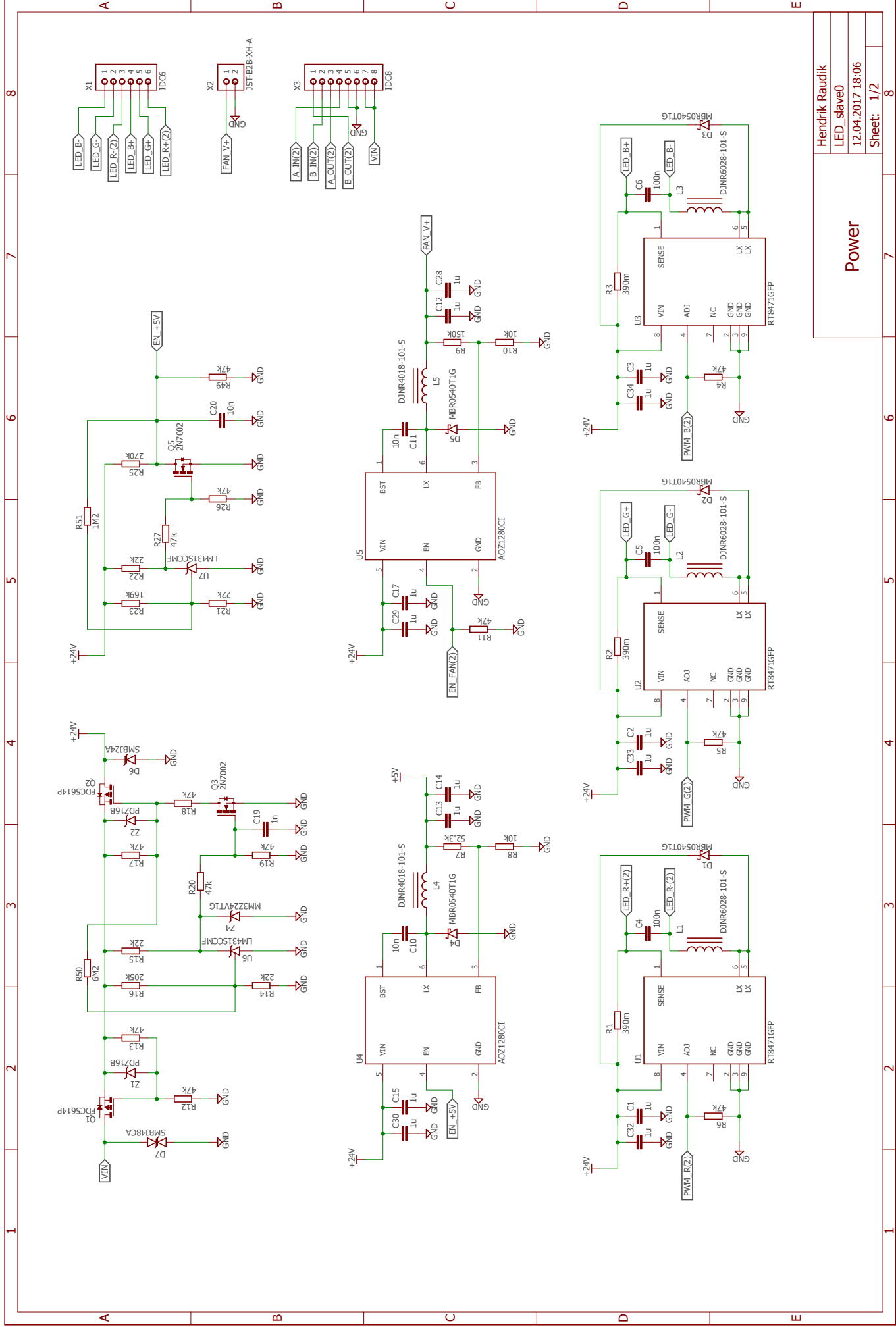
Süsteemi katsetati ajutise juhtkontrolleri ja kahe valgustiga ning veenduti projekteeritud süsteemi korrektsuses. Kahe valgustiga süsteem toimis ootuspäraselt ning järgmiseks sammuks on juhtkontrolleri arendamine ja ülejäänud puuduvate osade valmistamine, et valgusefektisüsteemi terviklahenduse arendus lõpule viia.

