EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Mihkel Ruul

NUTIKAS VALGUSLÜLITI

SMART LIGHT SWITCH

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: Janar Kalder, PhD

Kaasjuhendaja: Jaak Jõgi, MSc

Tartu 2025

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Mihkel Ruul		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Nutikas valguslüliti			
Lehekülgi: 44	Jooniseid: 17	Tabeleid: 0	Lisasid: 2
ETIS-e valdkond ja CERCS-i kood: ETIS 4.17 Tehnikateadused, CERCS T140 Energeetika Juhendaja(d): Janar Kalder, Jaak Jõgi Osakond või õppetool: Energiakasutuse õppetool Kaitsmiskoht ja -aasta: F. R. Kreutzwaldi 56, 2025			
Viimastel aastatel on kasvanud huvi nutika kodu lahenduste vastu, mis aitavad parandada elukeskkonna mugavust ja energiatõhusust. Töö keskendus probleemi lahendamisele, kuidas valgustust juhtida viisil, mis toetaks paremini inimese tsirkadiaanrütmi ning võimaldaks valgust reguleerida automaatselt vastavalt ruumi valgusoludele. Töö eesmärk oli projekteerida ja ehitada prototüüp nutikast valguslülitist, mis võimaldab valgustugevust reguleerida nii manuaalselt kui ka automaatselt. Töö käigus määratleti seadme funktsionaalsed ja mittefunktsionaalsed nõuded. Samuti viidi läbi turu-uuring, mis näitas, et olemasolevad lahendused ei vasta täielikult Euroopa elektrivõrgu tingimustele ega paku piisavat automaatikataset. Riistvaradisainis valiti ESP32-S2 mikrokontroller, arendati sobiv toiteahel, valgusanduri ja pöördkooderi lahendus ning sümistori põhine juhtimisahel koos impulssrelee süsteemiga. Erilist tähelepanu pöörati trükkplaadi disainile ja komponentide sobitamisele seadmetoosi formaati. Prototüüpimisel ilmnes mitmeid väljakutseid, sealhulgas mikrokontrolleri jootmine ja puudulikult planeeritud skeemilahendused, mille tõttu ei õnnestunud luua täielikult töökorras prototüüpi. Kuigi töö lõpptulemusena täielikult toimivat seadet ei valminud, saavutati projekti käigus oluline areng elektroonika disaini ja prototüüpimise oskustes. Prototüüp kinnitas, et loodud lahendus vastas suuremas osas seatud nõuetele ning omab potentsiaali edasiseks arendamiseks reaalseks tooteks. Edasised sammud hõlmaksid tarkvara lõpuleviimist, seadme töökindluse suurendamist ning valgustuse spektri juhtimise ja liikumisandurite lisamist.			
Võtmesõnad: elektroonika, trükkplaat, mikrokontroller, valgusti			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Bachelor's Thesis	
Author: Mihkel Ruul		Curriculum: Engineering	
Title: Smart light switch			
Pages: 44	Figures: 17	Tables: 0	Appendices: 2
ETIS research field and (CERCS) code: ETIS 4.17 Engineering Sciences, CERCS T140 Energy research Supervisor(s): Janar Kalder, Jaak Jõgi Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Place and year of defence: F. R. Kreutzwaldi 56, 2025			
In recent years, interest in smart home solutions has increased, aiming to improve both living comfort and energy efficiency. This thesis focused on addressing how lighting can be controlled in a way that better supports the human circadian rhythm and allows automatic adjustment based on ambient light conditions. The objective was to design and build a prototype of a smart light switch capable of regulating light intensity both manually and automatically. *During the project, both functional and non-functional requirements for the device were defined. A market analysis revealed that existing solutions do not fully comply with European electrical grid standards and often lack adequate automation features. In terms of hardware, an ESP32-S2 microcontroller was selected, along with the development of a suitable power circuit, light sensor and rotary encoder interface, and a triac-based dimming circuit combined with an impulse relay system. Special attention was given to the printed circuit board design and fitting the components into a standard wall-mount enclosure.* *Several challenges emerged during prototyping, including difficulties with soldering the microcontroller and design flaws in the schematic, which ultimately prevented the creation of a fully functional prototype.* *Although a complete working device was not achieved, the project provided valuable experience in electronic design and prototyping. The prototype confirmed that the core concept met most of the defined requirements and has clear potential for further development into a real-world product. Future steps would include completing the software, improving system reliability, and adding features such as spectral light control and motion sensors.*			
Keywords: electronics, pcb, microcontroller, lighting			

SISUKORD

SISSEJUHATUS 5
1. VALGUSE MÕJU TERVISELE JA TÖÖKUSELE 6
2. SEADME NÕUDED JA TURU-UURING 8
2.1. Seadmele esitatavad nõuded 8
2.2. Turu-uuring 9
3. RIISTVARA DISAIN 13
3.1. Ülevaade ja plokkskeem 13
3.2. Mikrokontroller valik 14
3.3. Toiteahel 17
3.4. Valgusandur ja pöördkooder 19
3.5. Impulss relee ja selle juhtseade 21
3.6. Sümistori juhtimine ja selle komponendid 23
3.6.1. BT136 ja selle tööpõhimõte 23
3.6.2. TRIACi juhtimine MOC3022-ga 25
3.6.3. Nullpunkti tuvastamine H11AA1 abil 26
4. TRÜKKPLAAT 29
4.1. Skeemi loomine 29
4.2. Trükkplaadi disain 30
4.3. Trükkplaadi monteerimine ja prototüüpimise probleemid 32
5. TARKVARA DISAIN 36
5.1. Seadme tarkvara ülesehitus 36
5.2 Veebiliidese kavandamine 37
6. KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED 38
ALLIKALOEND 40
LISAD 42

SISSEJUHATUS

Viimastel aastatel on koduautomaatika muutunud oluliseks kodu mugavuse ja energiatõhususe parandamise vahendiks. Nutikodu süsteemid võimaldavad ühendada tavapärased elektriseadmed läbi interneti kasutaja mobiilirakendustega, pakkudes juurdepääsu, ajastusvõimalusi ja erinevaid automaatikafunktsioone distantsilt. Valgustuslahendused on selles kontekstis eriti tähtsad, kuna valgustus ei mõjuta üksnes silmade mugavust, vaid ka inimese biorütmi, enesetunnet ja tööviljakust. Traditsioonilised hämarduslülitid võimaldavad küll valgustugevuse käsitsi reguleerimist, kuid enamikul juhtudel jääb valgustuse juhtimine siiski staatiliseks, sest vajab pidevat inimese sekkumist.

Sellised lahendused, mis suudaksid automaatselt kohandada valgustust vastavalt ümbritsevale valgustustasemele, liikumismustrile või inimese päevasesse rutiini, ei ole turul veel levinud. Enamik olemasolevaid nutikodu valgustuslüliteid pakub küll mobiilirakenduste või hääljuhtimise kaudu lülitamise ja ajastamise võimalust, kuid harva kaasatakse reaalajas andurandmeid või režiime, mis järgib inimese bioloogilist kella. Seetõttu jääb automaatika tasandil sageli kasutamata võimalus parandada kodukeskkonna tervislikkust ja mugavust.

Käesoleva töö eesmärk on kavandada ja prototüüpida nutikas valguslüliti, mis kohandab valgustugevust vastavalt kasutaja tsirkadiaanrütmile ja keskkonnatingimustele. Lülitil on nii manuaalse kui automaatse juhtimise võimalus, kasutades selleks valgusandurit, mikrokontrollerit ja veebipõhist kasutajaliidest.

Töö keskendub elektroonikadisaini protsessile alates plokkskeemist kuni trükkplaadi valmistamiseni ning annab ülevaate tarkvara ja veebiliidese kavandamisest.

1. VALGUSE MÕJU TERVISELE JA TÖÖKUSELE

Optimaalne valgustase mõjutab otseselt inimese tervist, heaolu ja produktiivsust. Valgusel on keskne roll inimese bioloogilise kella ehk tsirkadiaanse rütmi reguleerimisel, mis määrab une ja ärkveloleku tsüklid, hormoonide tootmise ning vaimse ja füüsilise valmisoleku. Ebapiisav või ebasobiv valgustus võib kaasa tuua unetsükli häired, stressi, silmade väsimuse ning töövõime languse [1].

Ruumi tehisvalgustus toetab tööviljakust eelkõige nägemisvõime ja -mugavuse kaudu. Nägemisvõime sõltub valgustustihedusest, kontrastsusest ja vaadeldava objekti suurusest. Kui valgustihedus on liiga madal või kontrastsus ebapiisav, suureneb silmade koormus ja väheneb keskendumisvõime [1]. Tuleb arvestada, et nägemisvõime ei parane lõputult koos valgustustiheduse suurenemisega. Uuringud on näidanud, et kuni umbes 200 luksini võib valgustuse tõstmine anda märgatava positiivse mõju nägemisvõimele, kuid vahemikus 200 kuni 800 luksi jääb see mõju enamasti püsivaks ja olulisi edasisi paranemisi ei esine [2].

Lisaks visuaalsele mugavusele võimaldab tehisvalgus mõjutada tsirkadiaanset rütmi, simuleerides looduslikku päevavalgust ka olukordades, kus päikesevalgust napib. Eriti talvekuudel võib varahommikune tugev valgustus aidata kehal tajuda ärkamishetke loomulikuna, asendades puuduva päikesetõusu. Samuti on võimalik õhtuse valgustaseme järk-järguline langetamine kombineerituna sinise spektriosa vähendamisega, mis soodustab unisuse teket ja võimaldab unegraafikut varasemaks nihutada. Uuringud näitavad, et selliselt ajastatud tehisvalgus toetab paremat une kvaliteeti ja aitab korrigeerida hilinenud unetsüklit [3].

Üha enam on tähelepanu pööratud just sinise valguse mõjule, eriti seoses LED-valgustite ja ekraanide laialdase kasutusega. LED-valgusallikad sisaldavad suurel määral sinist spektriosa (~460 nm), mis võib negatiivselt mõjutada nii une-ärkveloleku rütmi kui ka organismi üldist talitlust. Näiteks tehti äädikakärbeste peal uuring, kuidas igapäevane sinine LED-valgus mõjutab eluea pikkust ja neuroloogilist seisundit. Uuringus leiti, et kärbsed, kes viibisid igapäevaselt 12 tundi sinises valguses, elasid märgatavalt lühemat aega, näitasid suurenenud ajukahjustuse märke ja neil ilmnes liikumisvõime langus võrreldes kärbestega, kes olid kas pimedas või valguses, mille sinine komponent oli eemaldatud. Tuleb märkida,

et aju neurodegeneratsioon toimus ka kärbestel, kellel olid geneetiliselt eemaldatud silmad, viidates sellele, et sinine valgus mõjutab otseselt ka mitte-visuaalseid ajustruktuure [4].

Antud tulemused viitavad sinise valguse võimalikule kahjulikkusele ka inimesel, kuna teadustöö autorid on täheldanud sarnaseid reaktsioone ka imetajatel ning esineb tõendeid, et sinine valgus võib mõjutada ajutalitlust isegi läbi kolju. Eriti oluline on arvestada, et kumulatiivne kokkupuude sinise valgusega on vananedes ohtlikum, vanemate kärbeste puhul ilmnesid kahjustused kiiremini ja intensiivsemalt kui noorematel [4].

Seetõttu on nutika valguslüliti disainimisel oluline mitte ainult valgustugevuse, vaid ka valguse spektraalse koostise reguleerimise võimalus. Kuigi disainitav valgustuslüliti võimaldab hetkel juhtida ainult valguse tugevust, oleks järgnevates versioonides võimalik lisada RGB-LEDi valguse värvi ja värvitemperatuuri reguleerimise funktsioon, mis vastab ööpäeva rütmile. Praegune lahendus toetab päevatsükli järgimist valgustugevuse kaudu, hommikul kasutatakse eredamat valgust, päeval mõõdukat ning õhtul hämaramat. Selline lähenemine aitab toetada tsirkadiaanset rütmi ja vähendada liigse sinise valguse võimalikku negatiivset mõju õhtutundidel. Lisaks soovitab standard EVS-EN 12464-1 hoida töökohtade valgustust teatud tasemetel: kontorites ja arvutitöö puhul vähemalt 300 lx, lugemispiirkondades 500 lx ning täppistöös isegi kuni 1000 lx. Standardi kohaselt võib vajaduse korral, näiteks vanemaealiste kasutajate või nägemispuudega inimeste puhul, valgustustugevust suurendada ühe astme võrra üle nimetatud miinimumtasemete [5]. Antud töös kavandatav seade võimaldab neid valgustusnõudeid automaatselt järgida ning vajadusel kohandada ka suuremale intensiivsusele, kombineerides seejuures mugavuse, energiatõhususe ja tervisliku valgusrežiimi.

Seega võimaldab nutikas valguslüliti kasutajal kohandada ruumivalgustust nii, et see toetab bioloogilist rütmi, kaitseb liigse sinise valguse eest ning parandab üldist heaolu ja töövõimet.

2. SEADME NÕUDED JA TURU-UURING

Selles peatükis tuuakse välja nutika valguslüliti peamised nõuded, mis lähtuvad soovitud funktsionaalsusest ja kasutusmugavusest. Nendele nõuetele toetudes viidi läbi turu-uuring, mille eesmärk oli hinnata olemasolevate toodete sobivust ning leida põhjendus uue seadme arendamiseks.