Kasutatud kirjandus

- [1] <http://www3.lightrama.com/siteimages/LOR-BasicLayout-DMX-E1-31-RevB.jpg> (30.03.17)
- [2] <http://cdb.s3.amazonaws.com/ItemRelatedFiles/10191/dmx-101-handbook.pdf> (30.03.17)
- [3] <https://www.dmxcontrol.org/> (23.04.17)
- [4] http://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/PESDXL1BA_SER.pdf (01.05.17)
- [5] <http://www.artisticlicence.com/WebSiteMaster/User%20Guides/art-net.pdf> (01.05.17)
- [6] <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2801.pdf> (01.05.17)
- [7] http://eu.mouser.com/Connectors/Audio-Video-Connectors/XLR-Connectors/_/N-778cz?P=1z0x8fv (01.05.17)
- [8] http://www.samsungsem.com/kr/front/downloadcms.do?path=/kr/support/product-search/mlcc/_icsFiles/afieldfile/2017/03/10&fileName=Data%20sheet_CL21B105KBFNNG.pdf (02.05.17)
- [9] <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm8svldiscovery.html> (02.05.17)
- [10] <http://www.murata.com/en-us/api/pdfdownloadapi?cate=&partno=CSTCE16M0V53-R0> (02.05.17)
- [11] <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/42/5a/27/87/ac/5a/44/88/DM00024550.pdf/files/DM00024550.pdf/jcr:content/translations/en.DM00024550.pdf> (02.05.17)
- [12] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75179b.pdf> (02.05.17)
- [13] <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-960.pdf> (02.05.17)
- [14] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75179b.pdf> (02.05.17)
- [15] <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/NC/NC7SZ126.pdf> (02.05.17)
- [16] http://www.ece.com.tw/upload/products_1_20151120103220.pdf (02.05.17)
- [17] <http://www.ti.com/lit/an/slla292a/slla292a.pdf> (02.05.17)
- [18] http://www.aosmd.com/res/data_sheets/AOZ1280CI.pdf (02.05.17)
- [19] <http://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf> (02.05.17)
- [20] <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MBR0540T1-D.PDF> (02.05.17)
- [21] <http://www.ti.com/lit/an/snva038b/snva038b.pdf> (02.05.17)
- [22] http://www.richtek.com/assets/product_file/RT8471/DS8471-02.pdf (02.05.17)
- [23] <http://www.tme.eu/ee/Document/fa83f6cdf5fbd2520ad2187996d1dd0d/DJNR%206028-SERIES-S.pdf> (02.05.17)
- [24] <http://www.tme.eu/ee/Document/20a4c60791ec529972b7bca1f08272cf/DJNR%204018-SERIES-S.pdf> (02.05.17)

- [25] <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM431SC.pdf> (02.05.17)
- [26] <http://sound.whsites.net/project87.htm> (02.05.17)
- [27] <http://www.ti.com/lit/an/sboa046/sboa046.pdf> (02.05.17)
- [28] <http://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-44/number-4/articles/high-side-current-sensing-wide-dynamic-range.pdf> (02.05.17)
- [29] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21733j.pdf> (02.05.17)
- [30] <http://www.infineon.com/dgdl/Reverse-Battery-Protection-Rev2.pdf?fileId=db3a304412b407950112b41887722615> (02.05.17)
- [31] <http://www.ti.com/lit/an/snva190b/snva190b.pdf> (02.05.17)
- [32] <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FD/FDC5614P.pdf> (02.05.17)
- [33] http://www.ebay.com/sch/i.html?_odkw=20w+rgb+smd&_osacat=0&_from=R40&_trksid=p2045573.m570.11313.TR0.TRC0.H0.X20w+rgb+smd+led.TRS0&_nkw=20w+rgb+smd+led&_sacat=0 (02.05.17)
- [34] <http://www.kamitra.ee/nouanded/> (02.05.17)