2.1. Seadmele esitatavad nõuded

Nutika valguslüliti peamiseks eesmärgiks on pakkuda kasutajale nii automaatset kui ka manuaalset valgustustiheduse reguleerimise võimalust, tagades samal ajal energiasäästlikuse. Automaatse režiimi puhul on vajalik reaalajas mõõta lüliti paigalduskoha valgustihedust ning selle põhjal valgustaset reguleerida nii, et ruumi valgustihedus püsiks optimaalsel tasemel. Kasutajal peab olema võimalus määrata niinimetatud unerežiim ja ärkamisrežiim, mille järgi seade reguleerib valgustaset vastavalt ööpäeva faaside järgi.

Manuaalse juhtimise juures peab lüliti käituma täpselt samamoodi nagu tavaline hämarduslüliti, võimaldades lambi sisse- ja väljalülitamist ning valgustugevuse muutmist pöördnupu abil. Seade peab sobituma elektripaigaldise karbiku mõõtmetesse (65x130 mm), st kõik elektroonilised komponendid peavad pesa sisse mahtuma ning väljast jääma nähtavale vaid minimaalne raamistik, mis näeb välja nagu traditsiooniline valguslüliti. Seade peab olema sobiv kasutamiseks Euroopa standarditele vastavas 230 V vahelduvvooluvõrgus.

Mittefunktsionaalsed ootused puudutavad eelkõige energiakasutust ja töökindlust. Kui valgustust ei muudeta pikema aja jooksul, peab seade minema automaatselt madal energiatarbega ooterežiimi, kuid säilitama seejuures kiire ärkamisvõimaluse. Sellega väheneb juhtseadme voolutarve minimaalsele tasemele. Samuti peab toode vastama kõigile koduste elektripaigaldiste ohutusnõuetele.

2.2. Turu-uuring

Turu-uuringu eesmärk oli välja selgitada olemasolevad nutikad valguslüliti lahendused, mis vastavad vähemalt osaliselt algselt paika pandud seadme nõuetele, ning tuvastada nende peamised kitsaskohad Eesti ja Euroopa elektrisüsteemi kontekstis. Analüüsiks valiti välja neli turul laialdaselt levinud toodet.

Esimesena analüüsiti GE Cync Smart Dimmer Light Switch-i (vt joonis 1.), mis on loodud Ameerika Ühendriikide turule ja töötab 120V/60Hz elektrivõrgus. Seadmel on hämardusfunktsioon ning sisseehitatud liikumis- ja valgusandur, mis võimaldavad automaatselt valgust reguleerida. Lisaks saab seadet juhtida Wi-Fi võrgu kaudu ja see ühildub Amazon Alexa ning Google Home'i süsteemidega [6].

Seade täidab mitmeid nutika valguslüliti funktsionaalseid eesmärke, näiteks võimaldab see valgustugevust reguleerida automaatselt ja käsitsi ning toetab kaugjuhtimist. Samas puudub seadmel võimalus määrata ärkamise või magamamineku aegu, samuti ei saa seadistada erinevaid valgustusrežiime vastavalt kasutaja päevakavale. Probleeme tekib ka seadme füüsilise ja elektrilise sobivusega. GE Cync ei ole mõeldud seadmetoosi paigaldamiseks ning kõige olulisemalt ei toimi see Euroopa 230V/50Hz elektrivõrgus. Selle kasutamine Eestis eeldaks toitepinge muundurit, mis muudaks paigaldamise keerukaks [6].

Kokkuvõttes ei vasta GE Cync Smart Dimmer Light Switch olulistele seadme nõuetele ning ei sobi otse kasutamiseks Euroopa oludes.

Joonis 1. GE Cync Smart Dimmer Light Switch [6]

Teisena uuriti Leviton Decora Smart Motion Sensing Dimmer Switch-i (vt joonis 2.), mis on samuti mõeldud USA turule ja töötab ainult 120V/60Hz elektrivõrgus. Seadmel on sisseehitatud PIR-liikumisandur, mis suudab katta kuni 80 m² suuruse ala. Kasutajale pakutakse erinevaid töörežiime ning võimalust täpselt määrata valgustugevust [7].

Funktsionaalsuse poolest suudab seade täita mitmeid nutika valguslüliti ülesandeid, näiteks valgustugevuse reguleerimist ja automaatset juhtimist liikumise põhjal. Siiski puudub võimalus siduda valgustus inimese päevakava või tsirkadiaanrütmiga, nagu oleks vajalik antud töö eesmärkide täitmiseks. Lisaks seademe sertifikaadid vastavad üksnes USA ja Kanada turustandarditele (UL, CSA, FCC). Euroopa elektrisüsteemiga see seade ei ühildu ning selle kohandamine nõuaks lisaseadmeid, mis muudaks kasutuse ebapraktiliseks [7].

Kokkuvõttes ei sobi Leviton Decora Smart Motion Sensing Dimmer kasutamiseks Euroopa 230 V elektrivõrgus ning ei vasta täielikult seadmele püstitatud nõuetele.

Joonis 2. Decora Smart Motion Sensing Dimmer Switch [7]

Kolmandana vaadeldi TP-Link Kasa Smart Wi-Fi Dimmer Switch-i (vt joonis 3.), mis töötab vaid 120V/60Hz elektrivõrgus ning on suunatud Ameerika Ühendriikide turule. Seade võimaldab juhtida kuni 150 W LED-lampe ja 300 W hõõgniitlampe. Lisaks sisaldab see sisseehitatud liikumis- ja valgusandurit, mis võimaldab automaatset valgustuse juhtimist vastavalt ümbritsevale keskkonnale [8].

Kuigi funktsionaalsuse poolest katab seade mõningaid nõudeid, nagu automaatne juhtimine ja energiatõhus ooterežiim (umbes 1,5 W), puudub tal võimekus töötada vastavalt kasutaja tsirkadiaanrütmile. Suurimaks piiranguks on seadme elektriline sobimatus Euroopa 230 V võrguga. Kohandamine nõuaks lisaseadmeid, mis muudaks kasutuse keerukaks. Seetõttu ei vasta see mudel antud töö eesmärkidele ega sobi kasutamiseks Euroopa turul [8].

Joonis 3. Kasa Smart Wi-Fi Dimmer Switch [8]

Viimasena hinnati TESLA Smart Switch Dimmer Touch lülitit (vt joonis 4.), mis on puutetundlik hämarduslüliti koos Wi-Fi ja häälkäskluste (Google Assistant, Amazon Alexa) toega. Seadet saab juhtida otse puutepaneelilt või kaugjuhtimise teel. Koormustaluvus on kuni 300 W hõõglampide puhul ja kuni 220 W LED- või CFL-lampide korral [9].

Erinevalt kavandatavast lahendusest ei sisalda see seade valgus- ega liikumisandureid, mistõttu ei saa valgust automaatselt kohandada vastavalt ümbritsevale valgustasemele või kasutaja päevasele rütmile. Seade töötab 230V/50Hz vooluvõrgus ning on küll sobiv Euroopa turule, kuid ei täida töö eesmärgina seatud automaatse valgustusjuhtimise nõudeid [9].

Joonis 4. TESLA Smart Switch Dimmer Touch [9]

Turu-uuringust selgus, et kuigi leidub seadmeid, mis funktsionaalsuse poolest vastavad paljudele kavandatava seadme nõuetele, ei sobi enamik neist siiski kasutamiseks Euroopa elektrivõrgus. Käesolevas töös kavandatud nutikas valguslüliti toimiks 230V/50Hz toitega ning eeldab neutraaljuhtme ühendust. Seade sobituks hästi olemasolevatesse elektripaigaldistesse ning tagaks töökindluse automaatse ja manuaalse juhtimise jaoks. Lisaks sisaldab seade pidevat valgustaseme mõõtmist, mille põhjal toimib täpselt reguleeritud automaatne valgustuse juhtimine, sealhulgas unerežiimid ja ärkamisrežiimid, mis eristavad kavandatud lahendust turul olevatest seadmetest. Väljatöötatav lahendus säilitab tavapärase valguslüliti esteetika ning võimaldab juhtida valgustust nii füüsiliselt kui ka veebiliidese kaudu, pakkudes terviklikku ja Euroopa turule kohandatud nutivalgustuse lahendust.

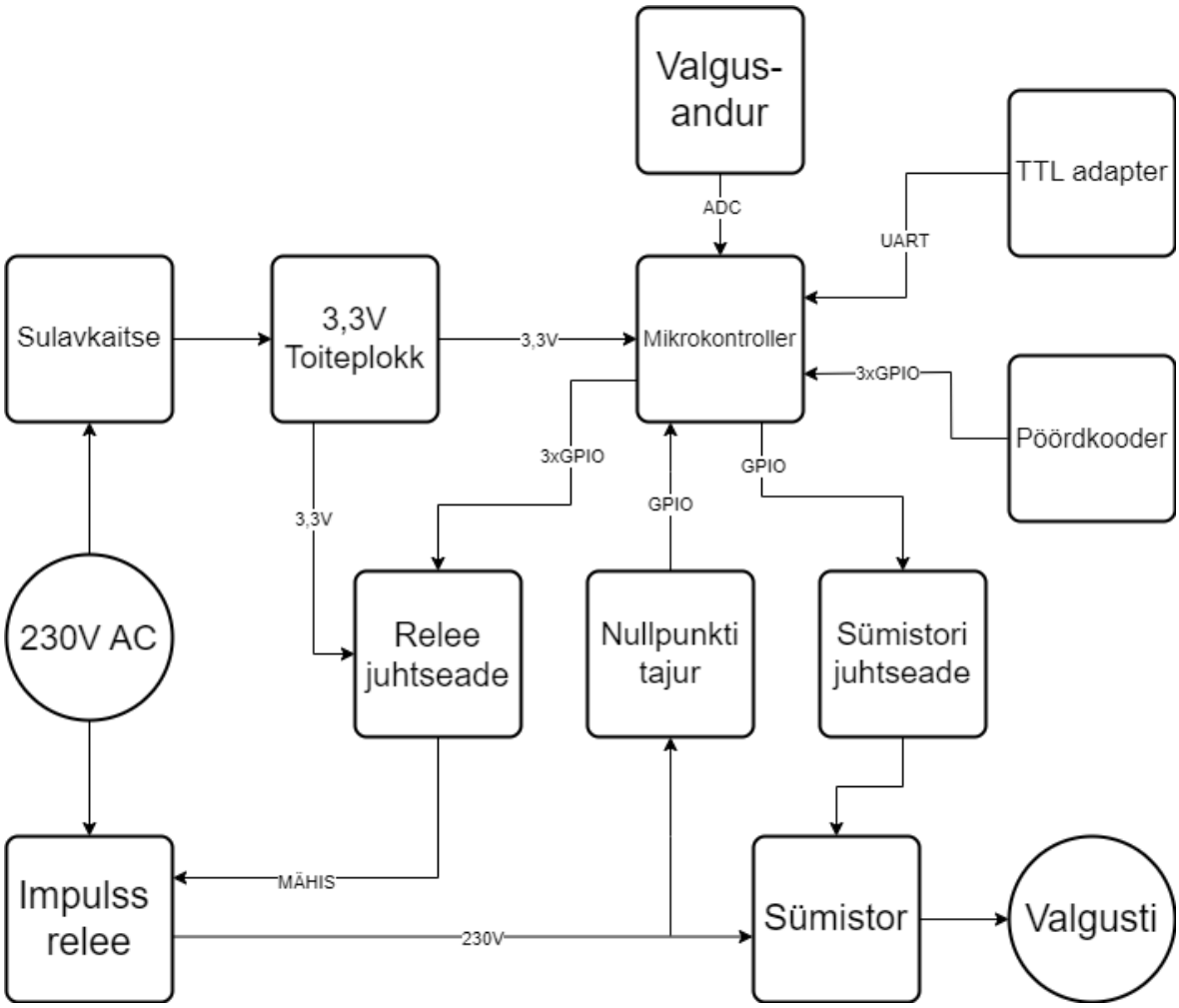
3. RIISTVARA DISAIN

Kolmas peatükk keskendub nutika valguslüliti riistvaralise lahenduse kavandamisele. Kirjeldatakse seadme üldist ülesehitust ning plokkskeemi, mille alusel jaotati süsteem mooduliteks. Igas alapeatükis käsitletakse põhjalikumalt konkreetseid mooduleid, nende tööpõhimõtteid ja valikupõhjendusi, sealhulgas mikrokontrollerit, toiteahelat, andureid ja juhtimiskomponente. Peatüki eesmärk on selgitada, kuidas erinevad riistvarakomponendid koos töötavad, et võimaldada seadme soovitud funktsionaalsus.

3.1. Ülevaade ja plokkskeem

Riistvara kujundamisel lähtuti esmalt ülevaatlikust plokkskeemist (vt joonis 5.), mis illustreerib seadme peamisi funktsionaalseid mooduleid ja nendevahelisi ühendusi. Selline diagramm annab hea ülevaate signaali tüüpidest ja milliseid riistvaralisi ressursse iga osa nõuab. Plokkskeemilt selgus, et mikrokontroller peab toetama vähemalt ühte analoog-digitaalmuundurit (ADC), et mõõta valgusanduri signaali, ning vähemalt kaheksat üldotstarbelist sisend/väljundliidest (GPIO), et suhelda pöördkoodri (*rotary encoder*), valguse juhtseadmete ja muude komponentidega. Mikrokontrolleri valikul lähtuti eelnevalt kirjeldatud nõuetest.

Seadme toiteplokk muundab seinast tuleva 230 V vahelduvvoolu 3,3 V alalisvooluks, mis tagab stabiilse madalpinge nii anduritele kui ka juhtsüsteemidele. Toiteplokis on ka integreeritud lühise- ja ülekoormuskaitse, mis tagavad seadme ohutuse. Impulss relee (vt ptk 3.5.) juhtimiseks kasutatakse impulss-signaali relee oleku vahetamiseks ja fikseerimiseks, võimaldades hoida valguslülitit kas sees või väljas olekus ilma pideva voolutarbimiseta. Sümistor reguleerib voolu vastavalt mikrokontrollerilt saadud käsule, mida ajastatakse nullpunkti tajuri ja juhtseadme abil. Valgusandur mõõdab lülitit ümbritsevat valgusnivood ja pöördkooder tuvastab nuppu pööramist ja vajutust, mille põhjal mikrokontroller otsustab automaatse reguleerimise kriteeriumid.



Joonis 5. Seadme plokkskeem

Järgmistes alapeatükkides selgitatakse iga funktsionaalse mooduli tööpõhimõtteid ja valikukriteeriume, toetudes skeemidele ning konkreetsetele komponentidele. Terve projekti detailne elektriskeem on esitatud Lisas 1.

3.2. Mikrokontroller valik

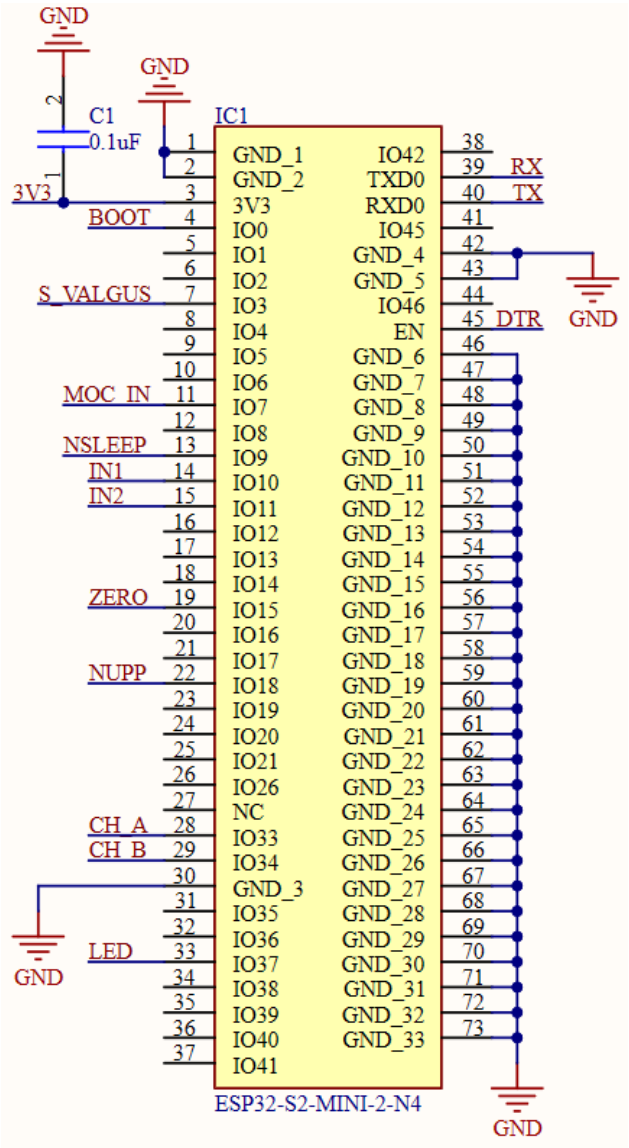
Mikrokontroller (MCU) moodustab valguslüliti keskse juhtplokki, koordineerides anduriandmete lugemist, juhtimisloogika täitmist ning välismoodulite haldamist. Enne mikrokontrolleri valikut on oluline panna paika süsteemi üldine arhitektuur, plokkskeem ja komponentide vaheliste seadmete nõuded, et seejärel teha teadlik ja ratsionaalne otsus sobiva MCU osas [10]. Vale mikrokontrolleri valik võib hilisemas arendusetapis piirata funktsionaalsust, sundides viima läbi kulukaid riistvaramuudatusi.

Süsteemi plokkskeemist selgus, et mikrokontroller peab toetama vähemalt ühte analoog-digitaalmuundurit anduriandmete töötlemiseks ning kaheksat üldist sisend/väljundit (GPIO)

nupu, juhtseadmete ja relee juhtimiseks. Lisaks on vajalik UART suhtlusliides mikrokontrolleri programmeerimiseks.

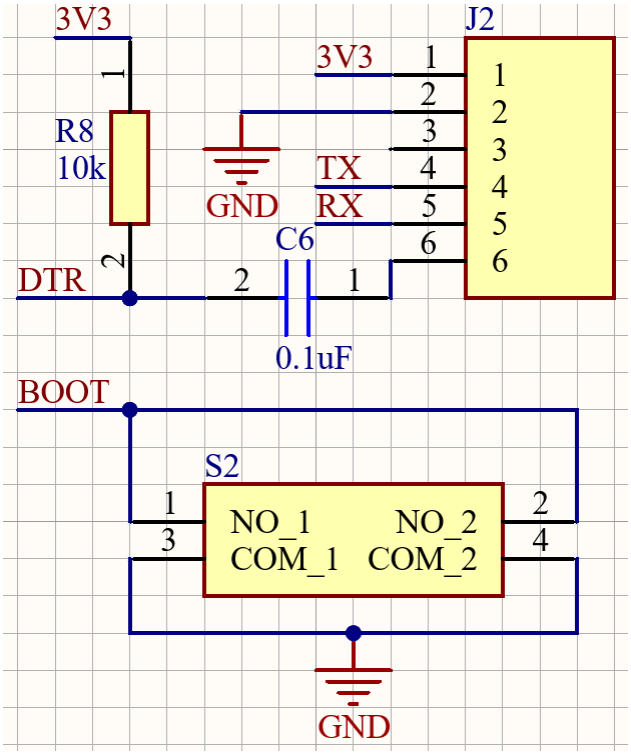
Mikrokontrolleri valikul võrreldi esmalt 8-, 16- ja 32-bitiste arhitektuuride sobivust. 8-bitised kontrollerid on küll soodsad ja lihtsad kasutada, kuid nende piiratud arvutusvõimsus ja mälu muudavad need sobimatuks keerukamateks juhtimistoiminguteks. 16-bitised kontrollerid pakuvad paremat energiatõhusust, kuid jäävad sageli napiks sisend-väljundliideste ja analoog-sisendite osas. 32-bitised mikrokontrollerid, eriti Xtensa arhitektuuriga variandid, on seevastu piisavalt võimekad, et hallata mitmeid sisendeid ja väljundeid ning töödelda andmeid reaalajas [11].

Täpsemalt võrreldi kolme ESP mikrokontrollerit: ESP8266, ESP32-C3 ja ESP32-S2. ESP8266 jäeti valikust välja, kuna sellel oli ainult üks ADC-kanal ja väike arv GPIO-pesi, mis piiras tulevikus võimalike funktsioonide lisamist. ESP32-C3 oli tehniliselt sobiv, kuid selle Bluetoothi tugi polnud antud projekti jaoks vajalik ning oleks tähendanud kõrgemat energiatarvet. ESP32-S2 osutus parimaks variandiks kuna see pakub piisavalt ADC-kanaleid, rohkelt GPIO ühendusi ning töötab 240 MHz taktsagedusel, mis tagab piisava võimekuse kogu süsteemi juhtimiseks [12]. ESP32-S2 elektriskeem on esitatud joonisel 6.



Joonis 6. ESP32-S2 elektriskeem

Mikrokontrolleri programmeerimisliideseks oli CP2102 USB-TTL adapter, mis ühendab ESP32-S2 arvutiga läbi UART protokolli. Programmeerimise võimaldamiseks lisati plaadile ka BOOT-nupp (vt joonis 7.), mis ühendab mikrokontrolleri IO0 viigu otse maaga ning võimaldab käsitsi mikrokontrollerit käivitada allalaadimisrežiimis. RESET-nuppu plaadil ei ole, kuid taaskäivitamine oli võimalik kui toide hetkeks eemaldada. [13]



Joonis 7. TTL adapteri liides ja BOOT nupp

Kokkuvõttes osutus ESP32-S2 tehniliste omaduste, kättesaadavuse ja arendusvahendite toe poolest sobivaimaks lahenduseks. Selle paindlikkus ja võimekus on piisavad nii automaatrežiimi juhtloogika täitmiseks kui ka kasutajaliideste haldamiseks, pakkudes samas võimalust süsteemi edasi arendada tulevikus keerukamate funktsioonidega.

3.3. Toiteahel

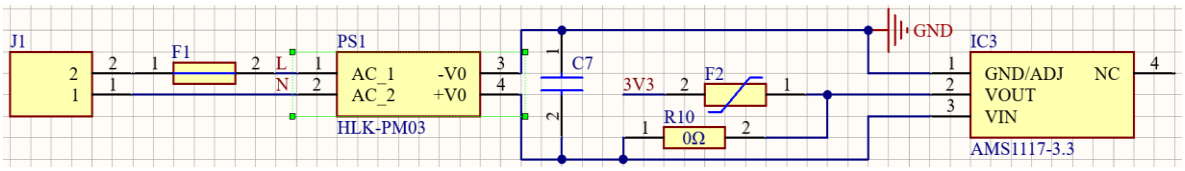
Nutikas valguslüliti peab töötama katkematult ning tagama usaldusväärse ja stabiilse madalpingetoite kõikidele juhtmoodulitele. Seadme toiteahelal on seetõttu oluline roll kogu süsteemi töökindluse ja ohutuse tagamisel. Kuna seade ühendatakse otse majapidamises kasutatava 230 V vahelduvvoolu võrguga, tuli esmalt kavandada ahel (vt joonis 8.), mis muundab vooluvõrgu pinge sisendi stabiilseks madalpinge alalisvooluks. Selle eesmärgi täitmiseks kasutati HLK-PM03 seeria toitemoodulit, mis muundab 230 V vahelduvvoolu 3,3 V alalisvooluks. Mooduli väljundvõimsus on kuni 3 W, mis on piisav kogu süsteemi tööks, arvestades mikrokontrolleri, andurite ja juhtloogika tagasihoidlikku energiavajadust [14].

HLK-PM03 komponendi valikul arvestati mitme teguriga: selle kompaktsus võimaldab moodulit paigutada otse seadmetoosi, komponent on varustatud lühise- ja

ülekoormuskaitsega ning sobib hästi ka väikese energiatarbega rakendustesse. Samuti on see komponent turul laialdaselt kättesaadav ja soodne, mis oli oluline ka projekti hinna mõistes. Toiteahelasse jõuab sisendpinge kruviklemmidega pesa kaudu (Phoenix Contact MKDSF 3/2-5,08). Sellele järgneb primaarne kaitsekomponent, SCHURTER MST 250 seeria 1 A sulavkaitse, mille ülesanne on kaitsta nii toiteplokki kui ka ülejäänud madalpinge süsteemi ülekoormuse ja lühise eest [15].

Toiteplokki väljundisse lisati 100 µF elektrolüütiline kondensaator, mis aitab vähendada pinge pulsatsioone ning summutad müra. Täiendava kaitsekihina on väljundile lisatud Littelfuse'i madala takistusega pindpaigaldatav 500 mA ise taastuv kaitse, mis reageerib soojuse kaudu liigtarbimisele ja lülitub automaatselt tagasi, kui olukord stabiliseerub [16]. Selline kombinatsioon võimaldab saavutada usaldusväärse kaitsetaseme ilma, et peaks kaitsmeid välja vahetama. Trükkplaadile on ka lisatud toiteindikaator LED, mille eesmärk on anda visuaalne tagasiside süsteemi toiteoleku kohta. Selleks kasutatakse standardset punast LEDi, mis on ühendatud läbi 270 oomi takisti ühe ESP32 sisend/väljundklemmiga. Indikaator aitab hõlpsasti tuvastada, kas seade saab korrektselt toidet, mis on kasulik nii arendus- kui ka paigaldusfaasis. Trükkplaadile kavandati ka võimalus AMS1117-3.3 lineaarregulaatori lisamiseks, et vajadusel kasutada 5 V toiteplokki ja reguleerida seejärel pinge alla 3,3 V tasemele. Reaalses prototüübis seda lahendust ei rakendatud, kuna valitud HLK-PM03 moodul andis soovitud pingetaseme otse ning AMS1117 ei olnud kavandatud vastavalt tootja soovitustele [17]. Toiteploki väljundi ja süsteemi 3,3 V siinide vahele lisati 0 oomi takisti, mis võimaldas voolul liikuda AMS1117 regulaatorist mööda, luues selle kõrvale alternatiivse ühendustee.