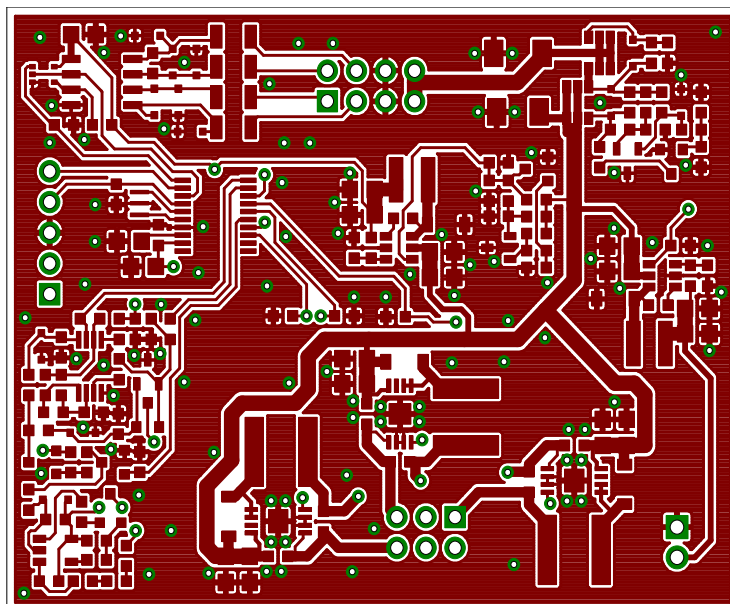
Lisa 1 – Elektriskeem



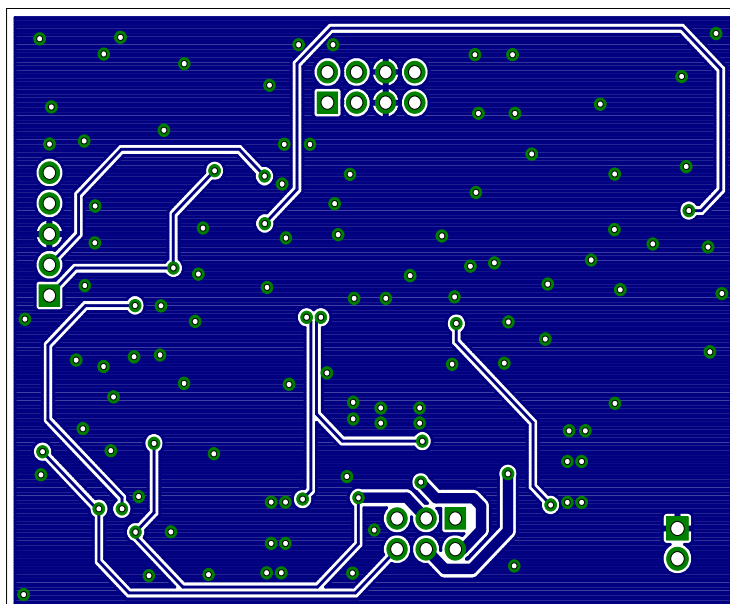
Hendrik Raudik	
LED_slave0	
12.04.2017 18:06	
Sheet: 1/2	8

Power

Lisa 2 – Trükkplaadi vasekihtide joonised



Joonis 31. Trükkplaadi ülemine vasekiht.



Joonis 32. Trükkplaadi alumine vasekiht.