Projekti varajases faasis võrreldi HLK-PM03 toiteplokki mitmete teiste sarnaste moodulitega, sealhulgas Traco Power TMPS 03-103, Recom RAC03-3.3SK, Mornsun LS05-13B03R3 ja Mean Well IRM-03-3.3. Lõplik valik HLK mooduli kasuks tulenes selle hea hinna ja kvaliteedi suhte, sobiva suuruse ning asjaolust, et sama seeria 5 V versiooni oli juhendaja varasemalt kasutanud sarnastes rakendustes, mis lisas komponendile usaldusväärsust.



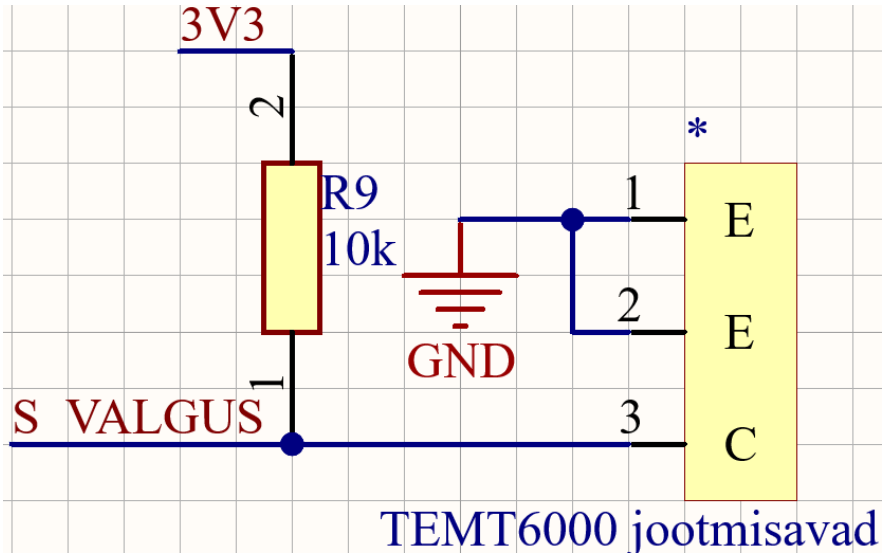
Joonis 8. Toiteahela elektriskeem

Kokkuvõttes on seadme toiteahel kavandatud kompaktsena, töökindlana ja ohutuna, võimaldades süsteemil toimida stabiilselt kõikides režiimides. Kasutatud komponendid on valitud lähtudes praktilistest arenduskogemustest ja mõõdukatest kuludest, samas järgides majapidamises kasutatavate elektroonikaseadmete ohutusstandardeid ja põhimõtteid.

3.4. Valgusandur ja pöördkooder

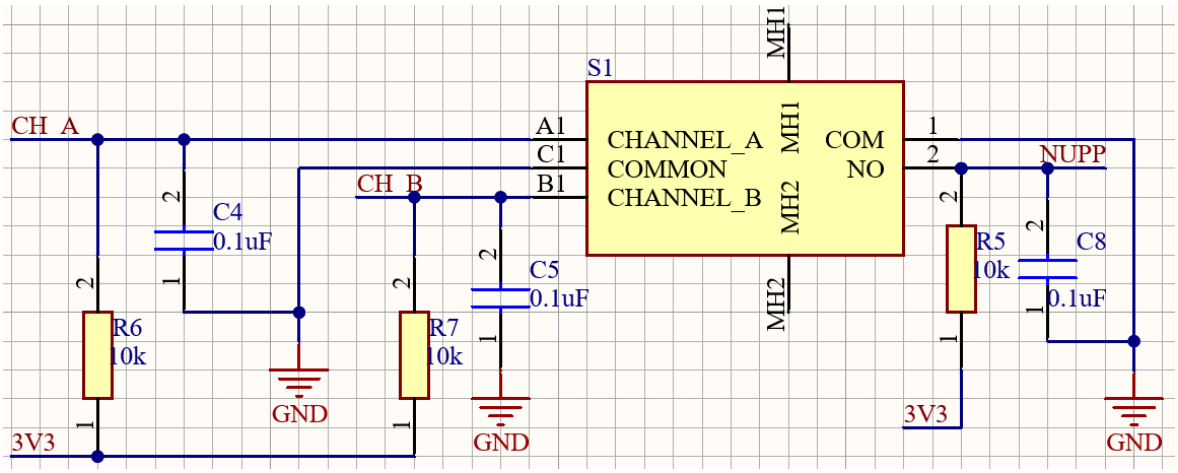
Nutikas valguslüliti kasutab kahte olulist sisendseadet: valgusandurit, mis võimaldab automaatselt hinnata ruumi valgustaset, ning pöördkooder, mille abil kasutaja saab käsitsi juhtida valgustugevust või lülitada valgusallikat sisse ja välja. Need sisendid tagavad, et süsteem suudaks töötada nii automaat- kui manuaalrežiimis, võimaldades kasutajale mugavat ja intuitiivset juhtimist.

Valgusandurina kasutati TEMT6000 fototransistoril põhinevat andurit, mis on tundlik nähtavale valgusele ning mille maksimaalne spektraalne tundlikkus jääb ligikaudu 570 nm juurde. See spektri piirkond langeb hästi kokku inimsilma tundlikkusega, mistõttu sobib see andur hästi sisetingimustes kasutamiseks [18]. Fototransistori kollektori viik on ühendatud mikrokontrolleri analoogsisendi ja 10 kΩ takisti kaudu 3,3 V toiteallikaga (vt joonis 9.). Kui andur tajub valgust, suureneb tema juhtivus ja läbi kollektoritakisti voolab rohkem voolu, mille tulemusel suureneb pingelang takisti peal. Mikrokontroller mõõdab pingelangu ADC kanali kaudu, mille põhjal arvutatakse valgusintensiivsus. Andur ühendatakse trükkplaadile kolme jootmisava kaudu, võimaldades selle paigutada karbi esipaneelile, kus valgusolud kajastuvad täpsemalt. Valgusanduri näitu mõõdab mikrokontroller pidevalt kindla ajaintervalli tagant. Andurilt saadud andmeid tuleb tõlgendada ümber valgustiheduseks luksides, selleks tuleb läbi viia TEMT6000 kalibreerimine. Võrreldes anduri pingeväljundit luksmeetri näitudega erinevates valgustingimustes, võimaldab luua vastavustabeli või funktsiooni, mille abil teisendatakse mõõdetud pingetase usaldusväärseks valgustihedusväärtuseks. Käesoleva töö raames kalibreerimist veel ei teostatud, kuid see on planeeritud edasises arendusetapis.



Joonis 9. Valgusanduri elektriskeem

Käsitsi juhtimiseks kasutatav pöördkooder on Bourns PEC12R-3220F-S0024, mis toimib kahekanalilise kodeeringuga. Seade suudab eristada päripäeva ja vastupäeva pööramist ja võimaldab seeläbi sujuvat valgustugevuse reguleerimist. Lisaks pööramiskanalitele sisaldab moodul ka vajutatavat nuppu, mida kasutatakse valguslüliti sisse- ja väljalülitamiseks [19]. Riistvaraliselt on pöördkooder ühendatud kolmele ESP32 GPIO sisendile: kaks kanalit (A ja B) ning nupu kontakt. Mõlemale kanalile on lisatud 10 kΩ ülestõmbetakisti (*pull-up resistor)* ning 0,1 µF kondensaatorid müra vähendamiseks (vt joonis 10.). Sama konfiguratsioon on rakendatud ka nupule. Pöördkooderi A- ja B-kanalite lugemiseks kasutatakse ESP32 katkestussüsteemi (*interrupt*), kus mõlema kanali loogilise taseme muutus kutsub esile katkestusekäsitleja käivitumise. Katkestusekäsitlejas loetakse mõlema kanali hetkeseis ning määratakse nende muutuse suund, mille põhjal tehakse kindlaks pööramissuund. Selline lahendus tagab madala viiteaja ning kõrge täpsuse ka kiire pööramise korral. Kuna pöördkooderi nupuvajutus ei ole mehhaaniliselt täiesti puhas signaaliallikas, on tarkvaras lisatud lihtne *debounce*-mehhanism, mis ignoreerib sama kanali järgmisi katkestusi teatud aja jooksul (näiteks 10 ms). See aitab vältida valeimpulsse, mis võivad tekkida kontakti võbeluse tagajärjel. Katkestuspõhine lahendus võimaldab süsteemil jääda energiasäästlikuks ja keskenduda teistele protsessidele, tekitamata tarbetut protsessori koormust pideva signaali kontrollimise kaudu [20].



Joonis 10. Pöördkoodri elektriskeem

Valitud lahendus, mis kasutab valgusanduri analoogmõõtmist ja pöördkooderi katkestuspõhist lugemist, pakub hea tasakaalu lihtsa riistvaralise ülesehituse, täpse mõõtmise ja süsteemi töökindluse vahel. TEMT6000 anduri sobivus nähtava valguse mõõtmiseks ning pöördkooderi võime tuvastada nii pööramissuunda kui ka nuppu vajutust võimaldavad koos luua paindliku ja kasutajasõbraliku sisendliidese, mis toetab seadme intuitiivset juhtimist.

3.5. Impulss relee ja selle juhtseade

Nutika valguslüliti funktsionaalsuse üheks kesksekks osaks on valgusti sisse- ja väljalülitamine. Selle ülesande täitmiseks on süsteemi integreeritud elektromagnetiline relee, mis juhib otse valgusti vooluringi. Kuna seade peab olema energiatõhus ja töökindel ka pidevas ooterežiimis, valiti tavapärase mitte-lukustuva relee asemel impulss relee (*latching relay*). Erinevalt tavalistest releedest ei vaja impulss relee kontakti hoidmiseks pidevat voolu tarbimist. Selle asemel säilitab relee oma oleku mehaanilise või magnetilise lukustusmehhanismi abil ka pärast juhtimpulssi, võimaldades vältida pidevat energiatarvet.

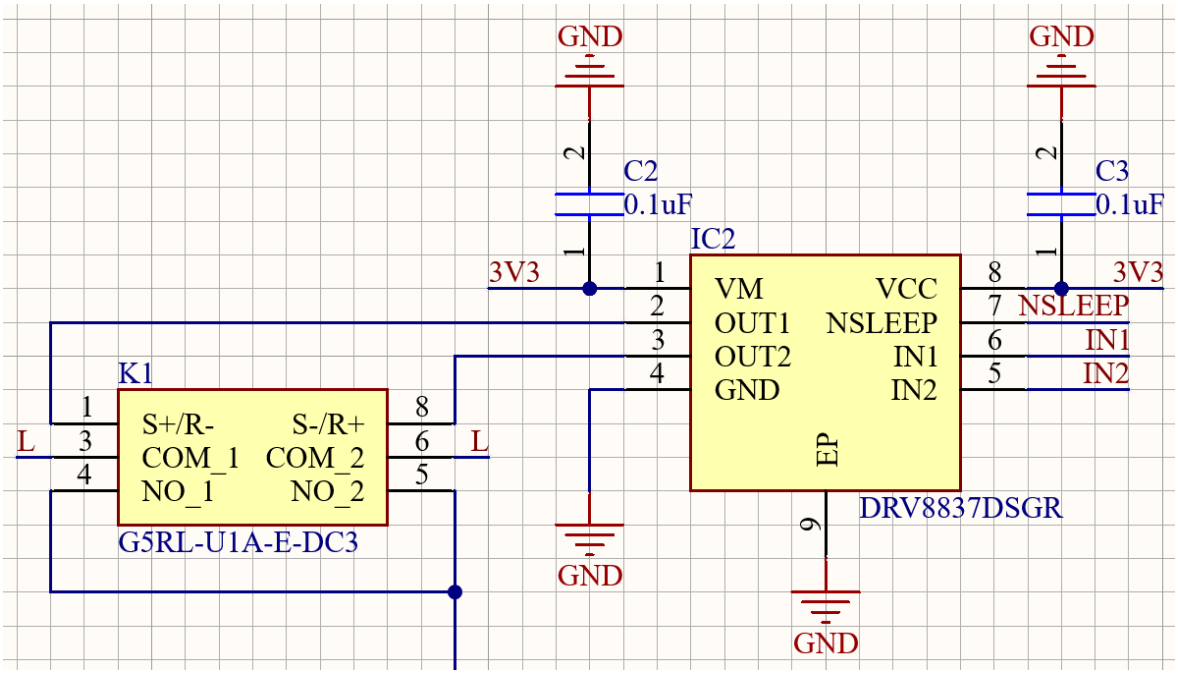
Impulss releed jagunevad omakorda kaheks: ühe mähisega ja kahe mähisega. Käesolevas projektis kasutati ühe mähisega varianti, kuna see vajab vähem juhtsignaale ja vähendab trükkplaadil komponentide arvu.

Valitud releeks sai Omron G5RL-U1A-E-DC3, mis on ühepooluseline, ühe mähisega impulss relee. See töötab 3,3 V juhtpingega, mis ühildub ESP32 mikrokontrolleri loogikatasemega. Relee kontakt on mõeldud kõrge voolutaluvusega rakendusteks,

võimaldades lülitada koormusi kuni 16 A [21]. Kuna relee muudab oma olekut ainult lühiajalise vooluimpulsi mõjul, peab juhtloogika võimaldama mähises voolu suuna vahetamist vastavalt soovitud lülitusolekule.

Juhtimpulsi polaarsuse vahetamiseks kasutati DRV8837DSGR juhtseadet, mis on H-silla arhitektuuriga madalpinge juhtseade. H-sild koosneb neljast transistorist, mis võimaldavad määrata voolu suuna mähises ning on vaja ühe mähisega impulss relee juhtimiseks. DRV8837 töötab kahesüsteemse toitega: loogikapingega (VCC) 3,3 V ja eraldi toitepingega (VM) samal tasemel. Selle sisendid IN1 ja IN2 ühendatakse ESP32 GPIO väljunditega, mille abil määratakse, millises suunas releemähises vool liigub. Kui ühte sisendit hoitakse kõrgel ja teist madalal, lülitub relee vastavasse olekusse. Juhtimpulsi kestus valitakse selliselt, et relee jõuaks ümber lülituda, kuid jääb piisavalt lühikeseks, et vältida mähise ülekoormust. DRV8837 sisaldab ka „nSLEEP“ sisendit, mille kaudu saab juhtseadme viia madala energiatarbimisega unerežiimi. Selle funktsiooni abil on võimalik hoida vooluahel energiat säästvas olekus ja äratada see ainult relee ümberlülituse ajaks [22].

Skeemil on releemähise klemmid ühendatud otse DRV8837 OUT1 ja OUT2 väljunditega, võimaldades voolu suunda juhtida vastavalt sisendsignaalidele (vt joonis 11.). Toite viikudele on lisatud 0,1 μF kondensaatorid pingestabiilsuse parandamiseks. Kuna relee juhtseadme sisetakistus on madal ja maksimaalne väljundvool kuni 1,8 A, suudab see edukalt käivitada lühikeseks ajaks ka releemähise, mille lülitusvool võib hetkeks olla tavalisest suurem. Tänu sisseehitatud kaitsemehhanismidele, nagu ülekuumenemise ja lühise tuvastamine, sobib DRV8837 hästi relee ohutuks ja töökindlaks juhtimiseks [22].



Joonis 11. Relee ja selle juhtseamde elektriskeem

Kokkuvõttes on impulss relee ja H-silla juhtseadme kombinatsioon hea lahendus energiatõhusa nutika valguslüliti jaoks. See võimaldab tagada väikese energiatarbe, kõrge kontaktvoolu taluvuse ning töökindla juhtimismehhanismi, mis on sobiv ka pikemaajaliseks kodukasutuseks. Lahendus on modulaarne, skaleeritav ja sobib hästi ka teistesse madalpinge lülitusrakendustesse, kus on oluline vähene voolutarve ja süsteemi pikk kasutusiga.

3.6. Sümistori juhtimine ja selle komponendid

3.6.1. BT136 ja selle tööpõhimõte

Valgustugevuse reguleerimine ehk hämardamine toimub seadmes sümistori abil, mis juhib vahelduvvoolu faasilõike meetodil. Sümistor on kolme terminaliga komponent, mille kaks peamist terminali võimaldavad voolu läbimist mõlemas suunas ning juhtterminal aktiveerib väikese tüürvoolu impulsi mõjul (vt joonis 12.). Tegemist on kahe vastassuunas ühendatud türistori kombinatsiooniga, mis jagab ühist juhtkontakti [23]. Erinevalt releest või lülitustransistorist suudab sümistor lülitada voolu kindlal ajahetkel igas vahelduvvoolutsükli poolperioodis, võimaldades osalist juhtimist ning seeläbi efektiivset valgustugevuse reguleerimist. Sümistori juhtimiseks on vaja anda juhtterminalile lühike tüürimpulss, mis toimub nullpunkti tuvastuse järgi määratud viivitusega [24].

Süsteemis kasutatakse komponenti BT136S-800E, mis suudab pidevalt juhtida kuni 4 A voolu ning talub hetkeliselt kuni 27 A tippvoolu [25]. Lisaks tuleb arvestada, et kuigi BT136 suudab juhtida pidevalt kuni 4 A voolu, ei tähenda see, et kogu sümistori maksimaalset koormust saaks täiel määral ära kasutada LED-valgustite puhul. Hämardamise puhul tuleb järgida 10% reeglit, mille kohaselt saab LED-koormusi juhtida maksimaalselt 10% ulatuses sümistori nimivõimsusest. Selle põhjuseks on LED-i toiteploki madal voolutarve ja võimalikud ühilduvusprobleemid, mis võivad põhjustada vilkumist või mittetäielikku sisselülitumist [24]. Arvestades, et BT136 talub pidevalt 4 A voolu ja süsteemi nimipingeks on 230 V, oleks teoreetiline maksimaalne juhtitav koormusvõimsus:

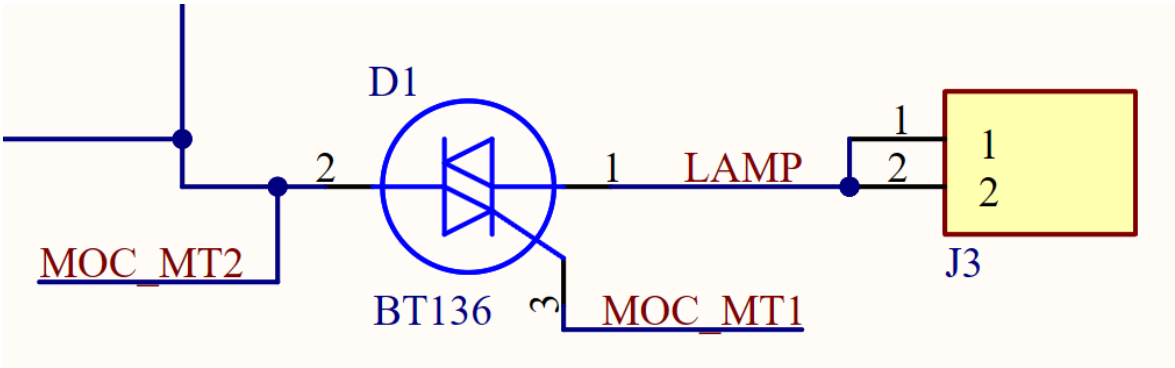
$$P_{max} = U \cdot I = 230 \cdot 4 = 920\ W,$$

LED-koormuste puhul aga kehtib 10% reegel, mis tähendab:

$$P_{LED_{max}} = 0{,}1 \cdot 920 = 92\ W,$$

Seega on antud seadme kaudu ohutu juhtida kuni 92 W ulatuses LED-valgustust, et tagada usaldusväärne töö kõigis hämardusastmetes. Sellist piirangut on oluline arvestada eriti juhul, kui valgustusseadmeid kasutatakse paralleelselt või süsteemi laiendatakse.

BT136 on paigutatud peale releed, mis lülitab üldseadme toitevoolu sisse ja välja. Kui relee on suletud, hakkab sümistor reguleerima voolutugevust valgustile. Selline lahendus võimaldab sümistori vooluringist välja jätta, kui valgus on välja lülitatud, mis aitab vähendada lekkevoolu ooterežiimis. BT136 tekitab voolu reguleerimise käigus soojust, mistõttu on oluline selle termiline ühendus trükkplaadiga. Komponendil on selleks metallist jahutuspind, mis on mõeldud otse trükkplaadi vaskkihiga ühendamiseks. Selline paigutus võimaldab hajutada tekkiva soojuse läbi plaadi metallkihi, vältides vajadust eraldiseisva jahutusradiaatori järele. Komponenti valides on arvestatud selle termilise vastupidavusega ning trükkplaadi vaskpinna suurusega, mis võimaldab hajutada mõõdukat soojuskoormust.



Joonis 12. BT136 elektriskeem

Kuigi prototüübis ei ole veel testitud BT136 tegelikku töötemperatuuri, saab komponentide termilist koormust hiljem hinnata vastavalt lülitussagedusele, voolukoormusele ja trükkplaadi disainile. Samuti on hilisemas testimisetapis oluline välja selgitada, kas on vajalik täiendav jahutus või piirang maksimaalse koormuse kestvusele. Käesolevas lahenduses on BT136 valiku eelisteks tema kompaktne vorm ja sobivus juhtimiseks optroni abil.

3.6.2. TRIACi juhtimine MOC3022-ga

Sümistori tüürimiseks kasutatakse süsteemis MOC3022 optroni, mis optiliselt eraldab sümistori kõrgpinge poole mikrokontrolleri madalpinge poolest. MOC3022 töötab kaheosalisena: sisendsignaali saabudes lülitub sisse komponendi sees olev infrapuna LED, mis aktiveerib väljundis paikneva valgusega tüüritava türistori. See võimaldab voolu läbimist kahe väljundklemmi, MT1 ja MT2, vahel. Kuna BT136 vajab juhtimiseks väikest tüürvoolu, ühendatakse MOC3022 väljund klemmid nii, et MT1 suunatakse BT136 tüürelektroodile ning MT2 ühendub sümistori ja relee vahelise liiniga. Kui ESP32 määrab vastava GPIO väljundi kõrgele loogikatasemele, aktiveerub LED ja tüürvool käivitab BT136 sümistori, võimaldades voolu läbimist [26].

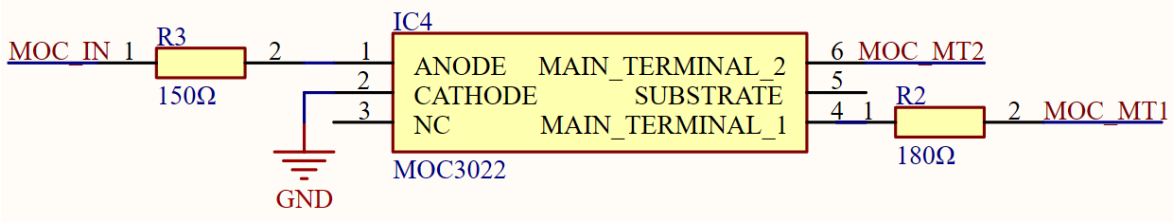
Komponendi sisendvool määratakse 150 Ω takisti kaudu. Arvestades ESP32-S2 tööpinget 3,3 V ja infrapuna LEDi tüüpilist pinge langust 1,15 V, on vool järgmine:

$$I = \frac{3{,}3-1{,}15}{150} \approx 14{,}3\ mA,$$

Arvutatud vool ületab MOC3022 minimaalset tüürvoolu (10 mA), tagades töökindla aktiveerumise igas tsüklis. Väljundklemmide vahel on lisatud 180 Ω takisti (vt joonis 13.),

mis piirab tüürvoolu BT136 tüürelektroodile, et vältida liigset impulssvoolu ja parandada juhtimisstabiilsust [26].

Juhtimissignaal MOC3022 optronile edastatakse otse ESP32 GPIO väljundilt, mistõttu on impulsi kestust võimalik täielikult määrata tarkvaraliselt. Kuigi esialgses prototüübis ei ole veel impulsi pikkust mõõdetud või optimeeritud, on võimalik juhtseadet lülitada igas tsüklis näiteks 100–200 µs vältel, mis on piisav, et BT136 sümistor jõuaks lülituda ja edasi jääda hoidevoolu abil juhtima. Täpsem ajastuse ja impulsi pikkuse määrmamine jääb tarkvaralise testimise etappi.



Joonis 13. MOC3022 elektriskeem

Kokkuvõttes on MOC3022 sobiv, töökindel ja elektriliselt ohutu lahendus sümistori juhtimiseks. Selle optiline eraldus, kiire reageerimine ja lihtne juhtimine teevad sellest hea valiku hämarduspõhise valguslüliti arenduses.

3.6.3. Nullpunkti tuvastamine H11AA1 abil

Sümistori juhtimine vajab täpset infot selle kohta, millal vahelduvvool jõuab nullpunkti, see on hetk, millal vool muudab suunda ja väärtus läbib nulli. Selleks kasutatakse seadmes H11AA1 optroni, mis võimaldab mikrokontrolleril tuvastada igat pinge nullpunkti. Täpne nullpunkti määramine on oluline, et mikrokontroller saaks õigel hetkel sümistori tüürida ja seeläbi reguleerida valgustugevust sujuvalt ja vilkumiseta [27].

H11AA1 sisaldab kahte vastassuunas ühendatud infrapuna-LEDi ja fototransistorit. Kuna tegemist on vahelduvvooluga, hakkavad LEDid vaheldumisi põlema. Üks töötab voolu positiivsel ja teine negatiivsel poolperioodil. Igal ajahetkel, millal vahelduvvoolu pinge on piisavalt kõrge, põleb vähemalt üks LED ja valgustab fototransistorit, mis juhib selle peale voolu [27].