Lisa 3 – Lähtekoodi failid „main.c” ja „led_slave.c”

```
1 //LED fixture software for STM8S003F3
2 //10.03.2017
3 //OPTION BYTES MUST BE MODIFIED!!!
4 //AFR0 == Alternate active
5 //IWDG_HW == Hardware
6 //External oscillator 16 MHz must be used
7 //NB!!! HARDWARE WDT OPTION BYTE must disabled for debbuging
8 #include <iostm8s003f3.h>
9 #include <intrinsics.h>
10 #include "adc.h"
11 #include "gpio.h"
12 #include "clock.h"
13 #include "wdt.h"
14 #include "pwm.h"
15 #include "uart.h"
16 #include "timer2.h"
17 #include "timer4.h"
18 #include "eeprom.h"
19 #include "led_slave.h"
20
21 int main(void) {
22     static unsigned char rgb[3];
23     static struct led_voltages vled;
24
25     wdt_init();
26     clock_init();
27     gpio_init();
28     adc_init();
29     timer2_init();
30     timer4_init();
31     uart_init();
32     pwm_init();
33
34     //calibration
35     if(jumper_on_test()==1){ // test if jumper is ON
36         while(jumper_off_test()!=1){ // exit, if jumper is taken OFF
37             calibration_print(0);
38             WDT_REFRESH;
39         }
40         eeprom_write(led_voltage_get()); //store calibration voltage
41         while(1){ // calibration done, loop forever, device needs reset
42             calibration_print(1); //constantly 10mA, voltage can be measured
43             WDT_REFRESH;
44         }
45     }
46     //read calibration
47     vled.cool=eeprom_read();
48     // check, if calibration value is valid:
49     if(vled.cool>10950 || vled.cool<10650){malfunction_loop();}
50     //different temperature set-points calculation
51     vled.cold=vled.cool+400; // 400mV higher
52     vled.hot=vled.cool-300; // 300 mV lower
53     vled.hotter=vled.hot-50; // more 50 mV lower
54     vled.cooler=vled.hot+50; // 50mV higher
55
56     while(1) {
57
58         // wait data line idle condition and then disable buffer:
59         wait_idle_disable_buffer();
60         // assign new rgb values:
61         set_pwm_duty(rgb);
62         // try, force temperature measurement; fan control:
63         check_led_temp(&vled,rgb);
64         // receive and store 3 bytes: red,green,blue and then enable buffer:
65         get_rgb_enable_buffer(rgb);
66         // refresh watchdog timer:
67         WDT_REFRESH;
68     }
69 }
70 }
```

```
1  #include <iostm8s003f3.h>
2  #include <intrinsics.h>
3  #include "led_slave.h"
4  #include "adc.h"
5  #include "gpio.h"
6  #include "wdt.h"
7  #include "uart.h"
8  #include "timer2.h"
9  #include "pwm.h"
10 #include "timer4.h"
11 #include "eeprom.h"
12 //=====
13 void delay_100us(unsigned int n){ // n times one hundred microseconds
14     TIMER4_FLAG_CLEAR;
15     TIMER4_CLEAR;
16     while(n>0){
17         while(TIMER4_FLAG==0){};
18         TIMER4_FLAG_CLEAR;
19         n=n-1;
20     }
21 }
22 //=====
23 void malfunction_loop(void){
24     PWM_OFF;
25     while(1){
26         MEASURE_OFF;
27         delay_100us(1000);
28         MEASURE_ON;
29         delay_100us(1000);
30     }
31 }
32 //=====
33 // Communication functions
34 //=====
35 void get_rgb_enable_buffer(unsigned char *rgb){
36     // wait data of 3 bytes
37     while(RX_FLAG==0){}
38     rgb[0]=UART_REG; // get red pwm
39     while(RX_FLAG==0){}
40     rgb[1]=UART_REG; // get green pwm
41     while(RX_FLAG==0){}
42     BUFFER_ON; // quickly enable buffer
43     rgb[2]=UART_REG; // get blue pwm
44 }
45 //=====
46 void wait_idle_disable_buffer(void){
47     unsigned char i;
48     i=0;
49     while(i<50){ // wait bus idle condition
50         if(RX_PIN==1){i++;} // check RX pin level
51         else{i=0;}
52         UART_REG; // just read register, not storing it, RX flag is cleared
53     }
54     UART_STATUS_REG; // read register, clear error flags (overrun flag etc)
55     UART_REG; // just read register, not storing it, RX flag is cleared
56     BUFFER_OFF; //disable buffer
57 }
58 //=====
59 // LED voltage measurement, calibration functions
60 //=====
61 unsigned char jumper_on_test(void){
62     unsigned char i;
63     i=0;
64     while(TX_PIN==0){if(i>100){return 1;}i++;} // must be LOW for 100 samples
65     return 0; //jumper was not correctly ON
66 }
67 //=====
68 unsigned char jumper_off_test(void){
69     unsigned char i;
70     i=0;
71     while(TX_PIN==1){if(i>100){return 1;}i++;} // must be HIGH for 100 samples
72     return 0; //jumper was not correctly OFF
73 }
```

```
74 //=====
75 unsigned int led_voltage_calc(unsigned int *ref, unsigned int *led){
76     unsigned long a32, b32;
77     a32=*led;
78     a32=a32*2495;
79     b32=*ref;
80     b32=b32*3;
81     a32=a32/b32;
82     return a32+9980;
83 }
84 //=====
85 unsigned int led_voltage_get(void){
86     static unsigned int ref,led;
87
88     PWM_OFF; // disable led drivers
89     delay_100us(1);
90     MEASURE_ON; // switch ON measuring circuit
91     delay_100us(MEAS_DELAY); // wait measuring circuit stabilization
92     adc_get(&ref,&led); // do ADC conversation
93     MEASURE_OFF;
94     delay_100us(1);
95     PWM_ON;
96     return (led_voltage_calc(&ref,&led));
97 }
98 //=====
99 void calibration_print(unsigned char sw_meas_always_on){
100     static unsigned int ref, led;
101
102     if(timer2_get_sec()>0){
103         TIMER2_CLEAR;
104         ENABLE_UART_TX;
105         uart_print("EEPROM = ");uart_nr(eeprom_read());CR;
106         MEASURE_ON;
107         delay_100us(MEAS_DELAY); // wait measuring circuit stabilization
108         adc_get(&ref,&led);
109         //if SW_MEAS is constantly ON, LED voltage measurement manually can be done
110         if(sw_meas_always_on == 0){MEASURE_OFF;}
111         uart_print("REF = ");uart_nr(ref);uart_print(" LED = ");uart_nr(led);CR;
112         uart_print("VOLTAGE = ");uart_nr(led_voltage_calc(&ref,&led));CR;
113         DISABLE_UART_TX;
114     }
115 }
116 //=====
117 void check_led_temp(struct led_voltages *vled, unsigned char *rgb){
118     unsigned char time;
119     unsigned int voltage;
120
121     time=timer2_get_sec();
122     //after 10 sec try to measure(only if LED-s OFF);after 20sec force measurement
123     if(time>TIME_TRY && rgb[0]==0 && rgb[1]==0 && rgb[2]==0 || time>TIME_FORCE){
124         TIMER2_CLEAR;
125         voltage=led_voltage_get();
126         //check if voltage is between critical limits
127         if(voltage > vled->cold || voltage < vled->hotter){main_loop();}
128         if(FAN_STATUS==0 && voltage < vled->hot){FAN_ON;}
129         else if(FAN_STATUS==1 && voltage > vled->cooler){FAN_OFF;}
130     }
131 }
```