Kui vahelduvpinge läbib nullpunkti, siis kumbki LED ei saa enam põlemiseks vajalikku pinget. Selle tulemusel lülituvad LEDid välja ja fototransistor ei juhi enam voolu, mistõttu tema kollektor ühendub läbi ülestõmbetakisti 3,3 V-ga ehk tõmmatakse kõrgele (vt joonis 14.). Mikrokontroller suudab seda lühikest impulssi tuvastada ja kasutada seda ajastusena, mille põhjal määratakse sümistori juhtimise viivitus. LED-idele antakse vool otse 230 V vahelduvvoolu siinilt, kasutades 68 kΩ voolupiiravat takistit, LEDi läbivat voolu saab arvutada järgnevalt:

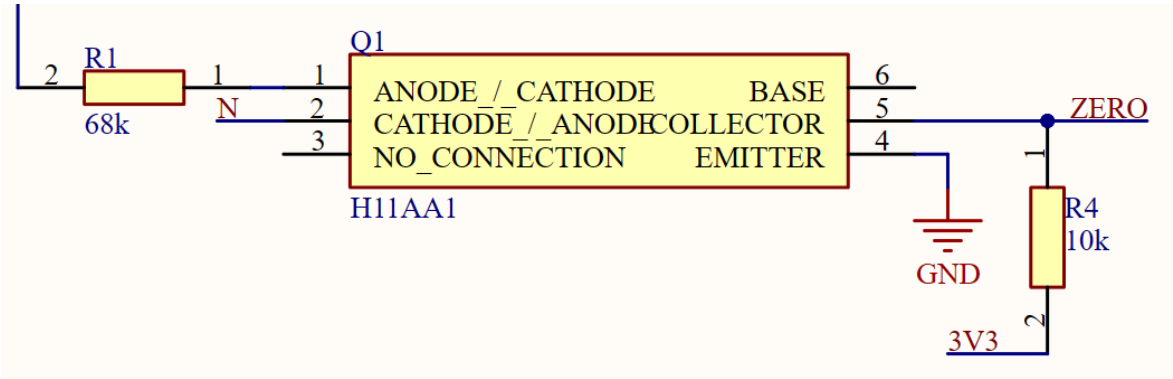
$$I_{LED} = \frac{U_S - U_{LED}}{R} = \frac{230-1,2}{68000} \approx 3,4\ mA$$

kus U_s on vooluvõrgu pinge, V;
U_{LED} on pingelang LEDi peal, V;
R on voolupiirava takisti takistus, Ω

See jääb alla H11AA1 maksimaalse lubatud voolu, kuid on piisav LED-ide tööks, kuna tüüpiline tööpiirkond algab juba madalamal tasemel. Kui transistor lülitub välja (nullpunkti hetkel), liigub signaal madalalt kõrgele, moodustades selge ja täpselt ajastatud loogikasignaali [27].

Seda signaali saab mikrokontrolleris töödelda katkestusena või lugeda regulaarselt programmi tsüklis. Kuna 50Hz sageduse korral tekib 100 nullpunkti sekundis, peab süsteem suutma töötada suhteliselt kiire reageerimisvõimega. Nullpunkti impulsi pikkus sõltub fototransistori lülituskiirusest, antud komponendi puhul jääb see alla 10 mikrosekundi. Seda tuntakse ka kui sisselülitus- ja väljalülitus ajaks, mis kirjeldab aega, mille jooksul transistor hakkab juhtima ja lõpetab juhtimise pärast valgusimpulssi [27].

Lisaks täpsusele on oluline ka elektriline ohutus, mille tagab H11AA1 sisemine optiline eraldus. Komponent talub kuni 5000 V vahelduvpinget sisendi ja väljundi vahel, mis võimaldab madalpinge loogikat ohutult kasutada 230 V vahelduvvoolu kõrval [27].



Joonis 14. H11AA1 elektriskeem

Nullpunkti tuvastamine H11AA1 abil on töökindel, passiivne ja odav lahendus, mis sobib hästi valgustuse juhtimiseks nutika valguslüliti süsteemis. Komponent töötab ilma keerulise täiendava signaalitöötluseta ja võimaldab täpselt ajastatud päästikuid, mis on vajalikud sujuvaks faasilõike juhtimiseks.

4. TRÜKKPLAAT

4.1. Skeemi loomine

Skeemi koostamiseks kasutati professionaalset tarkvara „Altium Designer“. Tegemist on elektroonika tööstuses tunnustatud tööriistaga, millele oli ligipääs läbi ülikoolis tegutseva tudengiorganisatsiooni Solaride. Tarkvara võimaldab koondada skeemi loomise, paigutuse ja 3D visualiseerimise ühtsesse keskkonda.

Skeemi loomiseks tuli algselt lisada projektifaili kõik vajalikud komponendid kasutades „Altium Library Loader“ liidest, mis võimaldas tuua automaatselt sisse iga komponendi skeemisümboli, jalajälje (*footprint*) ja 3D-mudeli. Selline lähenemine säästis märkimisväärselt aega võrreldes käsitsi sümbolite joonestamise ja komponendi viikude asetuse määramisega andmelehtede põhjal. Kõigi komponentide andmed laeti automaatselt, v.a TEMT6000, mille jootmisavade puhul tuli skeemisümbol ja jalajälg luua käsitsi. Vastava 3D-mudeli genereeris Altium automaatselt olemasolevate mõõtmete alusel.

Kui kõik komponendid olid skeemile lisatud, viidi läbi tähistamine funktsiooniga *Annotate Schematic*, mis määras igale komponendile tähise (näiteks R-tähis takistile, C kondensaatorile) ning unikaalse järjekorranumbri. See võimaldas igal komponendil olla eraldi tuvastatav nii skeemis kui ka hilisemas trükkplaadi kujunduses.

Skeemi selguse ja loetavuse tagamiseks järgiti mitmeid disainimis põhimõtteid. Ühendused paigutati skeemil vasakult paremale, mis peegeldab signaali või toite suunda. Komponendid grupeeriti vastavalt nende funktsioonile, näiteks eraldi piirkonnad toiteplokile, mikrokontrollerile ja lülituskomponentidele. Iga rühma ümber tõmmati ristkülik, mis tähistati mooduli nimega. Vooluvõrgu pinge ja madalama pingega alad paigutati skeemil visuaalselt eraldi, et oleks lihtsam orienteeruda ning vältida segadust ohutuse seisukohalt oluliste ühenduste puhul.

Tähelepanu pöörati ka maandus tingmärgi korrektsele asetusele. Kõik maandus tingmärgid suunati allapoole, mis vastab levinud heale tavale. Samuti paigutati ülestõmbetakistid suuanaga üles ning komponentide juurde lisati nende väärtused, mis lihtsustab hilisemat kontrolli.

Skeemi lihtsustamiseks ja signaalide tähistamiseks kasutati signaali nimetamist (*Net Label*), mis lisati ühenduste otstesse. Kui kaks ühendust kannavad skeemis sama signaalinime, loetakse nad tarkvara poolt elektriliselt ühendatuks isegi siis, kui nende vaheline joon puudub. See võimaldas vältida pikki jooni skeemil ja parandas märgatavalt visuaalset puhtust. Kõik ühendused kanti samale skeemilehele, hierarhilist jaotust ei kasutatud, kuna kogu skeem mahtus loogiliselt ühele lehele.

Koostatud skeem sisaldab kõiki vajalikke komponente, loogiliselt struktureeritud ühendusi ja signaalinimesid, mis võimaldavad sujuvat üleminekut trükkplaadi disaini etappi. Järgmises alapeatükis käsitletakse, kuidas see skeem viidi edasi füüsiliseks kujunduseks trükkplaadi tasandil.

4.2. Trükkplaadi disain

Pärast elektriskeemi koostamist alustati trükkplaadi füüsilise disainiga Altium Designer keskkonnas. Trükkplaadi kuju joonistati käsitsi tarkvara mehhaanilisel kihil, lähtudes algselt 60x60 mm mõõdust, et see sobituks nõuetes mainitud elektripaigaldus karbiku sisse. Arendustöö käigus selgus, et kõik vajalikud komponendid ei mahu selle pindala sisse ning elektrilise ohutuse tagamiseks oli vaja jätta rohkem ruumi vooluvõrgu- ja madalpinge piirkondade vahele. Seetõttu suurendati plaadi mõõtmeid 80x80 mm-ni, mis võimaldas komponente paigutada loogilisemalt ja tagada piisavad komponentide vahed. Trükkplaadi igasse nurka lisati 3,4 mm diameetriga kinnitusavad (vt joonis 15.), võimaldades kinnitada plaati kasutades M3 polte. ESP32-S2 mikrokontrolleri tootja soovituste põhjal lõigati plaadi serva sisse ala, et mikrokontrolleri sisseehitatud antenni ümber jääks 15 mm tühja ala. Selline lahendus vastab tootja nõuetele antenni töökindluse tagamiseks [28].

Komponentide paigutus algas vooluvõrgu kaabli toitepesast, millele järgnesid järjestikku kõik sellega ühenduvad seadmed. See lähenemine lihtsustas ühenduste planeerimist ja võimaldas hoida signaaliteed lühikestena. Plaat jaotati mõtteliselt diagonaalselt kaheks, vooluvõrgu pinge komponendid paigutati ühele poole ning madalapinge osad, sealhulgas mikrokontroller ja andurid, teisele poole.

Ohutu radade vahede määramiseks kasutati raja vahemaa kalkulaatorit, mille aluseks oli IPC-2221B standard. Pinge tippväärtuseks seati 320 V ning saadud tulemuseks oli 2,5 mm minimaalne vahekaugus. Reaalses trükkplaadis oli kõige väiksem mõõdetud kaugus 5,3 mm, mis ületas ohutuspiiri kahekordselt. Kuigi standardid varieeruvad vastavalt rakendusele ja

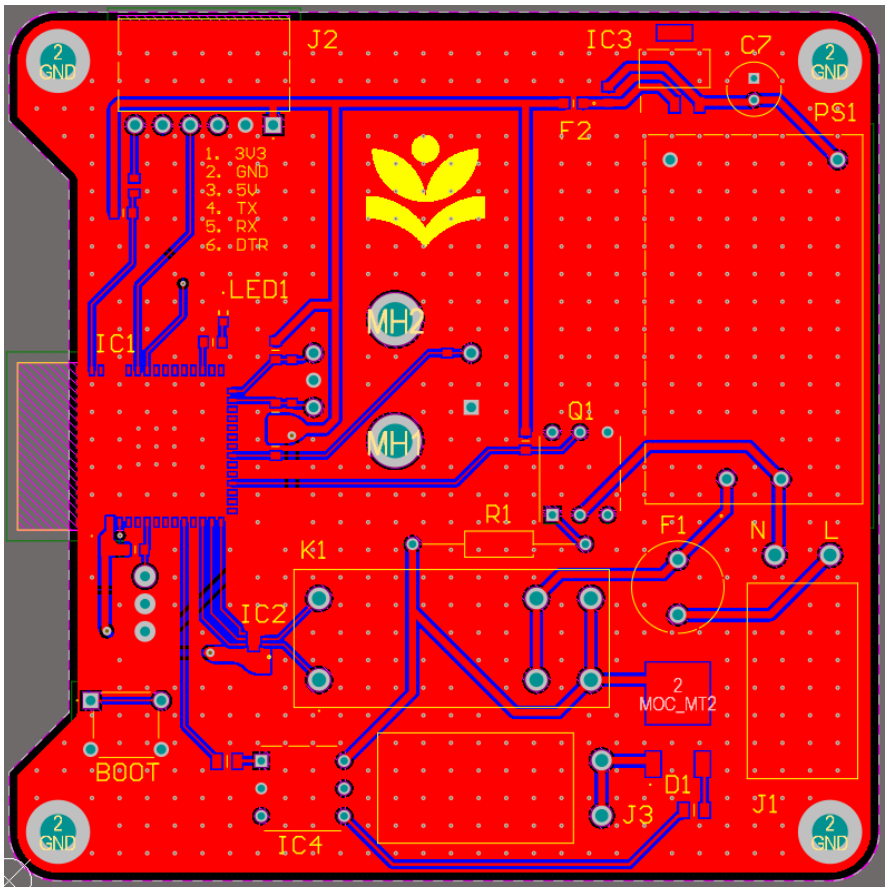
nõutavale isolatsiooniklassile, annab selline varutegur täiendava kaitsekihi võimalike voolukatkestuste või niiskusest tingitud rikete vastu [29].

Komponentide vahelisteks ühendusteks veeti rajad käsitsi. Kõigepealt ühendati signaalirajad, seejärel paigutati toite- ja maandusrajad. Kõrgpinge alade puhul raja laiuse arvutamiseks kasutati spetsiaalset kalkulaatorit ning valiti varuga maksimaalseks vooluks 1 A ja antud trükkplaadi raja paksus oli 0,035 mm. IPC-2221 standardile vastavalt sai tulemuseks 30 mil (1 mil = 0,0254 mm) laiused rajad, mida kasutati nii vooluvõrgu pinge kui ka madalpinge toiteühenduste puhul [30]. Madalpinge signaalide jaoks kasutati 10 mil laiuseid radu. Kõik rajad veeti peamiselt trükkplaadi ülemisel kihil. Ainult kolm rada tuli viia alumisele kihile, kuna teatud ühendused kattusid ning oli vaja vältida signaalide ristumist.

Trükkplaadi maanduspinnad loodi mõlemale kihile kasutades *Polygon* funkstiooni, mis seob kõik tühja ala maandus võrguga ning ühendab sellega kõik maandust vajavad komponendid. Kihtidevaheline ühendus tagati läbiviikude võrgustikuga (*via stitching*), mis genereeriti automaatselt Altium Designeri tööriistaga. Kasutatud läbiviikude mõõtmed olid 10 mil ava, 20 mil kogu diameeter ning nende vahekaugus oli 100 mil.

Silkscreeni ehk tähistuskihi kujundamisel eemaldati väiksematelt passiivkomponentidelt (nt takistid ja kondensaatorid) nende tähised, et säilitada plaadi visuaalne puhtus. Kõikidele pesadele ja klemmidele lisati ühenduspunktide signaalinimetused, et välistada valeühendusi kokkupanemisel. Alumisele kihile lisati ka valmistaja nimi, trükkplaadi nimi ja kuupäev.

Trükkplaadi lõplik kontroll viidi läbi Altium Designeri sisseehitatud Design Rule Check (DRC) tööriistaga, mis võimaldab automaatselt tuvastada võimalikke vigu või rikkumisi määratud disainireeglite suhtes. Kontroll hõlmas nii elektrilisi ühendusi (nt avatud või lühistunud radade tuvastamist) kui ka füüsilisi piiranguid, nagu minimaalne raja laius, radade vahekaugus ja komponentide paigutus. Kasutatud disainireeglid lähtusid peamiselt trükkplaadi tootja JLCPCB tootmisvõimekusest, mille kohta on avaldatud spetsifikatsioonid nende veebilehel [31]. DRC-tööriista abil tagati, et kujundatud trükkplaat vastab tootmisele esitatavatele nõuetele ning välditakse hilisemaid tehnilisi või ohutusprobleeme.



Joonis 15. Trükkplaadi disain

Järgnevas peatükis käsitletakse selle plaadi valmistamist, kokkujootmist ning tekkinud praktilisi probleeme.

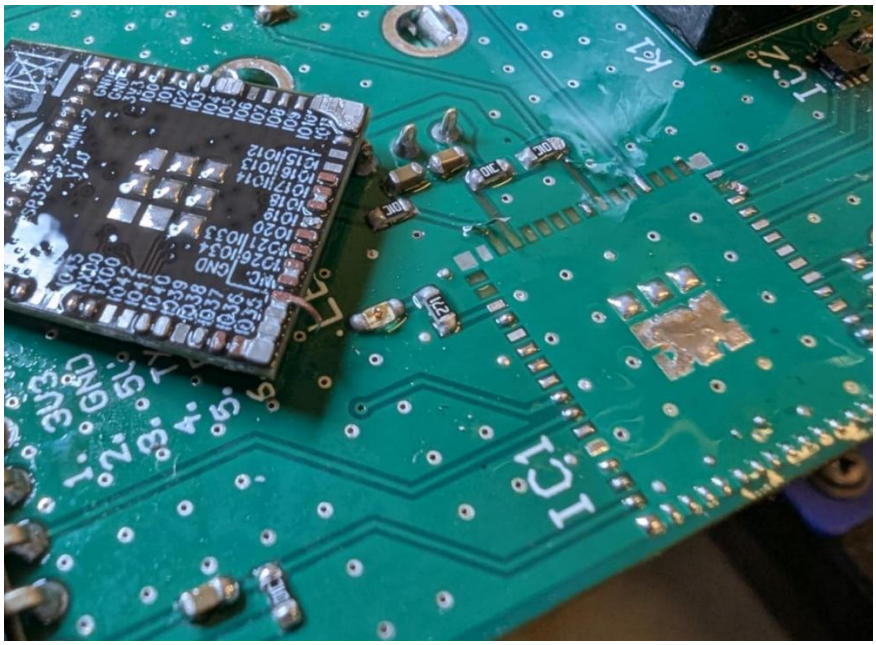
4.3. Trükkplaadi monteerimine ja prototüüpimise probleemid

Trükkplaadi käsitsi monteerimisel kasutati kahte peamist jootmistehnikat: kuumaõhujootmist pindpaigalduskomponentide (SMD) jaoks ja tavalist jootekolbi läbiviiguga komponentide (THT) puhul. SMD-jootmisel kasutati jootepastat (Sn63/Pb37), mida kanti plaadile suruõhul töötava dosaatoriga (vt joonis 16.). Kuumutamine toimus kuumaõhujootmisjaamaga, sõltuvalt komponendi tüübist ülalt või alt. THT-komponendid joodeti käsitsi tavalise jootejaamaga temperatuuril 360–370 °C, kasutades pliid sisaldavat tina.

Joonis 16. Kasutatud kuumaõhujootejaam ja jootepasta dosaator

Kõige keerulisemaks osutus ESP32-S2 mikrokontrolleri jootmine, kuna tegemist on LGA-tüüpi (*Land Grid Array*) korpusega, mille kõik jootekontaktid paiknevad komponendi all ning ei ole väliselt ligipääsetavad. Jootmiseks kanti jootepasta esmalt plaadile, lisati räbustit ning komponent asetati jootealadele. Seejärel kuumutati plaati altpoolt, kuni pasta sulas. Sulamist oli võimalik tuvastada kui komponent muutus kergelt liigutatavaks, see viitas sellele, et kogu jooteala oli korralikult sulanud ja moodustanud ühenduse. Jootmise järel lasti plaadil jahtuda ning komponent jäi paigale.

Protsess ei õnnestunud kohe, esialgu kasutati liiga palju jootepastat, mis tekitas lühiseid. Hiljem ilmnesid kehva kontaktid, mida põhjustas liiga väike kogus jootepastat. Lühised avaldusid toite rakendamisel, kui toiteploki pinge langes nulli ja vool kasvas piirini (300 mA). Pärast mitut eemaldamise ja uuesti jootmise katset said mõned jootealad ja rajad füüsiliselt kahjustada. Joonisel 17. on näha mitmeid lahti tulnud jootmisalasid ja katkised radu plaadil. See viga sundis kõik komponendid uuesti üle kandma varuplaadile.



Joonis 17. ESP32 mahajootmisel tekkinud kahjustused

Lisaprobleemina ilmnes, et mikrokontroller ei läinud algul BOOT-režiimi, mis on vajalik programmi laadimiseks. Probleem seisnes selles, et BOOT-nupu ja ESP IO0-viigu vahel puudus ülestõmbetakisti, mis oleks hoidnud signaali kõrgel tasemel. Ilma selleta jäi IO0 viik madalaks ja mikrokontroller ei käivitanud ennast tavapäraselt. Probleemi lahendamiseks kraabiti trükkplaadi tagaküljel kahe kõrvuti asuva raja (3,3 V toide ja IO0-liin) pealt jootemask maha, paigutati nende vahele 10 kΩ takisti ning joodeti see käsitsi peale. See lahendus võimaldas edukalt mikrokontroller BOOT-režiimi saada ning alustada püsivara laadimisega.

Vaatamata parandustele oli probleeme ka DRV8837 relee juhtseadmega, mille viigud olid samuti väga väikese sammuga. Mikrokontrollerist saadeti relee juhtseadmele sobivad signaalid, kuid juhtseade ei aktiveerinud releed. Multimeetriga mõõtes selgus, et ükski signaal ei jõudnud „NSLEEP“-viigule, mis on vajalik juhtseadme ärkvelolekuks. Vaatamata sellele, et relee juhtseadet ja mikrokontrolleri joodeti uuesti mitu korda, ei hakanud see tööle. Võimalik, et komponendi vale valik või sisemine defekt põhjustas rikke.

Kokkuvõttes ilmnes, et LGA-korpusega mikrokontrolleri käsitsi jootmine on väga ebaefektiivne ja riskantne ilma vastava jootepasta šabloonita. Samuti selgus, et väikese jalavahega SMD-komponentide jootmine nõuab hoolikat planeerimist ja vastavat disaini. Järgmistes prototüüpversioonides tuleks kindlasti kasutada ESP32 arendusmoodulit, mitte paljalt kiipi, kuna see võimaldab vältida nii jootmisraskusi kui ka koodi laadimise

probleeme. Lisaks oleks mõistlik üle vaadata kõik väiksemad SMD-komponendid, et tagada nende töökindlus ja joodetavus käsitsi koostamise korral.

5. TARKVARA DISAIN

Käesolevas peatükis kirjeldatakse seadme ja selle kasutajaliidese tarkvaralise ülesehituse teoreetilist plaani. Lõplikku töötavat tarkvaraversiooni ei ole töö kirjutamise hetkeks veel valminud, kuna riistvaraline prototüüp ei ole täielikult tööle saadud. Siiski on osad funktsioonid, nagu pöördkooderi lugemine ja LED-indikaator, juba edukalt testitud. Järgnevas osas käsitletakse seadme mikrokontrolleri tööloogikat ja komponentide omavahelist tarkvaralist koostööd.

5.1. Seadme tarkvara ülesehitus

Seadme tarkvara ülesandeks on kogu süsteemi juhtimine: kasutajalt sisendi vastuvõtmine, andurite lugemine ning valguse juhtimine vastavalt seadistusele või manuaalsele sisendile. Tarkvara kirjutatakse C++ keeles, kasutades Arduino IDE arenduskeskkonda.

Mikrokontroller ESP32-S2 loeb andmeid valgusandurilt (TEMT6000) analoog-digitaalmuunduri (ADC) kaudu ning saab kasutaja käske pöördkooderi ja nupu kaudu. Pöördkooder on ühendatud katkestusrežiimi, mis võimaldab kiiret ja täpset sisendi lugemist. Nupu vajutusel lülitub seade automaatsest töörežiimilt üle manuaalsele.

Indikaator-LED aitab kasutajal mõista seadme olekut: näiteks vilgub tavalises töörežiimis iga 5 sekundi tagant, kuid põleb pidevalt võimaliku tõrke korral, näiteks kui sümistor ei aktiveeru ootuspäraselt.

Kasutaja määratud ärkamis- ja uinumisajad oleksid sisestatud veebiliidese kaudu ning salvestatud ESP32 sisemällu. Mikrokontroller jälgib pidevalt kellaaega ning reguleerib valguse tugevust vastavalt määratud graafikule. Täiendava funktsioonina on võimalik jälgida ka valgusanduri näitu ning kohandada valgust automaatselt, et kompenseerida päeva loomulikku valguse muutust.

Kuna ESP32-S2 võimaldab ka Wi-Fi ühendust, saab tarkvara tulevikus laiendada kaugjuhtimise ja võrgu kaudu uuendamise võimalustega. Töö kirjutamise hetkel on tarkvaraliselt realiseeritud ainult osa funktsionaalsusest ning süsteemi täielik töökindel käitumine selgub pärast seadme edukat prototüüpimist.

5.2 Veebiliidese kavandamine

Seadme kasutusmugavuse ning isikupärastamise võimaldamiseks on kavandatud lihtne veebiliides, mis töötab lokaalses Wi-Fi võrgus. Süsteem ei vaja eraldi serverit ega pilveteenuseid, mis muudab lahenduse turvalisemaks ning lihtsamini kasutatavaks koduses või väiksemas kontorikeskkonnas. Veebiliidese serverina toimib ESP32-S2 mikrokontroller ise, pakkudes sisseehitatud HTML-põhist kasutajaliidest, millele pääseb ligi nutiseadme või arvuti kaudu.

Veebiliides võimaldab kasutajal seadistada valguse automaatseid päevatsükleid. Kasutaja saab määrata nii ärkamise kui ka magamamineku kellaajad ning valida, kui palju varem enne neid kellaaegu hakkab valgusti järk-järgult eredamaks või hämaramaks muutuma. Lisaks saab käsitsi reguleerida valgustugevust läbi reaalajas toimiva liidese ning lülitada töörežiimi automaat- ja käsitsijuhtimise vahel. Võimalik on kohandada ka valgusanduri tundlikkust, et süsteem sobituks paremini ruumi loomuliku valgustasemega või vastaks paremini kasutaja isiklikele eelistustele.

Visuaalselt võiks liides koosneda lihtsatest liuguritest, valikunuppudest ja kellaaegade sisestusväljadest. Seadistused salvestatakse mikrokontrolleri sisemällu, mis võimaldab seadet kasutada ka pärast voolukatkestusi ilma vajaduseta seadeid uuesti sisestada.

Kuigi käesoleva töö raames ei ole veebiliidest veel realiseeritud, annab see teoreetiline kirjeldus ülevaate liidese kavandatud funktsionaalsusest ja kasutusloogikast. Kavandatud lahendus toetab tervislikku ja kohanduvat valgusrežiimi ning loob kasutajale võimaluse juhtida seadet lihtsalt ja intuitiivselt.

6. KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli arendada toimiv prototüüp nutikast valguslülitist, mis suudaks reguleerida valguse tugevust vastavalt kasutaja päevarütmile ja ruumi valgustingimustele. Töö keskendus elektroonilise riistvara disainile, trükkplaadi projekteerimisele, komponentide valikule ning tarkvara struktuuri kavandamisele. Eesmärk ei olnud ainult seadme valmimine, vaid ka praktiliste oskuste arendamine kogu toote arendusprotsessi ulatuses.

Töö käigus viidi läbi turu-uuring ja määratleti seadme funktsionaalsed nõuded. Komponentide valikul hinnati nende tehnilist sobivust, usaldusväärsust ja energiatõhusust. Trükkplaadi skeem ja paigutus koostati Altium Designeris, arvestades nii komponentide loogilist paigutust kui ka elektriohutuse norme.

Trükkplaadi valmistamisel ja monteerimisel ilmnesid mitmed praktilised probleemid. Kõige suuremaks takistuseks osutus LGA-korpusega ESP32-S2 mikrokontrolleri käsitsi jootmine, mille jootealad paiknevad komponendi all ning nõuavad täpset protsessi ja sageli šablooniga jootepasta pealekandmist. Vale jootepasta kogus põhjustas lühiseid ja halbu ühendusi, mis omakorda viis trükkplaadi kahjustuseni. Probleemid ilmnesid ka tarkvara üleslaadimisel, kuna disainist puudus vajalik ülestõmbetakisti BOOT-viigu jaoks, mis tuli hiljem käsitsi lisada. Lisaks ei õnnestunud tööle saada DRV8837 relee juhtseadet, mille tõrke põhjus jäi ebaselgeks, kuid võimalikeks põhjusteks olid kas sisemine defekt või mittetöötav ühendus nSLEEP-viigul.

Töö tulemusena valmis küll mittetäielikult funktsioneeriv prototüüp, kuid projekt täitis oma peamise eesmärgi, andes autorile põhjaliku ja praktilise kogemuse elektroonikaprojektide kavandamises ja teostamises. Olulise õppetunnina võib välja tuua vajaduse etapiviisilise prototüüpimise järele: kriitilisi komponente tuleks esmalt testida arendusplaadil või väiksemal montaažiplaadil enne lõpliku trükkplaadi valmistamist. Samuti selgus, kui oluline on järgida komponentide andmelehtedes toodud soovitusi ja tootja juhiseid, eriti antenni asetuse ja BOOT-režiimi tingimuste osas.

Tulevikus võiks sarnase seadme puhul kasutada ESP32 arendusmoodulit, mis lihtsustab nii jootmist kui ka tarkvara üleslaadimist. Samuti tuleks kaaluda väiksemate SMD-

komponentide asendamist suurematega või kasutada ainult neid, mille käsitsi jootmine on usaldusväärne. Prototüüpide jaoks on mõistlik teha mitu trükkplaadi iteratsiooni ning vältida kiirustamist disainifaasis.

Töös kavandatud funktsionaalsus, nagu valgusrežiimi automaatne kohandamine, kasutajaliides ja anduripõhine juhtimine, loob tugeva aluse edasisele arendusele. Järgmistes versioonides võiks seadmesse lisada liikumisanduri integreerimise ning RGB LEDi kasutamise, et võimaldada valgustuse spektraalset juhtimist. Täiendavalt võiks välja töötada seadmele sobiva 3D-prinditud korpuse, mis võimaldaks selle mugavat kasutust kodustes oludes.

Kokkuvõttes tõestas töö, et isegi kui lõplik tehniline eesmärk ei ole täielikult saavutatud, on projekt edukas juhul, kui see arendab autoris süsteemset mõtlemist, tehnilist kompetentsi ja praktilist oskust tulla toime reaalsete arendustakistustega. Töö tulemused annavad kindla lähtekoha tulevasteks arendusprojektideks nii riistvara kui ka tarkvara vallas.

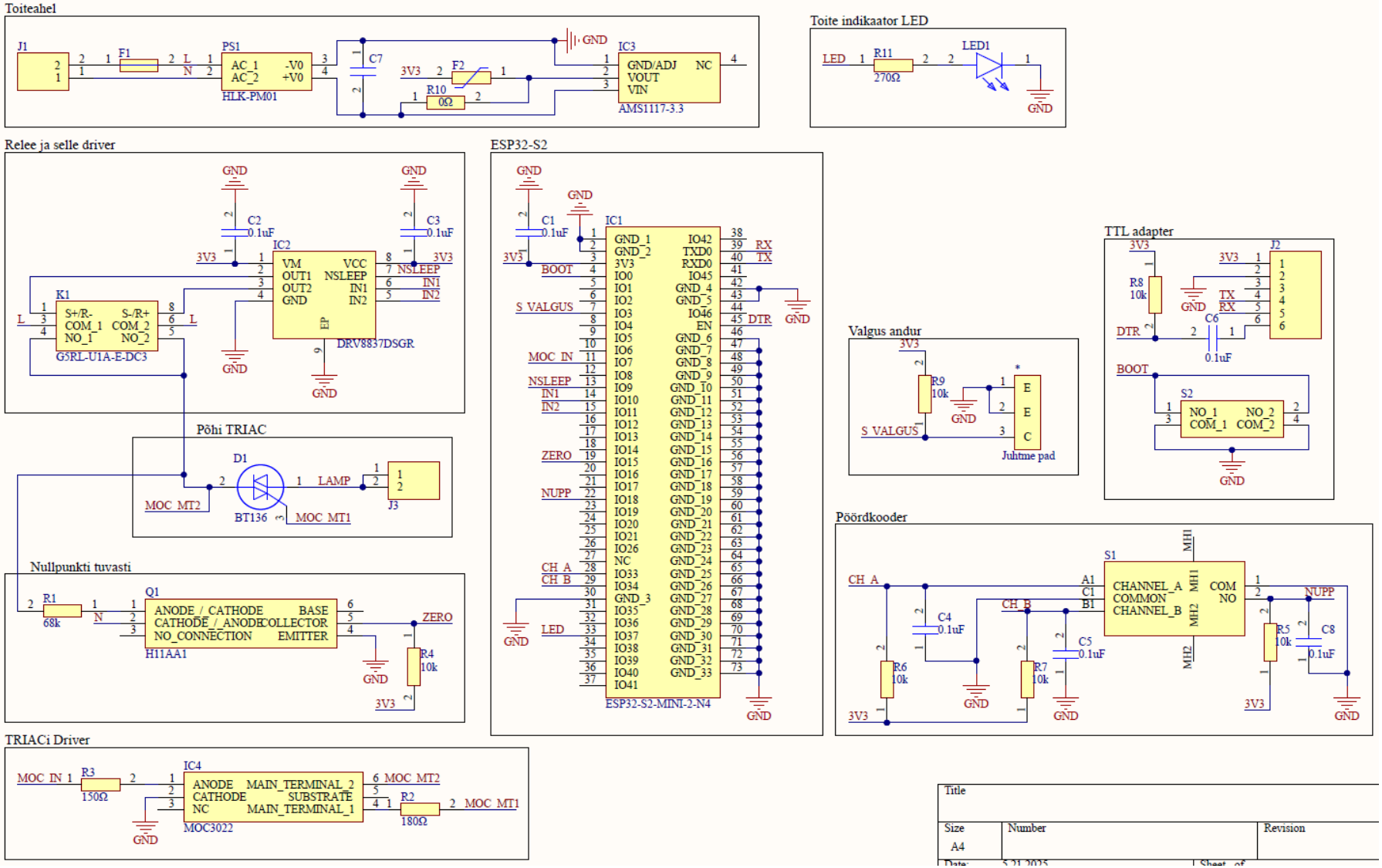
ALLIKALOEND

1. **Sirge, T., Merisalu, E., Raimla, R., Reinvee, M., Teras, E.** (2017) Ruumi tehisvalgustuse mõju tööviljakusele. Tartu: Eesti Maaülikool. 62 lk.
2. **Horst, R.L., Silverman, E.B., Rershner, R.L., Mahaffey, D.L. and Parris, H. L.** (1988). Research Study on the Effects of Illumination on Performance of Control Room Tasks. IEEE Fourth Conference on Human Factors a Power Plants, 238–246 p.
3. **Papatsimpa, C., Linnartz, J.-P.** (2020). Personalized Office Lighting for Circadian Health and Improved Sleep. Sensors, Vol. 20, No. 16, pp. 1–17. https://doi.org/10.3390/s20164569
4. **Nash, T. R., Chow, E. S., Law, A. D., Fu, S. D., Fuszara, E., Bilska, A., Bebas, P., Kretzschmar, D., Giebultowicz, J. M.** (2019). Daily blue-light exposure shortens lifespan and causes brain neurodegeneration in Drosophila. – NPJ Aging and Mechanisms of Disease, 5, 8–8. https://doi.org/10.1038/s41514-019-0038-6
5. EVS-EN 12464-1:2021. Valgus ja valgustus. Töökohavalgustus. Osa 1: Sisetöökohad. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus.
6. GE Lighting (s. a.). GE Cync Smart Dimmer Light Switch [veebileht]. https://www.gelighting.com/led-lights/bulbs/ge-cync-smart-dimmer-light-switch-motion-sensor-no-neutral-wire-required-bluetooth#spec-list (31.05.2025).
7. Leviton (s. a.). Decora Smart Motion Sensing Dimmer Switch [veebileht]. https://leviton.com/products/d2msd-1bw (31.05.2025)
8. Tp-link (s. a.) Kasa Smart Wi-Fi Dimmer Switch, KS220M [veebileht]. https://www.tp-link.com/us/home-networking/smart-switch/ks220m/#overview (31.05.2025)
9. TeslaSmart (s. a.). TESLA Smart Switch Dimmer Touch [veebileht]. https://www.teslasmart.com/tesla-smart-switch-dimmer-touch (31.05.2025)
10. **Beningo, J.** (2014). 10 Steps to Selecting a Microcontroller [veebileht]. https://community.arm.com/arm-community-blogs/b/embedded-and-microcontrollers-blog/posts/10-steps-to-selecting-a-microcontroller (31.05.2025)
11. **Krishniah, G.** (2024). Choose the Best MCU Architecture for IoT Development [veebileht]. https://www.silabs.com/blog/choose-the-best-mcu-architecture-for-iot-development (31.05.2025)
12. Espressif Systems (s. a.). Modules [veebileht]. https://www.espressif.com/en/products/modules (31.05.2025)
13. Espressif Systems (2024). ESP32-S2-MINI-2 andmeleht [veebileht]. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s2-mini-2_esp32-s2-mini-2u_datasheet_en.pdf (01.06.2025)
14. Shenzhen Hi-Link Electronic (2022). 3W Ultra small series power module [veebileht]. https://drive.google.com/file/d/1akkTcKPDKsjRavcggvhdrLv0_S19H-UG/view?usp=sharing (01.06.2025)
15. Schruter Electronic Components (s. a.). MST 250 – Fuses datasheet [veebileht]. https://www.schurter.com/en/datasheet/typ_mst_250.pdf (01.06.2025)
16. Littlefuse (2025). PolySwitch Resettable PPTC datasheet [veebileht]. https://www.littelfuse.com/assetdocs/resettable-ptcs-low-rho-smd-ptc-datasheet?assetguid=b786faf0-de16-4763-9d22-6b8080943caf (01.06.2025)
17. Advanced Monolithic Systems (s. a.). AMS1117 andmeleht [veebileht]. http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf (01.06.2025)
18. Vishay Semiconductors (2011). TEMT6000X01 andmeleht [veebileht]. https://www.vishay.com/docs/81579/temt6000.pdf (01.06.2025)
19. Bourns (2021). PEC12R – 12mm Incremental Encoder datasheet [veebileht]. https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PEC12R.pdf (01.06.2025)

20. **Hopkins, J.** (2018). Polling vs Interrupts: Exploring their Differences and Applications [veebileht]. https://www.totalphase.com/blog/2023/10/polling-interrupts-exploring-differences-applications/ (01.06.2025)
21. OMRON Corporation (s. a.). G5RL-U/-K PCB Power Relay datasheet [veebileht]. https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-g5rl_uk.pdf (01.06.2025)
22. Texas Instruments (2021). DRV883x Low-Voltage H-Bridge Driver [veebileht]. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8837.pdf?ts=1747062199080&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FDRV8837
23. **Toomla, H.** (2012). Elektroonikakomponendid II. Tallinna Tööstushariduskeskus [veebileht]. https://web.archive.org/web/20130125061206/http://www.e-ope.ee/_download/euni_repository/file/3509/Elektroonikakomponendid%20II.zip/28_tristoridsmistorid.html (01.06.2025)
24. **Wan, M.** (2024). Everything you need to know About Triac Dimming for LEDs. [veebileht]. https://www.ledyilighting.com/everything-you-need-to-know-about-triac-dimming-for-leds/#elementor-toc__heading-anchor-13 (01.06.2025)
25. WeEn Semiconductors. (2017). BT136S-800E datasheet [veebileht]. https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/distributors/Datasheets_SAMA/27a2d28e56069778258832d81d793e22.pdf (01.06.2025)
26. LITE-ON Technology. (2010). MOC3020 thru MOC3023 SERIES [veebileht]. https://componentsearchengine.com/Datasheets/1/MOC3022.pdf (01.06.2025)
27. Everlight Electronics. (2008). H11AAX Series datasheet [veebileht]. https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/distributors/Datasheets-3/DSA-53349.pdf (01.06.2025)
28. Espressif Systems (s. a.) PCB Layout Design [veebileht]. https://docs.espressif.com/projects/esp-hardware-design-guidelines/en/latest/esp32s2/pcb-layout-design.html#rf (01.06.2025)
29. **Rozenblat, L.** (2014) CALCULATING SPACING BETWEEN PCB TRACES FOR VARIOUS VOLTAGE LEVELS [veebileht] https://www.smps.us/pcbtracespacing.html (01.06.2025)
30. AdvancedPCB (s. a.) Trace Width Calculator [veebileht]. https://www.advancedpcb.com/en-us/tools/trace-width-calculator/ (01.06.2025)
31. JLCPCB (s. a.) PCB Manufacturing & Assembly Capabilities [veebileht]. https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities (01.06.2025)

LISAD

Lisa 1. **Altiumi tarkvaras koostatud elektroonikaskeem**



Lisa 2. **Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Mihkel Ruul, sünniaeg 03.03.2002,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö „Nutikas Valguslüliti“, mille juhendaja(d) on Janar Kalder ja Jaak Jõgi, salvestamiseks säilitamise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi EMU DSpace lisamiseks ja Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates lõputööd reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. olen teadlik, et lihtlitsentsiga antavad õigused jäävad alles ka mulle;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Juhendaja(d) (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas