



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

USB PD TOITEPLOKI TESTSEADME DISAIN

DESIGN OF A USB PD ADAPTER TESTING DEVICE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Joosep Niinemägi

Üliõpilaskood: 179825EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus, Lektor

Tallinn, 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“19” Mai 2020

Autor: Joosep Niinemägi

/ digitaalselt allkirjastatud /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“” Mai 2020

Juhendaja: Martin Jaanus

/ digitaalselt allkirjastatud /

Kaitsmisele lubatud

“19” Mai 2020 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Joosep Niinemägi

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: USB PD toiteploki testseadme disain

Kuupäev: 19.05.2020

X lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Lektor Martin Jaanus

Töö konsultant (konsultandid): Kalle Arulaane

Sisu kirjeldus:

Lõputööga valmis testseadme disain, mille eesmärk on parandada USB Power Delivery toiteplokkide testimise võimalusi. Töö käigus valmis elektriskeem, trükkplaadi disain ning testseadme testimiseks vajalik tarkvara. Tarkvara võimaldab arvuti ja testseadme vahelise ühenduse ning testseadme komponentide funktsionaalsuse testimist. Töö valmimiseks tuli õppida tundma USB standardeid ning teostada põhjalik komponentide analüüs.

Märksõnad: Trükkplaadi disain, USB, USB Power Delivery, Altium, elektriskeem, C programmeerimine, mikrokontrollerid

ABSTRACT

Author: Joosep Niinemägi

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Design of a USB PD Adapter Testing Device

Date: 19.05.2020

X pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Lecturer Martin Jaanus

Consultant(s): Kalle Arulaane

Abstract:

With this thesis, a testing device design was completed for USB Power Delivery adapters to improve testing methods. In the process, an electrical schematic, Printed Circuit Board design and necessary software. Named software allows for testing the computer's connection to said device and testing the functionality of the board's components. For this development process it was necessary to get familiar with USB standards and to conduct a thorough analysis of the components.

Keywords: PCB design, USB, USB Power Delivery, Altium, electrical schematics, programming in C, microcontrollers

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	USB PD adapteri testseadme disain
Lõputöö teema inglise keeles:	Design of a USB PD Adapter Testing Device
Üliõpilane:	Joosep Niinemägi, 179825EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	Bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Martin Jaanus
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	kehtivusaja annab juhendaja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	20.05.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Teema idee tuli praktikakohas USB PD toiteplokkide testides. USB PD on standard, mis võimaldab üle USB-C kanda üle võimsuseid kuni 100W ning väljastada pingeid vahemikus 3.3V – 21V vooludel kuni 5 A. Pingete toiteplokkilt küsimine toimub üle standardijärgse protokolliga. Standardi kasutuselevõtt kiireneb ning toiteplokkide on vaja testida näiteks kasuteguri, stabiilsuse ning EMC/EMI tarbeks. Hetkel ei ole turul palju seadmeid, mis suhtleks nii arvutiga kui ka USB PD toiteplokkiga.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on disainida seade, mida on võimalik programmeerida, oleks võimeline vahetama sõnumeid arvutiga ning USB PD toiteplokkiga, omama väljundklemme toiteploki väljundi jaoks.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Mis nõuded on USB standarditel?

Mis komponente on seadme toimimiseks vaja?

Kuidas peaksid olema lahendatud komponentidevahelised elektrilised ühendused?

4. Lähteandmed

Juhindutakse USB Type-C ja USB PD standardite spetsifikatsioonidest.

Juhindutakse valitava mikrokontrolleri tootja spetsifikatsioonist.

Juhindutakse seatud eesmärkidest.

5. Uurimismeetodid

Uurimist alustatakse USB standardite tundma õppimisest.

Seejärel on vaja panna paika nõuded ning valida nõuetele vastavad komponendid ja koostada elektriskeem.

Elektriskeemi alusel saab disainida trükkplaati.

Trükkplaadi testimiseks on tarvis programmeerida mikrokontrollerit. Selleks on tarvis kirjutada testtarkvara.

6. Graafiline osa

USB pistikute võrdlus

Mikrokontrollerite võrdlus.

Mikrokontrolleri plokk skeem

USB PD plokk skeem

Protsessimudel

Elektriskeem

Trükkplaat

7. Töö struktuur

Eessõna

Sissejuhatus

1. Analüüs

1.1 USB standardid

1.1.1 USB standardite võrdlus

1.1.2 USB Type-C standard

1.1.3 USB Power Delivery standard

1.1.4 USB PD arhitektuur

1.1.5 USB Type-C ühenduse loomine

1.2 Toiteplokkide testimine

1.2.1 Testimismetoodika

1.2.2 Kasutuselolev arvuti ja toiteploki vaheline seade

1.2.3 Turulolevad seadmed

2. Testseadme disain

2.1 Nõuded

2.1.1 Standardijärgsed nõuded

2.1.2 Funktsionaalsed nõuded

2.2 Elektriskeemi koostamine

2.3 Mikrokontroller

- 2.3.1 Silicon Labs SLRDK1000A arendusplaat
- 2.3.2 STMicroelectronics STM32G071B-Disco USB-C Discovery kit
- 2.3.3 STM32G071RxT mikrokontroller
- 2.3.4 Toiteskeemid
- 2.3.5 Ostsillaatori skeem
- 2.3.6 Lüliti ning valgusdioodide skeem
- 2.3.7 Ühendusskeem arvutipoolse USB pistikuga
- 2.3.8 Programmeerimisliides
- 2.3.9 Mikrokontrolleri ja USB-C pistiku vaheline skeem

2.4 Trükkplaadi disain

2.5 Testimine

Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

USB PD spetsifikatsioon.

USB Type-C spetsifikatsioon

SMT32 mikrokontrolleri spetsifikatsioon.

Programmeerimine C keeles, V. Leppikson

9. Lõputöö konsultandid

Martin Jaanus – Elektriskeemi koostamine ja nõu tarkvaraga.

Kalle Arulaane – Mikrokontrolleri trükkplaadi ja elektriskeemi disainimine.

10. Töö etapid ja ajakava

Tutvumine USB PD standardiga. (1. detsember)

Tutvumine Mikrokontrolleritega ning valiku langetamine. (15. detsember)

Mikrokontrolleri ja arvuti vaheline suhtlus. (15 veebruar)

Mikrokontrolleri ja USB PD toiteploki vaheline suhtlus. (30. märts)

Mikrokontrollerite võrdluse kirjutamine. (15. Aprill)

Skeemi koostamine. (30. aprill)

Põhiosa kirjutamine. (15. mai)

Sissejuhatuse kirjutamine. (17. mai)

Kokkuvõtte kirjutamine. (17. mai)

Töö esimene versioon valmis. (17. mai)

Juhendajale läbilugemiseks saatmine. (19. mai)

Paranduste sisseviimine. (19. mai)

Juhendajale teiseks lugemiseks saatmine. (20. mai)

Viimaste paranduste sisseviimine. (20. mai)

Töö valmis. (20. mai)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	11
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	12
SISSEJUHATUS.....	14
1. Analüüs.....	16
1.1 USB standardid	16
1.1.1 USB standardite võrdlus	16
1.1.2 USB Type-C standard	18
1.1.3 USB Power Delivery standard	18
1.1.4 USB PD arhitektuur	19
1.1.5 USB Type-C ühenduse loomine	20
1.2 Toiteplokkide testimine.....	21
1.2.1 Testimismetoodika	21
1.2.2 Kasutuselolev lahendus	22
1.2.3 Turulolevad seadmed	22
2. Testseadme disain.....	23
2.1 Nõuded.....	23
2.1.1 Standardijärgsed nõuded.....	23
2.1.2 Funktsionaalsed nõuded.....	24
2.2 Elektriskeemi koostamine	25
2.3 Mikrokontroller.....	26
2.3.1 Silicon Labs SLRDK1000A arendusplaat	26
2.3.2 STMicroelectronics STM32G071B-Disco USB-C Discovery kit.....	27

2.3.3 STM32G071RxT mikrokontroller	29
2.3.4 Toiteskeemid.....	30
2.3.5 Ostsillaatori skeem	32
2.3.6 Lüliti ning valgusdiodide skeem	34
2.3.7 Ühendusskeem arvutipoolse USB pistikuga.....	37
2.3.8 Programmeerimine ja silumine	39
2.3.9 Mikrokontrolleri ja USB-C pistiku vaheline skeem	41
2.4 Trükkplaadi disain	46
2.5 Testimine.....	49
KOKKUVÕTE.....	50
SUMMARY	51
3. Kasutatud kirjandus.....	52

EESSÕNA

Dyne Semiconductor OÜ-ga koostööd tehes leiti vajadus seadme jaoks, mis võimaldaks automatiseerida USB PD toiteplokkide testimist. Eelnevalt olemas olnud lahendusel puudus avatud lähtekood ning toite väljundi klemmid, mistõttu ei olnud see parim lahendus tööstusliku testimise puhul.

Lõputöö raames valiti seadme jaoks komponendid, disainiti trükkplaat ja seadme testimiseks vajalik tarkvara. Seadme lõplik lahendus suudab suhelda arvuti ning USB PD standardit toetava toiteplokkiga, et testida kasutegurit, stabiilsust, EMC häiringuid ning uurida ohutusega seonduvaid aspekte.

Siinkohal tahan tänada Martin Jaanust ning Kalle Arulaanet juhendamise eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

COM port	Communication port ehk järjestikport
D+ / D-	Differentsiaalsed andmeliinid
DC/DC	Alalispingemuundur, alalispingest alalispingeks.
Displayport	Digitaalse kuvamisliidese standard
DPM	Device Policy Manager ehk seadme lepingu haldur
DVI	Digital Video Interface ehk Digitaalvideo liides
EMC	Electromagnetic Compatibility ehk elektromagneeriline ühilduvus
EMI	Electromagnetic Interference elektromagneetiline segatavus
E-rida	Eelisarvude rida
ESD	Electrostatic Discharge ehk elektrostaatiline laeng
FPGA	Field-Programmable Gate Array ehk väliprogrammeeritav väravamassiiv
GND	Ground ehk maandus/maa
GPIO	General-Purpose Input/Output ehk üldise otstarbega sisend/väljund
HDMI	High Definition Multimedia Interface ehk kõrglahutusega multimeediumliides
I/O	Input/Output ehk sisend/väljund
IC	Integrated Circuit ehk integraallülitus
JTAG	Joint Test Action Group
LED	Light-Emitting Diode ehk valgust kiirgav diod
MCU	Microcontroller Unit ehk mikrokontroller
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor ehk isoleeritud paisuga väljatransistor
PE	Policy Engine ehk lepingumootor
Physical Layer	Füüsiline kiht
ppm	Parts per million ehk miljondikosa
Pull-down	Signaali ning maa vahele ühendatav takisti
Quick Charge	Qualcommi kiirlaadimise standard
Rx	Vastuvõtukanal
Serial	Jadaliides
Sink	Läte, tarbija
SMD	Surface-mount technology ehk pinna peale joodetav tehnika
Source	Allikas
ST-Link	ST välja töötatud silumis IC
SWD	Serial Wire Debug ehk standardne järjestikuline silumisiid

TH	Through-hole ehk läbi augu kinnitus
TVS	Transient Voltage Suppression (diode) ehk supressordiod
Tx	Saatekanal
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter ehk universaalne asünkroonne vastuvõtja/saatja
UGND	USB Ground ehk USB maa
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter ehk universaalne sünkroonne/asünkroonne vastuvõtja/vastuvõtja
USB	Universal Serial Bus ehk Universaalne Järjestik Siin
USB micro-B	USB micro-B ehk USB pistikühenduse tüüp
USB PD	USB Power Delivery ehk USB võimsuse edastus
USB Type-C	USB-C ehk USB pistikühenduse tüüp
VAC	vahelduvpinge
VBUS	Voltage Bus ehk klemmipinge
VISA	Virtual Instrument Software Architecture ehk virtuaalne seadme tarkvara arhitektuur.

SISSEJUHATUS

Elektroonikaseadmete omavahel ühendamiseks on kasutatud aastakümneid erinevaid ühendustüüpe. Kui andmeedastuseks on aastakümneid proovitud standardiseerida erinevaid liideseid, näiteks EIA-232, paralleelliides, USB, HDMI, DVI, siis tänapäeva akutoitega tarbeelektroonika laadimiseks on ajaloolistel põhjustel kasutusel väga erinevaid toitelahendusi, enamasti erinevate pingete ja vooludega. Samuti on kasutusel hulgaliselt erinevaid ning mittestandardiseeritud pistikühendusi.

USB Implementers Forum tuli 2014. aastal välja USB Type-C standardiga, mis sihib kokku viia videoedastuse, kiire andmevahetuse ja seadmete toite ühte ühendusstandardisse. USB Type-C kaabel on ümberpööratav, ehk võimaldab sisestust kahtepidi. [1] Antud ühendustüüp on peagi kohustuslik ühendusstandard Euroopa Liidus müüdavatele tarbeelektroonika seadmetele, mis kiirendab standardi kasutuselevõttu ja levikut. [2]

Tänu USB Type-C standardi laialdasele levikule muutuvad aina levinumaks ka USB PD toiteplokid. Toiteplokkide tootjatel on vajadus testida väljatöötatud toiteallikaid – mõõta kasutegurit, stabiilsust, elektromagneetilist ühilduvust ning uurida ohutusega seonduvaid aspekte – seda kõike erinevate voolude ning pingete juures. Kui ajalooliselt oli näiteks sülearvuti laadija konkreetse väljundpingega ning maksimaalse voolupiiriga, siis testimise vajadus oligi vaid sellel konkretselt pingel ning kuni voolupiirini. USB PD võimaldab kasutada erinevaid profiile ning teatud juhtudel isegi programmeeritavat toiteallikat (PPS), mis võimaldab toitallika väljundpinget seada 20mV sammuga ning samuti seada voolupiiri 50mA sammuga. See muudab vajalike testide hulga väga suureks ning dikteerib vajaduse automatiseeritud testimise järele. USB PD standardile vastavad toiteplokid on digitaalselt konfigureeritava väljundpingega ning võimaldab toidet ainult teisele samale standardijärgsele seadmele. Testimise aspektist on tarvis seadet, mis võimaldab toiteploki perspektiivist olla vastuvõttev seade, mis suudab suhelda ka teste läbiviiva arvuti või muu seadmega. Sellise lahenduse rakendamisel on võimalik automatiseerida testimisprotsessi.

Lõputööga välja töötatud nimetatud testseadme riistvara ning seadme testimiseks vajalik tarkvara. Testseadme loomiseks viidi läbi USB standardite analüüs, seati tööle nõuded, koostati elektriskeem, analüüsiti komponente, disainiti trükkplaat ning loodi valmidus antud seadme testimiseks. Elektriskeemi ja trükkplaadi koostamiseks on kasutatud programmi Altium, skeemide koostamiseks kasutati programmi yEd ning tarkvara loodi Eclipse raamistikus.

Käesolev lõputöö annab detailise ülevaate sooritatud projektist. Lõputöö põhiosa koosneb kahest osast: analüüs ja testseadme disain. Analüüsi kirjelduses on välja toodud USB standardite analüüs, lõputöö nõuded ning eesmärgid. Testseadme disaini all on enim keskendunud testseadme

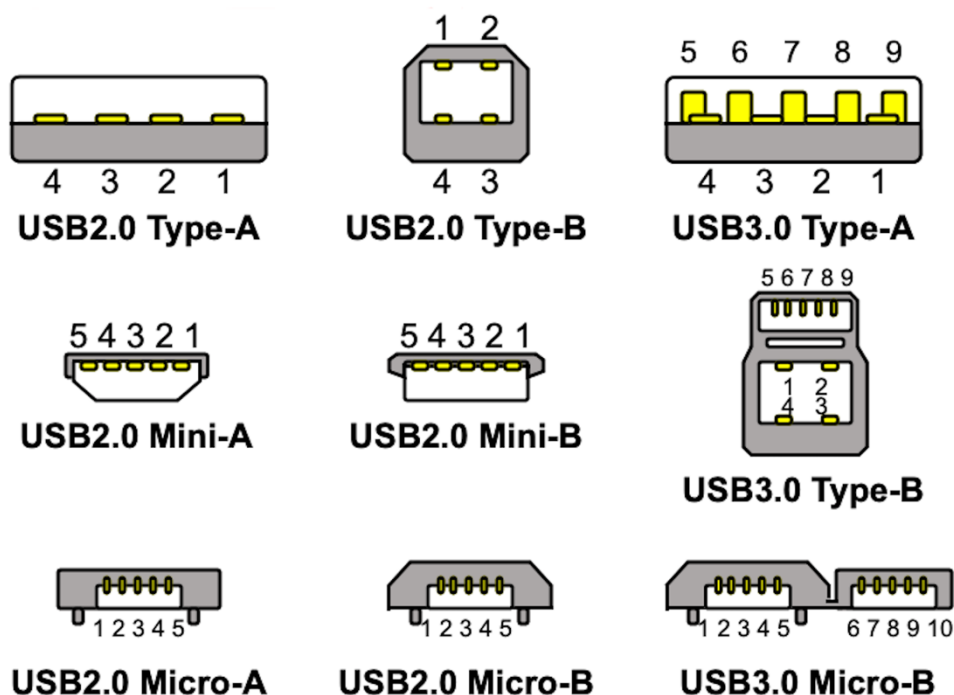
komponentide valimisele ning nende analüüsile, elektriskeemile ning vajalikele arvutustele. Trükkplaadi disainimisest ja testimiseks vajalikust tarkvarast räägitakse väiksemas mahus.

1. Analüüs

Testseadme valmimiseks oli vaja teostada põhjalik *Universal Serial Bus* (edaspidi USB) standardite analüüs, et saada ülevaade valdkonna spetsiifikast.

1.1 USB standardid

USB standardid spetsifitseerivad ära ühenduste elektrilised, mehaanilised ning protokollid parameetrid. USB standarditega on üle aastate välja tulnud erinevaid pistikutüüpe (Joonis 1).



Joonis 1. Erinevad USB pistikud [2]

Esimene USB standard loodi USB Implementers Forum Inc (edaspidi USB IF) poolt 1996. aastal. USB IF on mittetulundusühing, mis on loodud elektroonikatootjate poolt, kes töötasid välja esimese USB spetsifikatsiooni. [3]

Standard võimaldas ühendada mitmeid seadmeid arvuti külge kasutades ühte kaablit. Läbi aastate on standardit uuendatud ning ka kasutusvaldkonnad on kasvanud. Standardit ei kasutata ainult andmevahetuse jaoks, vaid ka video edastamiseks ning seadmete toiteks.

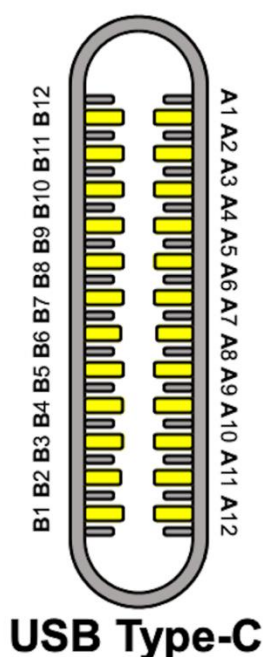
1.1.1 USB standardite võrdlus

USB 1.x standard [3] tuli välja 1996. aastal. Standard võimaldab andmevahetust kuni 12 Mbit/s. Ametlikke pistikutüüpe oli kaks. Pistikud sisaldavad endas 4 klemmi.

USB 2.x standard [4] tuli välja 2000. aastal. Standard võimaldab andmevahetust kuni 480 Mbit/s. Lisandus võimalus laadida seadmeid seinadapteriga. Ametlikke pistikutüüpe tuli juurde, võimaldades kasutada standardit mugavamalt väiksemate seadmetega. Jooniselt võib märgata pistikutel viiendat klemmi. Tegu on ID klemmiga, mida kasutatakse rollide määramiseks – host ning slave.

USB 3.x standard [5] tuli välja 2008. aastal ning sai kaks uuendust. USB 3.0, 3.1 ja 3.2 standardite andmevahetuse maksimaalsed kiirused on vastavalt 5, 10 ning 20 Gbit/s. Pistikud, mida USB 3.0 standard välja pakub sisaldavad endas 9 klemmi endise 5 asemel.

USB 3.1 standardiga [6] tuli kasutusele neljas pistikutüüp USB Type-C. Type-C pistik on ümberpööratav, mis tähendab, et kaablit saab sisestada kahte pidi (Joonis 2).



Joonis 2. USB Type-C pistik. [2]

USB 3.2 standardiga [7] kadus toetus USB Type-B ning Micro-B Superspeed pistikutele.

USB 4.x standard [8] tuli välja aastal 2019, tutvustades andmevahetuskiirusi kuni 40 Gbit/s. Standard baseerub Inteli ja Apple'i poolt välja töötatud Thunderbolt 3 protokollil, võimaldades asendada muuhulgas HDMI ja Displayport kaableid toetades kuni kahe monitori video edastamist ühe kaabliga. Viimane standard kasutab ainult USB Type-C pistikuid. Kõik uuemad standardid toetavad vanemaid standardeid, kuid mitmetel juhtudel on üleminekuadapteri kasutamine vajalik. [8]

1.1.2 USB Type-C standard

Esimene USB Type-C standard [9] tuli välja 2014. aastal. Standard defineerib ära ühenduste elektrilised ning mehaanilised nõuded. Type-C pesa sisaldab endas 24 klemmi – mõlemas küljes 12. Klemmid on mõlemal pool, et võimaldada kaablit sisestada mõlemat pidi ning mõlemad kaabli otsad on ühesugused. Vähendatud klemmide arvuga pistikud on samuti kasutusel näiteks toiteplokkides, et lihtsustada skeemi ning vähendada komponentide maksumust. Sellisel pistikul on kasutatud ainult GND, VBUS ja CC liine. [9]

Analüüsis on kasutatud USB Type-C spetsifikatsiooni [1], mis tuli välja 2019. aasta augustis. Lõputöös keskendutakse USB Type-C võimekusele toite ülekandmisel.

1.1.3 USB Power Delivery standard

Esimene USB Power Delivery (edaspidi USB PD) standard revisioon 1 tuli välja aastal 2012, võimaldades erinevaid võimsuse profiile (Tabel 1.1). Profiil 0 reserveeriti tulevikulahenduste jaoks, kuid seda ei implementeeritud tulevastes versioonides. Mainitud standard kasutas võimsuse edastamiseks standardseid Type-A ja Type-B pistikuid. [10]

Tabel 1.1 USB PD revisioon 1 võimsusprofiilid.

Profiil	5 V	12 V	20 V
0	Reserveeritud		
1	2.0 A, 10 W	N/A	N/A
2		1.5 A, 18 W	
3		3.0 A, 36 W	
4			3.0 A, 60 W
5		5.0 A, 60 W	5.0 A, 100 W

Revisioon 2 [11] tuli välja koos USB 3.1 standardiga [6] ning tutvustas suurema valiku võimsuse profiile (Tabel 1.2). Revisioon kasutab ühendusteks USB Type-C kaablit. Profiilide maksimaalsed võimsused on välja toodud sulgudes.

Tabel 1.2 USB PD revisioon 2 võimsusprofiilid.

Väljundvõimsus (W)	Väljundvoolud (A) vastavate väljundpingete juures:			
	5 V	9 V	15 V	20 V
0.5 – 15	0.1 – 3.0	N/A	N/A	N/A
15 – 27	3.0 (15 W)	1.67 – 3.0	1.8 – 3.0	2.25 – 3.0 3.0 – 5.0
27 – 45		3.0		
45 – 60		(27 W)	3.0	
60 – 100			(45 W)	

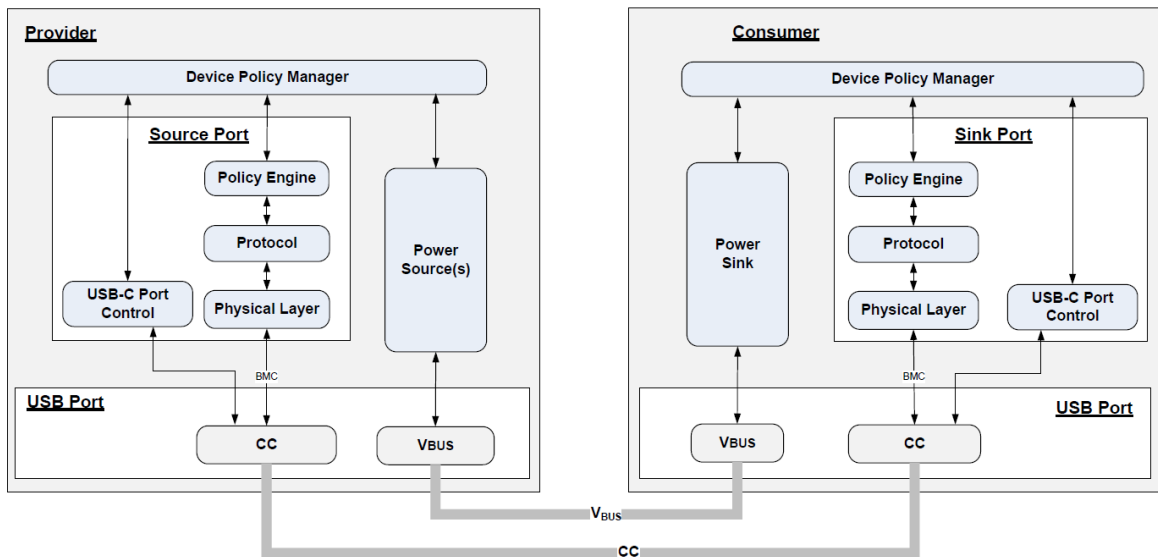
Revisioon 3 [12] lisas standardile võimalusi juurde, võimaldades suhelda toiteploki sellisel viisil, et küsida soovitud pinget 20 mV sammuga ning soovitud voolu 50 mA sammuga. Toetatud on ka rollide vahetus ehk seadmed saavad võimsust üle kanda mõlemas suunas.

1.1.4 USB PD arhitektuur

USB PD standardit [12] toetav seade peab endas sisaldama kommunikatsioonivõimekust omavat mikrokontrollerit, integraallülitust või FPGA'd.

USB-C standardis [9] räägitakse *sink* ja *source* portidest ehk läte ja allikas. Kuigi standard lubab rollide vahetust, keskendub lõputöö allikas ja läte portidele.

USB PD standardit [12] toetava seadme kõrgema taseme süsteemiarhitektuuri võib kujutada loogilise plokk skeemina (Joonis 3). Seadme teadlikkus enda võimekustest ning nõudmistest toimub *Device Policy Manager* (edaspidi DPM) plokis. DPM vahetab *Policy Engine*'iga (edaspidi PE) andmeid võimsuse profiilide kohta. PE suhtleb *Protocol* kihiga. *Protocol Layer* vormistab andmeid PE ning *Physical Layer*'i jaoks. *Physical Layer* teostab andmevahetust üle CC liini. Eelnevalt lihtsustatult kirjeldatud arhitektuuri mõistmine on vajalik USB PD standardit toetava seadme mikrokontrolleri tarkvara kirjutamiseks. CC liinil kasutatakse pinget 3.3 V.

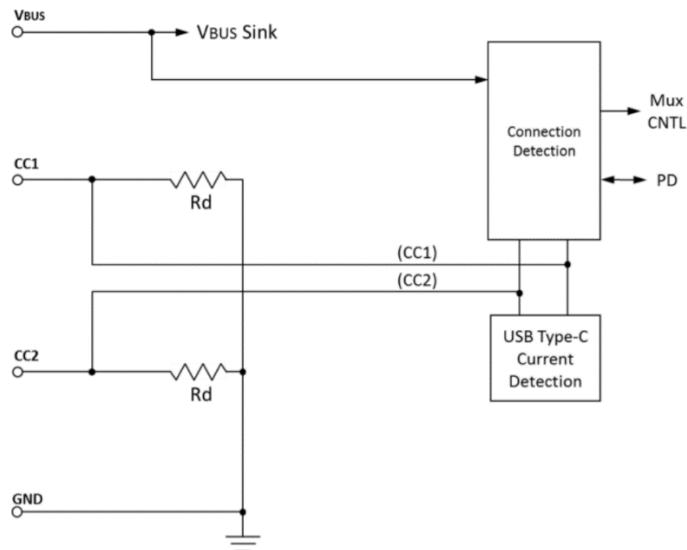


Joonis 3. USB PD kõrgema taseme loogikaskeem. [12]

1.1.5 USB Type-C ühenduse loomine

Läte pordi külge kaabli kinnitamisel avaldab toiteplokk CC klemmidele pinget. Kui CC ning maa vahele ühendatud takistist liigub vool, siis teab allikas, et kaabel on ühendatud. Seejärel avaldab allikas VBUS klemmidele pinget 5 V, mis indikeerib lätele, et kaabel on ühendatud. Peale 5 V indikatsiooni, algab suhtlus seadmete vahel. Kaabli lahti ühendamisel teavad mõlemad pooled eelnevalt nimetatud klemmide olekute järgi, et kaabel on lahti ühendatud. Kuna kaablit on võimalik mõlemat pidi ühendada, siis on seadmetel vaja teada, kuidas kaabel ühendati. Orientatsioon tehakse kindlaks CC klemmide voolude järgi, jälgides kummas CC liinis esineb vool. Seade, mis toimib läte rollis peab vastavalt standardile siduma CC1 ja CC2 signaalid vastu maad, kasutades *pull-down* takisteid. Kui läte on mõlema liini sidunud vastu maad, otsustab allikas kumba liini kasutatakse suhtluseks. [1]

Lihtsustatud standardijärgne [1] USB Type-C ühendus USB PD kontekstis on visualiseeritud joonisel 4. Jooniselt võib märgata ka ploki voolu mõõtmiseks ning ploki ühenduse indikeerimiseks. CC liini voolu mõõtmine on standardijärgselt valikuline. Ühenduse indikeerimise ploki otstarvet võib täita nii mikrokontroller, FPGA kui ka selleks spetsiaalselt disainitud integraallülitus.



Joonis 4. USB-C kaabli ühendusskeem USB PD kontekstis. [1]

1.2 Toiteplakkide testimine

Toiteplakkide näiteks elektromagneetilise ühilduvuse, kasuteguri, stabiilsuse ja muude testide läbiviimine on tootjatele kriitilise tähtsusega. Nõutud kasutegurid vastavalt toiteplaki tüübile on Euroopa Komisjoni regulatsioon 2019/1782 ära defineerinud [13]. Euroopa liidu EMC direktiiv 2014/30/EU [14] seab elektroonikaseadmetele nõuded mitte emiteerida elektromagneetilisi häiringuid ning mitte olla mõjutatud välistest häiringutest. Lisaks on tarvis testida toiteplaki stabiilsust kõigis olukordades, et tuvastada toiteallika häiringuid, võimalikku väljalülitumist või süttimist. Toiteplakkide korrektseks testimiseks on tarvis kõik võimaldatavad sisendpinged, väljundpinged ja väljundvoolud läbi testida.

1.2.1 Testimismetoodika

Firmas, kus lõputööd koostati, viidi teste läbi automatiseeritult. Sõltuvalt testist juhtis testarvuti multimeetreid, ostsilloskoopi, spektroanalüsaatorit, toitemuundurit ning digitaalset koormust kasutades VISA teeke, mis on tööstusstandard mõõteaparaatidega suhtlemiseks. [16] Lisaks juhtis testarvuti termokaamerat ning seadet, mis suhtleb toiteplakiga. Testarvutis suhtleb Python skriptimiskeeles kirjutatud programm nimetatud seadmetega. Vastavalt testi iseloomule on võimalik automatiseerida näiteks sisendpinge, väljundpinge, väljundvoolu ning mõõteaparaatide seadistamisi. Sellisel viisil teste läbi viies on võimalik parandada testide kvaliteeti, täpsust ning automatiseerida testimisprotsessi ja testide tulemuste vormistamist

1.2.2 Kasutuseleolev lahendus

Kuna USB PD standardit toetavad toiteplokid peavad erinevate toiteprofiilide võimaldamiseks suhtlema tarbijaseadmega, siis on tarvis arvuti ja toiteploki vahele testseadet, mis suhtleks mõlemaga.

Firmas, kus lõputööd koostati, kasutati Weltrendi poolt välja töötatud testseadet. Antud seade toetab nii USB PD kui ka Quick Charge tehnoloogiat. Quick Charge tehnoloogia võimaldab analoogselt USB PD standardile küsida toiteploki erinevaid võimsusprofiile. Nimetatud tehnoloogia on disainitud esmalt mobiilsete seadmete laadimiseks. Võrreldes USB PD standardiga on see vähemlevinud tehnoloogia. Testseade kujutab endast mikrokontrolleri plaati, kus ühel küljel on USB micro-B pistik ning teisel küljel on USB Type-C pistik. Seade võimaldab toiteploki küsida erinevaid pinge- ja voolutasemeid. Toiteploki väljund tuleb võtta toiteploki trükkplaadilt otse, kuna antud testseade ei oma väljundi jaoks klemme. Selline lahendus ei pruugi olla igas olukorras soovitud. Pingete küsimisel Python skripti poolt esineb lisakeerukus, kuna lahendusel puudub avatud lähtekood ning käsud tuleb sisestada läbi programmiakna. Sellest mööda saamiseks kasutatakse Pythoni teeki, mis leiab lahtise programmi kuvatud nupud ning salvestab nuppude väärtused mällu. Seejärel valib nende seast soovitud nupu ja vajutab sellele. Kui arvutit kasutatakse testi ajal muul otstarbel, on võimalus, et käsk sisestamata või programm annab veateate. Nimetatud põhjustel ei ole praegune lahendus ideaalne.

1.2.3 Turulolevad seadmed

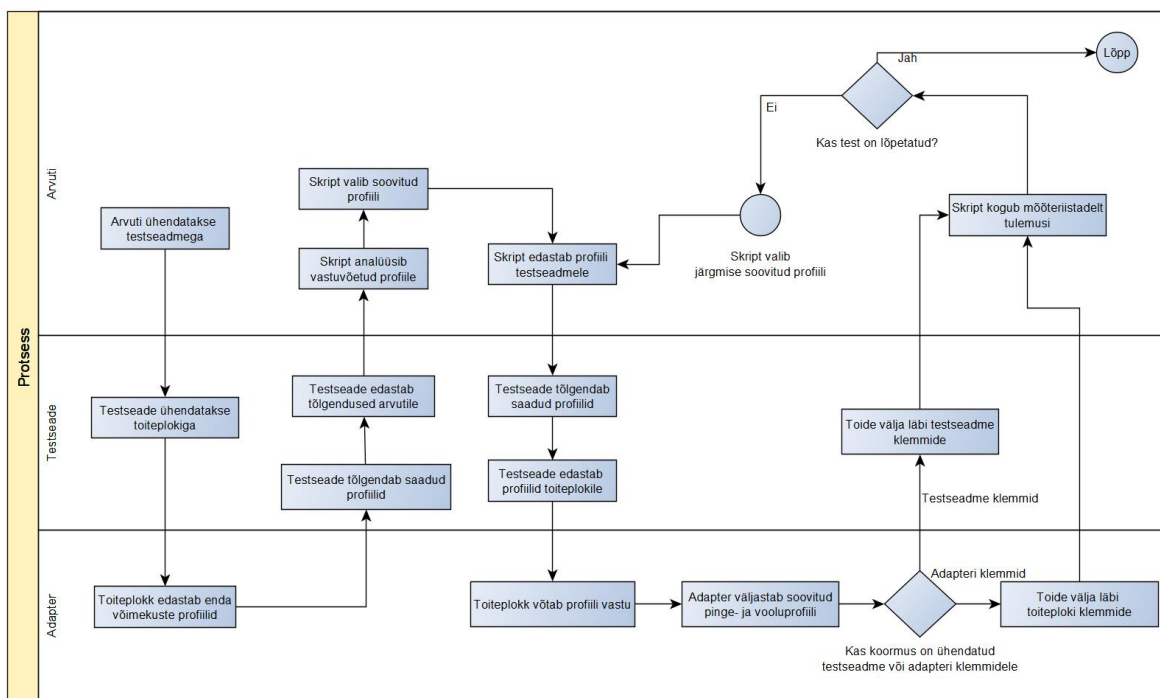
Turul on sarnaselt probleemi lahendavaid seadmeid: USB Power Delivery and Type-C Tester and Analyzer (GRL-USB-PD-C2) [15] (Joonis 5). Seade on disainitud Granite River Labs poolt. See omab sisseehitatud koormust ning omab laia valikut võimalusi USB Type-C standardile vastavuse analüüsimiseks. Seadmel puudub võimalus ühenduda arvuti või mõne muu testimissüsteemiga. See likvideerib võimaluse teste automatiseerida. Seadme kasutuselevõtt kõigest USB PD toiteplokkide testimiseks ei ole majanduslikult optimaalne.



Joonis 5. Granite River Labs USB Power Delivery and Type-C Tester and Analyzer. [15]

2. Testseadme disain

Lõputööga disainiti seade, mis suudab suhelda testarvuti ja toiteploki võimaldades toidet läbi plaadi välja võtta. Testseadme disainimisel lähtuti esiti USB PD ning USB-C standarditest, mis kirjeldavad üksikasjalikult süsteemi elektrilisi ning tarkvaralisi nõudeid. Lihtsustatud testimisprotsessi saab kujutada plokk skeemina (Joonis 6).



Joonis 6. Testimise protsessimudel.

2.1 Nõuded

2.1.1 Standardijärgsed nõuded

USB PD standard [12] määrab lätte rollis olevale seadmele mitmeid nõudeid. Testimise protsessis osaleb testseade toiteploki ehk allika suhtes lätte rollis. Järgnevalt on välja toodud elektrilised nõuded, mis on määratud sellele seadmele. Lisaks on põhjendatud nende kasutusele võtmist.

Esiteks ei tohi lätte rollis olev seade lubada standardijärgsetest vooludest suuremaid voolusid. Lubatud voolupiirangud on kehtestatud USB PD ning USB Type-C standardites [1]. Testseadmele ei ole seda nõuet rakendatud, kuna toiteploki tootjatele on jäetud võimalus katsetada toiteplokkide üle piirtingimuste. Ühtlasi toimub voolu mõõtmine ning piiramine kasutades mõõteaparatuuri ja digitaalset koormust.

Teiseks on nõutud lätte rollis oleva seadme ülepingskaitse [13], et ennetada kahjusid selle tekkimisest. Testseadmel on antud nõue jäetud täitmise kasutajale vabatahtlikuks, et võimaldada testimisel lubatust suuremat pingevahemikku.

Kolmandaks peavad USB Type-C pistiku elektrilised ühendused vastama USB Type-C standardile, mis on eelnevalt ära kirjeldatud.

Nõuded, mis pole siin punktis välja toodud või mida ei ole täidetud, ei ole rakendatud disainitavale testseadmele, sest tegu ei ole tegeliku tarbija seadmega vaid testseadmega.

2.1.2 Funktsionaalsed nõuded

Seadme funktsionaalsed nõuded on töö koostaja poolt testseadmele esitatud nõuded. Kokku töötati testseadme jaoks välja kaheksa peamist nõuet.

Esiteks, ideaalsel testseadmel ei esine kadusid, mistõttu on esimene nõue minimeerida seadmel esinevaid ühendustest tingitud kadusid.

Teiseks, peavad testseadme ja arvuti olema galvaaniliselt eraldatud, et kaitsta arvutit ning testseadet mittesoovitud maavoolude eest.

Kolmandaks peavad olema kõik USB ühendused kaitstud ESD eest vähemalt EVS-EN 61000-4-2:2009 standardis [17] kirjeldatud tase kolm kaitsega. Tase kolm ESD kaitse kaitseb kuni 6 kV kontaktühendusest saadud hetkelisele ESD pingetõusule. Tase kolm on soovitatud lõputöö juhendaja poolt.

Neljandana, peavad seadmel olema indikaator valgusdiodid, et seade oleks kasutajasõbralikum ning et oleks võimalik reaajas näha seadme staatuseid. Valgusdiodid indikeerivad mikrokontrolleri korrapärast töötamist, aktiveeritud võimsusprofiili olemasolu ning veaolukorda.

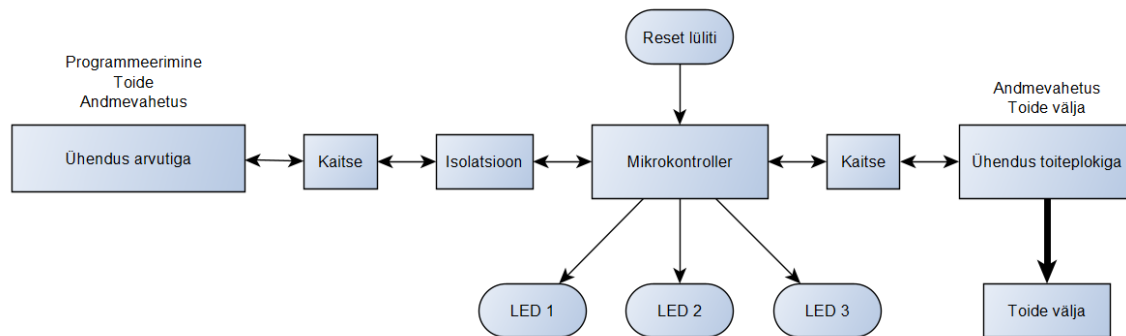
Viiendaks peab seadmel olema reset lüliti, et oleks võimalus mikrokontroller taaskäivitada ilma kaableid lahti ühendamata.

Kuuendaks peab seadmel olema liides programmeerimiseks ning omama trükkplaadil vastava tähistusega laialdaselt kasutatavaid ühendusklemme.

Seitsmendaks peab testseade olema suuteline edastama võimsusprofiilide andmed arvutile ning saama vastu soovitud profiil arvutist. Seda kõike üle USB liidese.

Kaheksandaks peab testseade saama 5 V toidet arvutilt üle USB ühenduse.

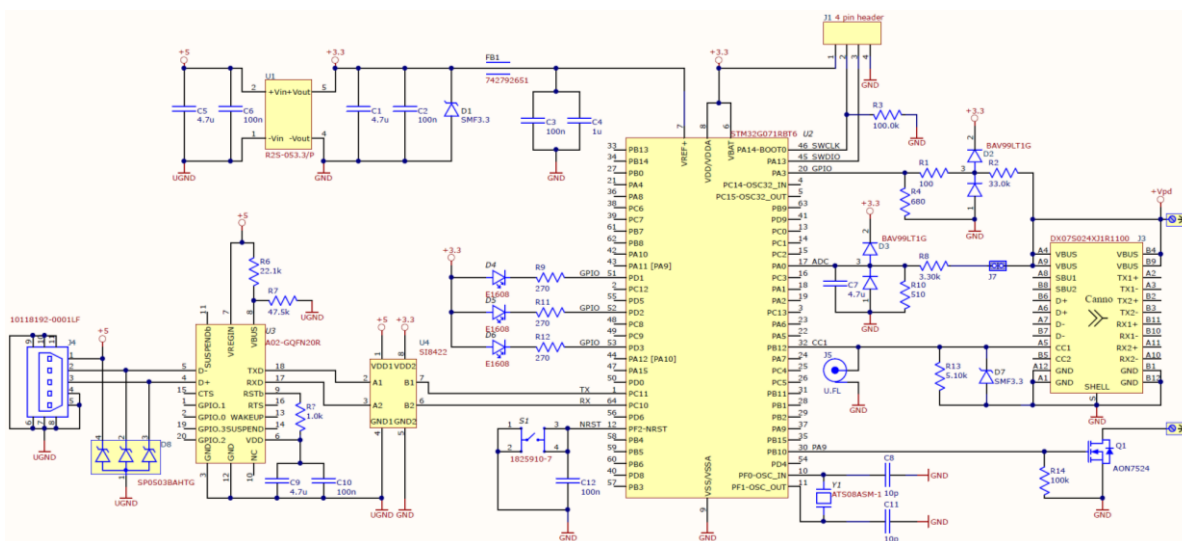
Nõuete visualiseerimiseks koostati kõrgema taseme plokk skeem (Joonis 7).



Joonis 7. Kõrgema taseme süsteemi plokskeem.

2.2 Elektriskeemi koostamine

Lähtudes tööle seatud nõuetest, koostati plaan projekti teostamiseks. Plokskeemi järgi oli võimalik alustada elektriskeemi koostamist (Joonis 8). Elektriskeemi koostati Altium Designeris, kus joonistati sisse komponendid ning nende jooteplatsid, mida on vaja füüsilise trükkplaadi disainimisel. Altium Designer [16] on elektriskeemide ja trükkplaatide disainimise tarkvara ning seda kasutati, kuna antud programm oli kasutusel firmas, kus lõputööd koostati. Skeemi koostamine ning komponentide valimine toimus paralleelselt. Elektriskeemis on kasutatud kahte üksteisest eraldatud maad. UGND tähisega on tähistatud maa, mis on ühenduses testarvutiga ning 5 V pingega. GND tähisega on tähistatud maa, mis on ühenduses 3.3 V pingega ning USB PD toiteploki poolt väljastatud pingega. Käsitsi jootmise mugavdamiseks eelistati takistite, kondensaatorite ja diodide valimisel 603 pakendit või sellele pakendile lähedasi suurusi.



Joonis 8. Täielik elektriskeem.

2.3 Mikrokontroller

Elektriskeemi peamine komponent on mikrokontroller, mille valimisel olid teatud kriteeriumid. Esimene kriteerium on USB PD toiteploki kommunikatsiooni riistvaraline võimekus ning vastavate tarkvara teekide olemasolu.

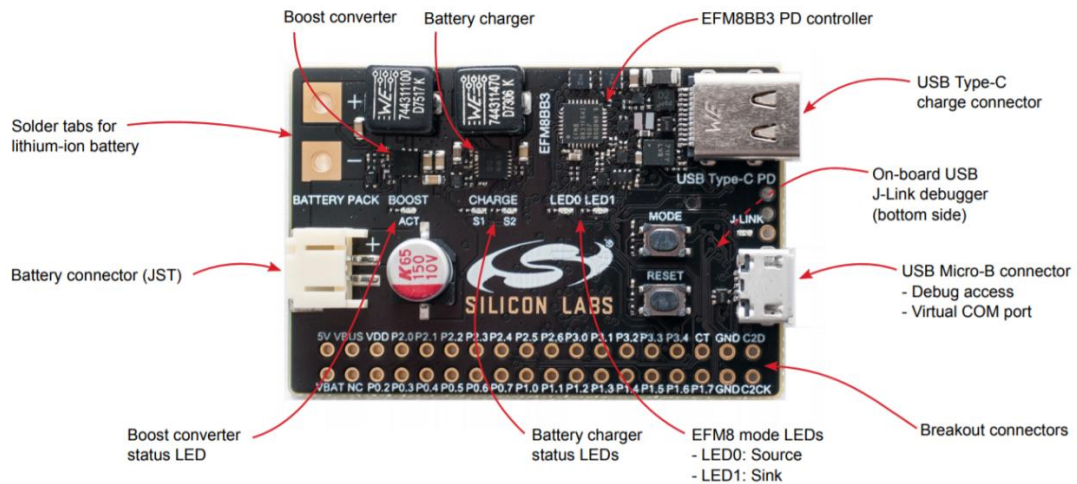
Teine kriteerium on riistvaraline võimekus suhelda arvutiga ning vastavate tarkvara teekide olemasolu.

Kolmas kriteerium on valitud mikrokontrolleri arendusplaadi olemasolu, kus oleks võimalik õppida valitud mikrokontrolleri programmeerimist.

Peamiselt analüüsi kahte turul olevat arendusplaati, kus USB PD on juhitud ühe mikrokontrolleri poolt. Välja on jäetud arendusplaadid, kus USB Type-C pistiku juhtimine ning USB PD suhtlus toimub läbi eraldiseisva mikrokontrolleri või integraallülituse. Otsus sai tehtud, et oleks võimalik anda kasutajale laiendatud ligipääs kõikidele tarkvarakihtidele.

2.3.1 Silicon Labs SLRDK1000A arendusplaat

Esimesena analüüsi Silicon Labs poolt välja töötatud SLRDK1000A arendusplaati [17], mis on turustatud kui USB Type-C PD akulaadija näidisdisain (Joonis 9). Seade võimaldab suhelda arvutiga otse, kasutades COM porti, toetab USB PD funktsionaalsust ning tuleb kaasa Silicon Labs poolt välja töötatud tarkvaraga ning teekidega. Arendusplaadil kasutatav EFM8BB3 Busy Bee mikrokontroller on vähem levinud võrreldes konkurentidega. Seetõttu on ka keerulisem leida abi probleemide lahendamisel. Juhendaja ei olnud antud mikrokontrolleriga kokku puutunud. Nimetatud põhjustel ei otsustatud antud lahenduse kasuks.



Joonis 9. Silicon Labs arendusplaat. [17]

2.3.2 STMicroelectronics STM32G071B-Disco USB-C Discovery kit

Järgnevalt uuriti STMicroelectronics poolt välja töötatud arendusplaati [18] (Joonis 10), mis võimaldab kasutajal analüüsida detailselt kahe USB PD standardit toetava seadme vahelist suhtlust ning ise läbi viia suhtlust toiteploki. Arendusplaat võimaldab suhelda arvutiga läbi COM pordi.

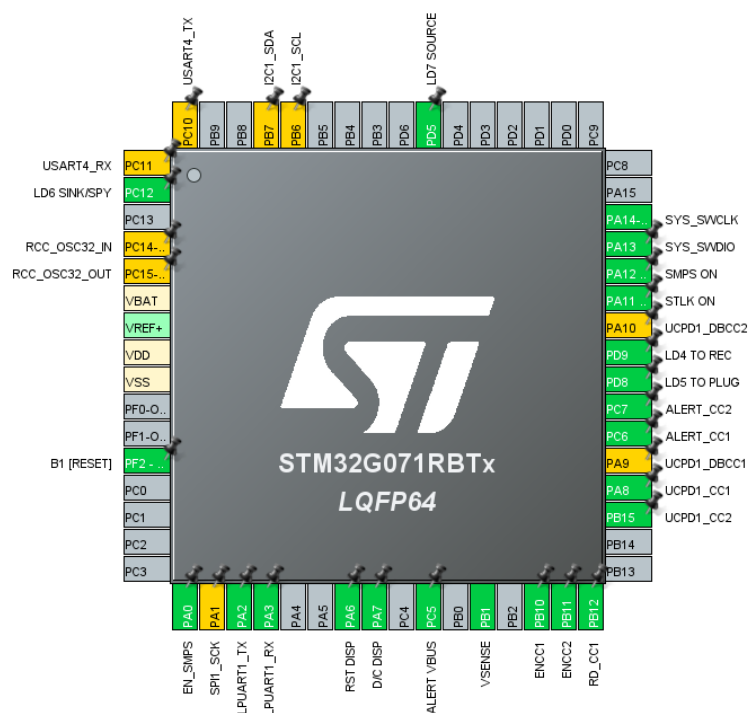


Joonis 10. STM32G071B-Disco USB-C Discovery kit. [18]

See sisaldab mikrokontrollerit STM32G071RxBT, mis juhivad peamisi tööprotsesse. Nimetatud mikrokontroller on 64 klemmine ning on LQFP64 pakendis. Pakend spetsifitseerib mikrokontrolleri klemmide asukohad, arvu ning pakendi suuruse. Arendusplaadi kasutatav ST-LINK integraallülitis korraldab antud mikrokontrolleri ja arvuti vahelist suhtlust ning teostab mikrokontrolleri programmeerimist ning silumist. Ühtlasi on sellel plaadil ka ekraan, millelt saab andmeid otse

lugeda. Lisaks tulevad plaadiga kaasa arendusprotsessi lihtsustavad teegid ja programmid. Kaasa tulevad programmid on STMicroelectronics poolt välja töötatud STM32Cube MX ja STM32CubeMonitor-UCP.

STM32Cube MX [19] on graafiline tööriist, mida kasutatakse STM32 mikrokontrollerite projektide seadistamiseks. Seadistada saab mikrokontrolleri klemmide otstarbeid ja sisendkella seadeid ning projekti saab integreerida STMicroelectronics poolt toetatud teeke. Programmi liides on abiks mikrokontrolleri projekti klemmide asukohtade määramisel, kuna graafiliselt on kujutatud füüsiliste klemmide asukohad mikrokontrolleril (Joonis 11).



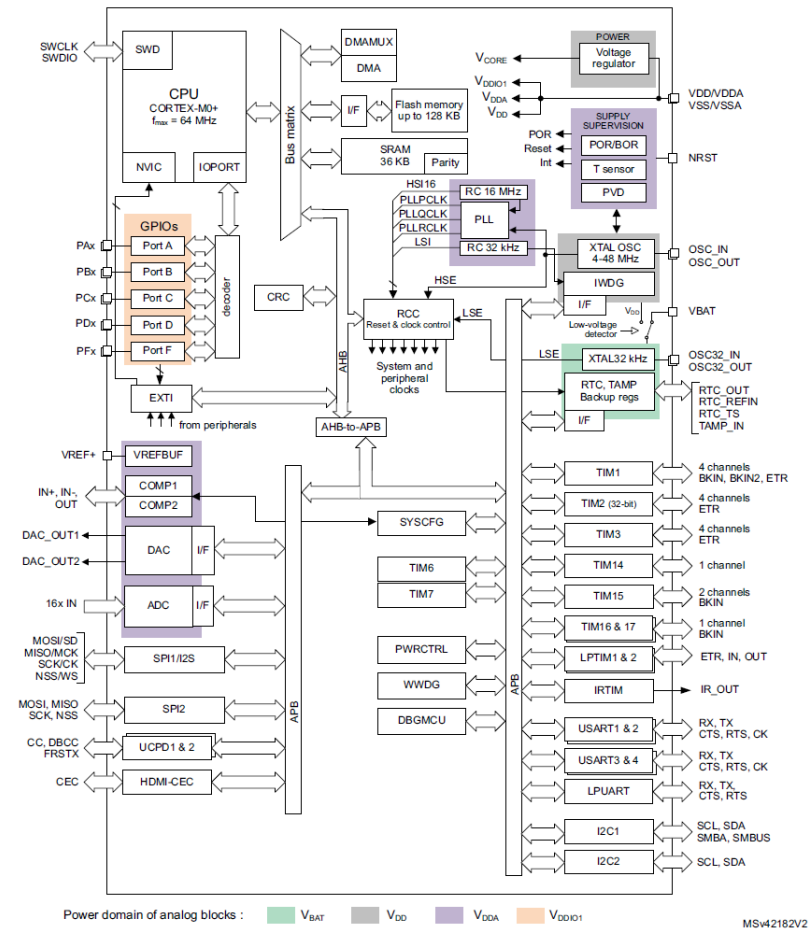
Joonis 11. Klemmide määramine.

STM32CubeMonitor-UCP võimaldab jälgida kahe USB PD standardit toetava seadme vahelist suhtlust üksikasjalikult ning suhelda ühe seadmega läbi programmi kasutajaliidese. Seadmetevahelise suhtluse jälgimine annab parema ettekujutuse USB PD standardil toimiva suhtluse eripäradest. [18]

Nimetatud omaduste alusel sai otsustatud, et see arendusplaat sobib testseadme arenduseks ning teostati täpsem analüüs plaadi mikrokontrolleri kohta.

2.3.3 STM32G071RxT mikrokontroller

64 klemmine STM32G071RxT mikrokontroller (Joonis 11) baseerub ARM Cortex M0+ tuumal toetades sagedusi kuni 64 MHz. [20]



Joonis 12. STM32G071RxT mikrokontrolleri plokskeem. [22]

Testseadme edasiseks planeerimiseks on tarvis võtta arvesse mikrokontrolleri kasutatavad funktsionaalsused, elektrilised nõuded ning piirtingimused.

Mikrokontrolleril on neli toiteklemmi: VDD/VDDA, VBAT, VREF+ ning VSS/VSSA. VDD/VDDA klemm jaotub mikrokontrollerisiselt kaheks. VDD on väline toiteallikas sisemise regulaatori ning alamsüsteemide jaoks. VDD pingevahemik on 2 V kuni 3.6 V. Minimaalne VDD pinge, mille juures mikrokontroller käivitub on 1.7 V. VDDA on analoog toiteallikas analoog-digitaal muundurite, digitaal-analoog muundurite ja komparaatori jaoks. VBAT on tagavara toiteallikas, mida tüüpiliselt kasutatakse lahendustes, kus VDD toide võib katkeda. See on suuteline madalama võimsusega mikrokontrollerit käitama. Kui tagavara toiteallika füüsiline vajadus puudub, on soovitatud ühendada antud klemm kokku VDD/VDDA klemmiga. VBAT pingevahemik on 1.55 V kuni 3.6 V. VREF+ on etalonpinge sisemiste analoog-digitaal ja digitaal-analoog muundurite jaoks. Kui VDDA < 2 V, siis VREF+ peab olema võrdne VDDA väärtusega. Kui VDDA ≥ 2 V, siis VREF+ väärtus peab jääma

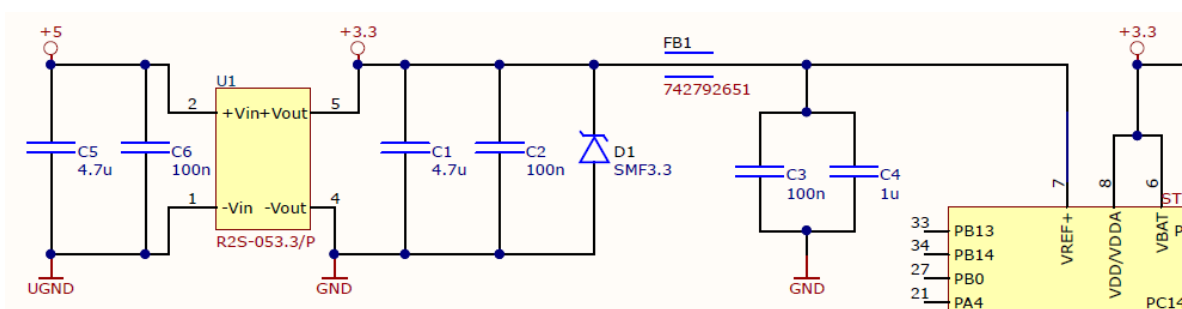
vahemikku 2 V kuni VDDA väärtus. VREF+ klemm võib olla maandatud, kui analoog-digitaal või digitaal-analoog muundureid ei kasutata. VSS/VSSA klemm on maa klemm. Absoluutsed maksimumpinged VDD ja VSS ning VBAT ja VSS vahel on -0.3 V ning 4 V. Maksimaalsed lubatud vool VDD/VDDA klemmist sisse ning VSS/VSSA klemmist välja on 100 mA. [20]

Mikrokontrolleril on 60 kiiret I/O liidest, millest üks toetab pingevahemikku -0.3 V kuni 3.6 V ning lubab sisendvoolu ja väljundvoolu 15 mA. Ülejäänud 59 toetavad -0.3 V kuni 5 V pingel toimivaid rakendusi lubades sisendvoolu 20 mA ja väljundvoolu 15 mA. Kõik I/O liidese klemmid on konfigureeritavad katkestuste jaoks. Veel sisaldab mikrokontroller endas 16 12-bitist analoog-digitaal muundurit töövahemikuga 0 V kuni 3.6 V. Kõikide I/O klemmide summaarsed maksimaalsed sisend- ning väljundvoolud on 80 mA.

Mikrokontroller sisaldab endas nelja USART liidest ning ühte madala voolutarbega UART liidest. Antud mikrokontrolleril on sisseehitatud kaks ostsillaatorit ning see omab toetust ühele madalakiiruselisele 32 kHz sagedusele kalibreeritud ning ühele kõrgekiiruselise 4 MHz kuni 48 MHz sagedusel toimivale välisele kristallostsillaatorile. Üks sisseehitatud ostsillaator töötab sagedusel 16 MHz täpsusega $\pm 1\%$ ning teine töötab sagedusel 32 kHz täpsusega $\pm 5\%$. Mikrokontrolleri maksimaalsed töötemperatuurid on -40 C kuni 105 C. [20]

2.3.4 Toiteskeemid

Mikrokontrolleri toiteskeem (Joonis 13) on koostatud antud mikrokontrolleri optimaalseid ning piirväärtuseid arvesse võttes. Elektriskeemil on välja toodud eelnevalt mainitud mikrokontrolleri toiteklemmid. Antud joonisel ei ole kujutatud VSS/VSSA klemmi.



Joonis 13. Mikrokontrolleri toiteskeem.

Arvutilt USB pistiku kaudu toidetav 5 V sisendpinge muundatakse 3.3 V pingeks, mis jääb lubatud mikrokontrolleri sisendpinge vahemikku. 3.3 V pinge valiti põhjusel, et on levinud toetatud pinge integraallülituste ning mikrokontrolleerite seas.

DC/DC toitemuunduri valimisel arvestati muunduri sisendpinge, väljundpinge ning väljundvoolu väärtustega. Lisaks oli toitemuunduri valimisel tähtis, et see pakuks galvaanilist isolatsiooni. Nõnda on võimalik hoida ära maavoolude tekkimine. See võimaldab testarvutit, testseadet ning mõõteaparatuuri kaitsta. Töö koostaja eelistus oli kasutada SMD ehk pindjoodet toetavaid komponente. Valitud sai Recom Power välja töötatud R2S-053.3 galvaaniliselt isoleeriv toitemuundur (Joonis 14). Antud muundur lubab sisendpinget vahemikus 4.5 V kuni 5.5 V. Väljundpinge 3.3 V täpsus täiskoormusel 25° C töötemperatuuri juures on $\pm 5\%$, ehk võib kõikuda 3.1 V ja 3.5 V vahemikus. Maksimaalne väljundvool on 606 mA. Muunduri ohutu töötemperatuuri vahemik on -40° C kuni 100° C. Isolatsiooni pingetaluvus on 3 kV alalispinget. Toiteploki sisendis on 4.7 μF ja 100 nF kondensaatorid, et parandada 5V toite kvaliteeti. Antud kondensaatorite väärtused pärinevad testseadme jaoks valitud USB ning jadaliidest vahendava integraallülituse dokumentatsioonist. Antud integraallülituse dokumentatsioonis on kirjeldatud soovitatud toiteskeemi väärtused. [22] Toiteploki väljundis on samuti 4.7 μF ja 100 nF kondensaatorid, et parandada 3.3 V toite kvaliteeti. Antud kondensaatorite väärtused pärinevad mikrokontrolleri dokumentatsioonis soovitatud toiteskeemi väärtustest. [20]



Joonis 14. Recom Power R2S-053.3. [22]

Mikrokontrolleri 3.3 V toitesisendi kaitseks kasutati supressordiodi. Supressordiodi valimisel oli oluline jälgida, et tööpinge oleks 3.3 V ning peaks vastu 6 kV kontaktühendusest saadud ESD pingetõusule. Valitud supressordiod SMF3.3 (Joonis 15) on välja töötatud Littelfuse poolt. See töötab pingetasemel 3.3 V pidades vastu kontaktühendusest saadud 30 kV ESD pingetõusule. [23].



Joonis 15. Littelfuse SMF3.3 supressordiod. [23]

VREF+ toitepinge müra filtreerimiseks on kasutatud kombineeritult kondensaatoreid ja ferriiti. Antud kondensaatorite väärtused tulenevad STM32G071B-Disco arendusplaadil sama otstarvet omavatest kondensaatoritest [21]. Ferriit on valitud sarnaste karakteristikutega STM32G071B-Disco arendusplaadil sama funktsiooni omava ferriidiga [24]. Valitud ferriit on väljatöötatud Würth Elektronik poolt. 3.3 V pingetaset on kasutatud ka valgusdioodide, ühe lüliti ning digitaalisolaatori sisendpingeteks.

2.3.5 Ostsillaatori skeem

Kuigi mikrokontroller sisaldab endas kahte ostsillaatorit, siis on testseadme disainis kasutatud välist kristallostsillaatorit. Välised ostsillaatorid on täpsema töösagedusega, mis on testseadme andmevahetuse jaoks vajalik. Ostsillaatori valimisel toetuti ST mikrokontrollerite ostsillaatori disainijuhisele [25].

Soovitud ostsillaatori sagedus oli 8 MHz, kuna sama sagedus oli kasutatud arendusplaadil. Jäädi sama sageduse juurde, et ei peaks olemasolevaid tarkvaraprojekte ümber konfigureerima. Lisaks ei olnud erinevate seadmetega suhtlemiseks tarvis kõrgemat sagedust. Ostsillaatori valimise juures jälgisin, et komponendi jooteplatsid oleksid sobivad ka teiste tootjate ning teistel sagedustel töötavate ostsillaatoritega. Valitud ostsillaator ATS08ASM-1 (Joonis 16) on välja töötatud CTS poolt.



Joonis 16. Ostsillaator ATS08ASM-1. [26]

Ostsillaatori töötemperatuuri vahemik on -20°C kuni $+70^{\circ}\text{C}$. Selle dokumentatsioonist tuleneb nõutud koormamis mahtuvus 20 pF spetsifitseeritud töörežiimi ning sageduse saavutamiseks. Mahtuvuse arvestamisel tuli jälgida ka parasiitmahtuvust, mis esineb trükkplaadil. Selliseid suuruseid ei ole võimalik enne trükkplaadi koostamist arvestada. Kondensaatorid on elektriskeemis valitud nimetatud mahtuvuse järgi (Joonis 17).

Toatemperatuuril on antud ostsillaatori sageduse täpsus ± 50 ppm (*parts per million*). Antud suuruse hertzidesse teisendamine on võimalik valemiga [27]:

$$f_{\text{täpsus}} = \frac{f_{\text{nimi}} \cdot \text{ppm}}{10^6} \quad (1)$$

Kus:

$f_{\text{täpsus}}$ on otsitav ostsillaatori täpsus hertzides,

f_{nimi} on ostsillaatori nimisagedus,

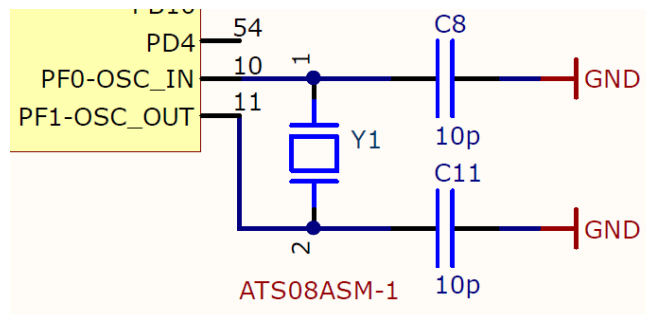
ppm on ostsillaatori täpsus miljondikes.

Valemisse arvudega asendades avaldus ostsillaatori täpsus kui:

$$f_{\text{täpsus}} = \frac{f_{\text{nimi}} \cdot \text{ppm}}{10^6} = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 50}{10^6} = 400 \text{ Hz}$$

Sageduse täpsus on seega ± 400 Hz. [27]

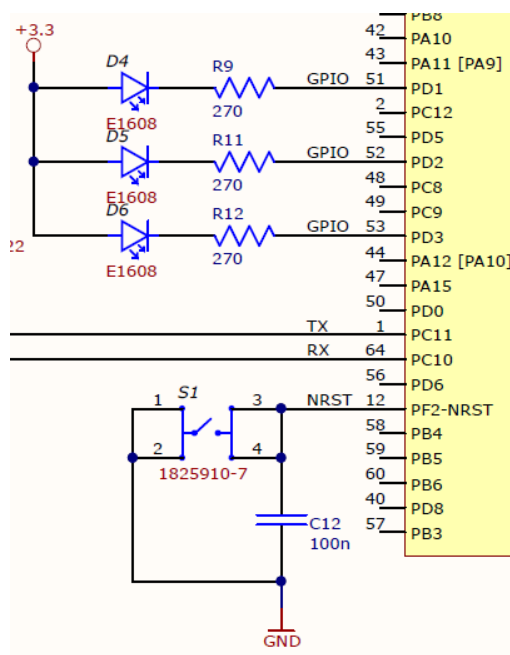
Võrdluseks kõrgesagedusliku integreeritud ostsillaator [28], mis töötab sagedusel 16 MHz täpsusega ± 1 %, on kõikumisega 160 kHz. Ostsillaatorite täpsuste vahe on 400 kordne.



Joonis 17. Ostsillaatori skeem testseadme suhtes.

2.3.6 Lüliti ning valgusdiiodide skeem

Elektriskeem sisaldab lülitit ning kolme valgusdiiodi (Joonis 18).



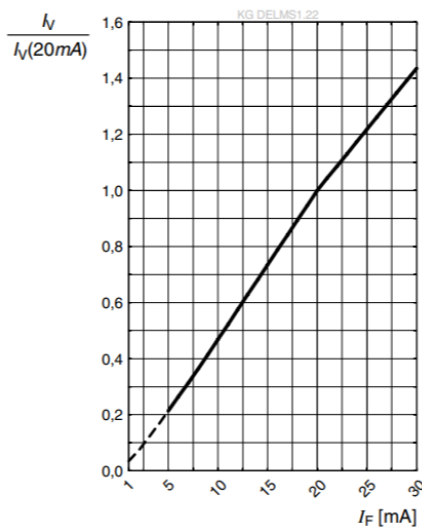
Joonis 18. Lüliti ja valgusdiiodid.

Valgusdiiodide valiku juures tuli jälgida päripinget ja voolu, mille juures valgusdiiod põleb, füüsilisi mõõtmeid, kinnitustüüpi, värvust ning orientatsiooni. Mikrokontrolleri andmetest lähtuvalt on lubatud klemmi sisendvool suurem väljundvoolust. Seetõttu sai valgusdiiodid ühendatud selle sisendisse. Kuna antud mikrokontrolleri klemmi sisendvool ei tohi ületada 20 mA, siis ei tohi valgusdiiodi minimaalne vool, mille juures see põleb, ületada antud voolu. Testplaadi ning mikrokontrolleri tööpingest 3.3 V lähtuvalt ei tohi valgusdiiodi päripingelang antud väärtust ületada. Füüsiliste mõõtmete tingimus oli maksimaalselt 2 mm pikemast küljest, et see võtaks proportsionaalselt teiste komponentidega ruumi. Valitud valgusdiiodi värvus on roheline. Roheline värv ei ole ideaalne valik veateate kuvamiseks, kuid otsus tehti testseadmele komponentide tellimise seisukohast. Nõutud kinnitustüüp oli SMD, ehk trükkplaadi pinnale joodetav. Soovitud orientatsioon oli trükkplaadist risti eemale, et see oleks vaadeldav plaadi kohalt. Testseadme jaoks valiti TOPLED väljatöötatud valgusdiiod E1608 (Joonis 19). Antud valgusdiiodi nimivoolu 20 mA juures on päripingelang 2 V.



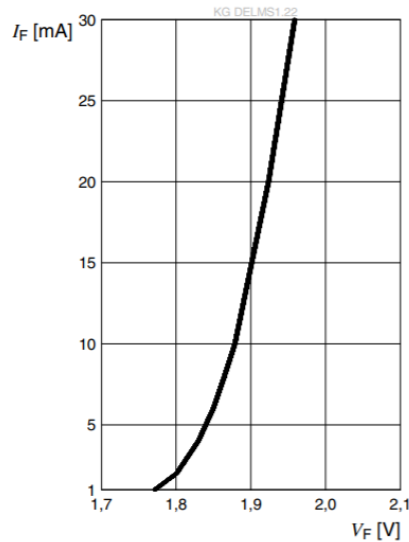
Joonis 19. TOPLED E1608 [29]

Valgusdiodide skeemi jaoks takistite valimise juures võeti arvesse valgusdiodi pingelangu valitud voolu juures. Elektriskeemist võib näha, et valgusdiodide toide tuleb 3.3 V toiteahelast, mitte mikrokontrolleri klemmilt. Kuna mikrokontrolleri I/O klemmi maksimaalne lubatud sisendvool on 20 mA ning kõigi I/O klemmide summaarne lubatud sisendvool on 80 mA, siis sai voolude piiramiseks valitud minimaalne vool, mille juures antud valgusdiod valgust eraldab, ehk 5 mA. Valgusdiodi läbiv vool ning sellele vastav suhteline valgustugevus valiti kasutades antud valgusdiodi dokumentatsioonis välja toodud graafikut (Joonis 20). Komponenti töötemperatuuri vahemik on -40 C kuni 110 C. (viide)



Joonis 20. Valitud valgusdiodi suhteline valgustugevus erinevate voolude juures. [30]

Valgusdiodide takistite valimise juures tuli panna tähele ka valitud voolu juures valgusdiodil esinevat päripingelangu, mis on samuti välja toodud valgusdiodi dokumentatsioonis (Joonis 21).



Joonis 21. Valgusdiodi pingelangud erinevate voolude juures. [30]

Jooniselt väljaloetud pingelang 5 mA voolu juures on ligikaudselt 1.84 V. 3.3 V toitepinge juures on seega pinge peale valgusdiodi 1.46 V. Takisti väärtuse arvutamisel kasutati oomi seadust, mis antud rakenduses avaldub kujul:

$$R_{takisti} = \frac{U_{VCC} - U_{P_LED}}{I_{LED}} \quad (2)$$

Kus:

$R_{takisti}$ on otsitav takisti suurus,

U_{VCC} on skeemi toitepinge,

U_{P_LED} on valgusdiodi päripingelang,

I_{LED} on valgusdiodi vool.

Valemisse arvudega asendades avaldus takisti väärtus kui:

$$R_{takisti} = \frac{3.3 - 1.84}{0.005} = 292 \Omega$$

Kogu elektriskeemi takistite valimisel olid eelistatud E-rea väärtused [31]. Levinud takisti suuruse kasutamine vähendab komponendi ostuhinda. Valitud takisti suurus on 270 Ω , mis annab valgusdiodi voolu väärtuseks 5.4 mA, mis on algselt valitud voolule lähedane suurus.

Lülite valiku juures olid põhilised tingimused füüsiline suurus, kinnituse ning lülituse tüüp ning tööiga. Lüliti suurus valiti kasutajamugavust ning trükkplaadil kasutatavat vaba ruumi arvestades, soovitud mõõtmed ei olnud töö koostaja poolt määratud. Soovitud kinnituse tüüp oli TH, ehk läbi augu kinnitus, kuna nimetatud kinnitusetüüp on mehaaniliselt vastupidavam. Lülituse tüüp peab antud rakenduses olema OFF-MOM, ehk lahti – momendiks kinni. Lüliti on kinni ainult nuppu alla vajutades. Valitud lüliti ALCOSWITCH 1825910-7 (Joonis 22) on välja töötatud TE Connectivity poolt. Antud lüliti tööiga on 100 000 tsükli [31].

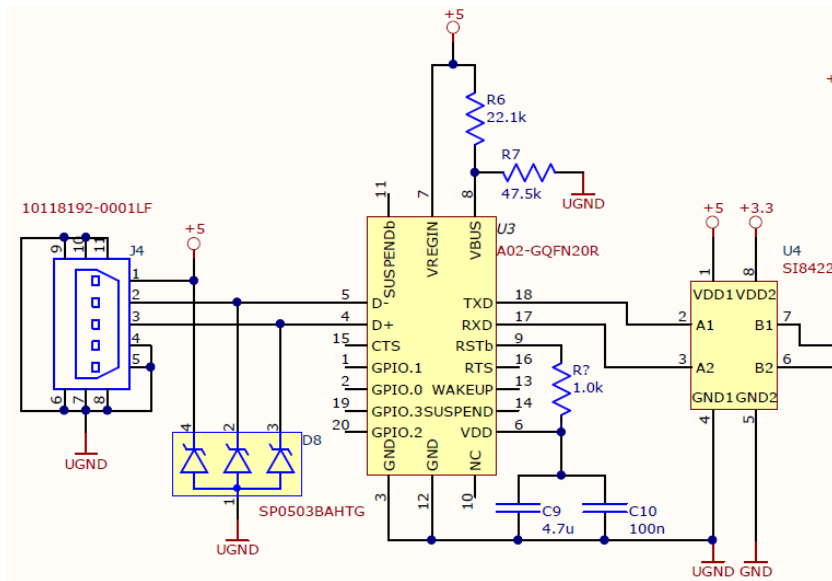


Joonis 22. TE Connectivity ALCOSWITCH 1825910-7 lüliti. [31]

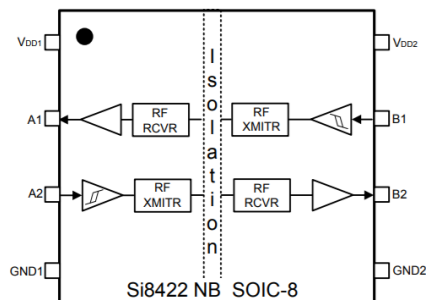
Lüliti S1 toimib *reset* funktsioonis. Kondensaator C12, mis on mikrokontrolleri klemmi ja maa vahel, otstarve on tagada *reset* funktsiooni nõutud ajaline kestus ning tagada klemmi sisemise mahtuvuse tühjaks laadumine. Selle suurus on valitud STM32G071B-Disco elektriskeemi [18] järgi, kuna töös kasutatav mikrokontroller on sama.

2.3.7 Ühendusskeem arvutipoolse USB pistikuga

Mikrokontrolleri arvutiga ühendamise skeemis (Joonis 23) tuli jälgida, et arvuti ja testseade oleksid galvaaniliselt eraldatud. Kui toitele pakub galvaanilist isolatsiooni toitemuundur, siis andmeliinide jaoks kasutati digitaalisolaatorit. Digitaalisolaator võimaldab ühendada andmeliinid üle isolatsioonibarjääri nii, et galvaaniline isolatsioon säilib. Kuna isolaator koosneb kahest transiiverist, millel on mõlemal eraldi toide, siis täidab see lisaks ka antud skeemis signaalinivoo taseme nihutamise ülesannet. Antud rakenduses on 5 V pingel edastatud signaal muundatud 3.3 V pingel edastatavaks signaaliks ning vastupidi. Elektriskeemis on digitaalisolaator märgitud ära tähisega U4. Digitaalisolaatorit valides jälgiti nimetatud omadusi koos komponendi füüsilise suurusega. Valitud komponent SI8422AB-D-IS [32] (Joonis 24) on välja töötatud Silicon Labs poolt. Komponenti tööpinge vahemik on 2.7 V kuni 5.5 V ning töötemperatuuri vahemik on -40°C kuni 124°C . Antud komponenti on võimalik lisada skeemi ilma täiendavate komponentide kasutamisetä.

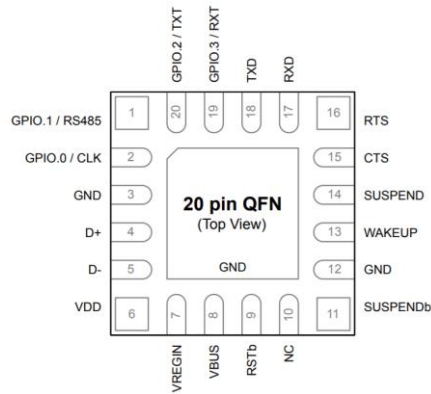


Joonis 20. Mikrokontrolleri ühendus arvutipoolse USB pistikuga.



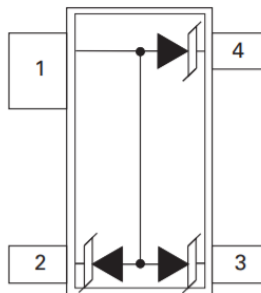
Joonis 24. Digitaalsolaator SI8422AB-D-IS. [32]

Mikrokontroller toetab USART ning UART suhtlust, mitte USB suhtlust. USB suhtlus kasutab differentsiaalsignaale andmeedastuseks ning USART ja UART kasutavad ühte saatmise ja ühte vastuvõtu signaalikanalit. Seetõttu on tarvis differentsiaalsignaale konverteerida ümber TX ja RX signaalideks ja vastupidi. Probleemi lahendamiseks kasutati USB ning jadaliidest vahendavat integraallülitust. Nimetatud komponendi valimisel arvestati komponendi elektrilist sobivust elektriskeemi ning selle füüsilisi mõõtmeid. Valitud komponent CP2102N-A02-GQFN20R [33] (Joonis 25) on välja töötatud Silicon Labs poolt. Nimetatud integraallülituse tootja spetsifikatsioon on kirjeldanud ära üksikasjalikult ühendusskeemi ning takistite ja kondensaatorite väärtused. Antud komponendi töötemperatuuri vahemik on -40°C kuni 85°C .



Joonis 21. Silicon Labs CP2102N-A02-GQFN20R USB-serial integraallülitus [33]

Antud integraallülituse kaitsmiseks ESD eest, kasutati kolme TVS ehk supressordiodi maatriksit. Kaitsedioidide valimisel oli oluline jälgida, et tööpinge oleks 5 V ning peaks vastu 6 kV kontaktühendusest saadud ESD pingetõusule. Jälgitud sai ka komponentide füüsilist suurust, mistõttu sai valik tehtud kaitsedioidide maatriksi kasuks. Kasutatud supressordiodi maatriks SP0503BAHTG (Joonis 26) on väljatootatud Littelfuse poolt. See töötab pingetasemel 5 V pidades vastu kontaktühendusest saadud 30 kV ESD pingetõusule.



Joonis 26. Littelfuse SP0503BAHTG supressordiodi maatriks. [34]

USB pistikutüübiks valiti USB Micro-B, kuna antud ühenduskaablid on turul saadaval.

2.3.8 Programmeerimine ja silumine

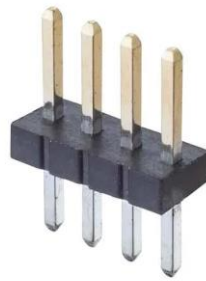
Valitud mikrokontroller ei oma sisemist programmeerimise ja silumise võimekust. See toetab JTAG ning SWD silumismeetodeid.

JTAG ehk Joint Test Action Group on samanimelise grupi poolt välja töötatud standard, mis võimaldab testida mikrokontrollerite ning integraallülituste tööd ning siluda ja programmeerida mikrokontrollereid. See kasutab programmeerimiseks nelja signaaliliini (on olemas ka kahe

signaaliliiniga standard). JTAG kasutamine antud mikrokontrolleriga vajab välist JTAG seadet, mis on ühendatud arvutiga. [35]

SWD ehk Serial Wire Debug on JTAG standardist välja arendatud liides, mis kasutab JTAGiga sama protokollit. SWD kasutades on võimalik mikrokontrollerit programmeerida, siluda ning saata mikrokontrollerist arvutile andmeid. SWD kasutab nelja klemmi: maa, mikrokontrolleri toide, SWDIO ehk andmed sisse-välja ning SWCLK ehk takt. Lihtsustatud elektriliste ühenduste, piisavate võimaluste ning ARM tuumal baseeruvate mikrokontrollerite toetuse tõttu valiti antud otstarbeks SWD liides. [36]

SWD liidese trükkplaadile ühendamiseks valiti nelja klemmiga päis (elektriskeemis tähisega J1) 2,54 mm vahekaugustega. Antud päis on laialdaselt kasutatud mikrokontrolleri plaatidel (Joonis 27).

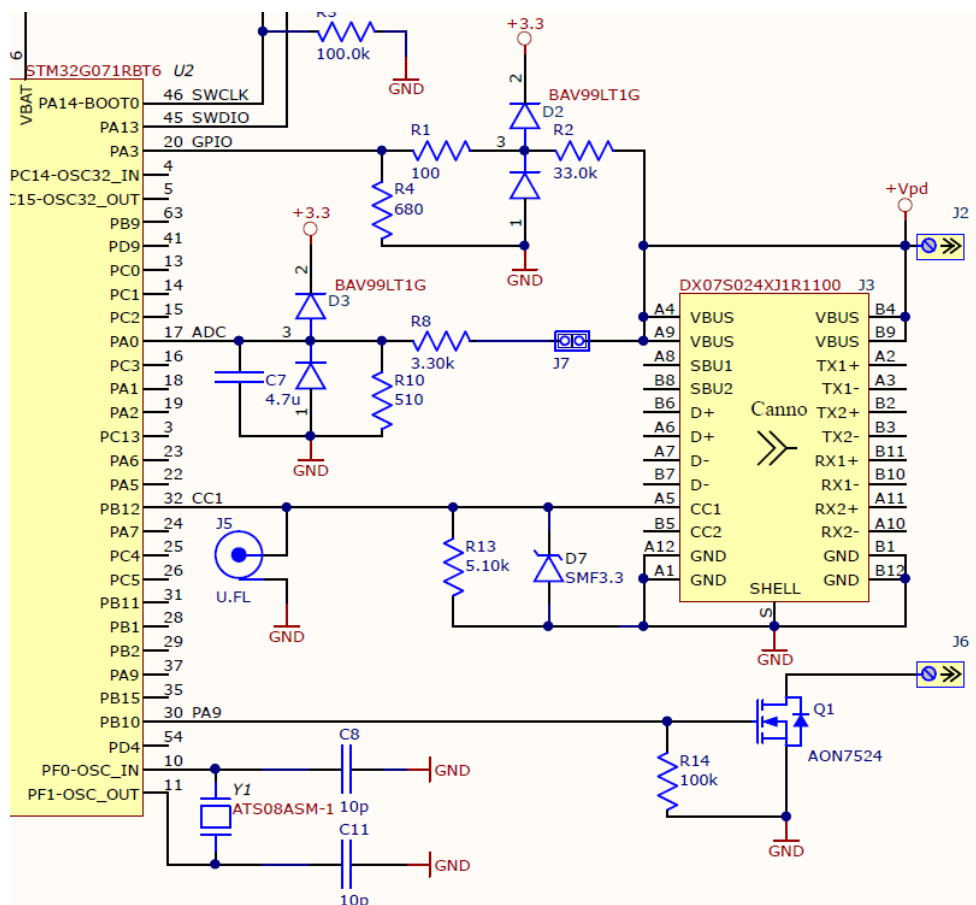


Joonis 27. 2.54 mm vahekaugustega 4 klemmiga päis. [37]

SWD liidese SWCLK klemm on seotud 100 k Ω takistiga maa külge, et hoida PA14-BOOT0 klemmi pinge tavaolukorras madalal. Kui antud klemmi pinge on madalal, töötab mikrokontroller tavatalitluses. Takisti suurus on võetud STM32G071B-Disco arendusplaadil [18] sama otstarvet omava takisti väärtusest.

2.3.9 Mikrokontrolleri ja USB-C pistiku vaheline skeem

USB-C pistiku kaudu toimub andmevahetus toiteploki ja mikrokontrolleri vahel ning toitepinge plaadile toomine (Joonis 28).



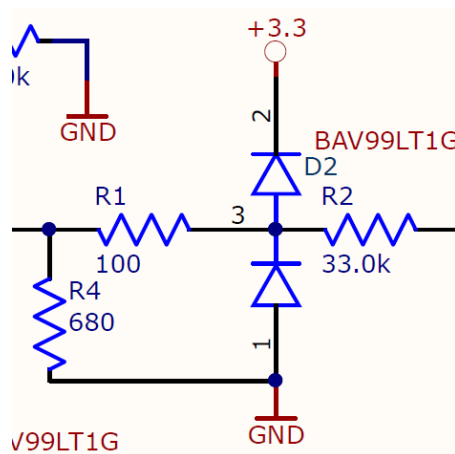
Joonis 28. USB Type-C ühendusskeem.

CC1 liin on üks liin CC paarist. Skeemis kasutakse neist ainult ühte, et testseadme elektriskeemi lihtsustada. Seda, kumb CC liin on kasutuses, määrab toiteploki sisene loogika. Selle küljes on standardjärgselt *pull-down* takisti. Takisti väärtus tuleneb STM32G071B-Disco arendusplaadil [18] kasutatud sama funktsiooniga takisti väärtusest. ESD eest CC1 liinil on kasutatud supressordiodi D7, mis on identne eelnevalt mainitud D1 supressordiodiga. Nii sai otsustatud, kuna komponendi tööpinge ning kontaktühendusest saadud ESD maksimaalne pingetõus on sobivad mõlema skeemiosa jaoks. Antud komponendi pingetõusudele reageerimise kiirus on sobiv ka antud andmevahetuse rakenduse jaoks. CC1 liini küljes on samuti U.FL tüüpi ühendus (Joonis 29), mis võimaldab CC1 liini suhtlust soovi korral jälgida otse ostsilloskoobiga. Ühenduse tüüp on laialdaselt kasutatud firmas, kus töö koostati. Mikrokontrolleri klemm PB12 klemm on konfigureeritud, kui CC suhtluse klemm.



Joonis 29. U.FL ühendus. [35]

Mikrokontrollerile indikeerimiseks, kas ühendus suhtluse läbiviimiseks on loodud või katkenud, on VBUS ühendatud PA3 klemmi külge läbi skeemi (Joonis 30). PA3 klemm on konfigureeritud kui GPIO. Nõnda on võimalik seadistada pinge avaldumisel või puudumisel katkestus. Skeemi eesmärk on langetada VBUS pinge mikrokontrolleri skeemis kasutatavale pingele 3.3 V. Skeemi koostamisel tuli jälgida võimalikke pingeid VBUS klemmil. USB PD standardi järgselt on kasutatav VBUS pingevahemik 3.3 V kuni 21 V. Antud skeemi komponentide suuruste arvutamisel arvestati maksimaalseks pingeks 25 V ning minimaalseks pingeks 3.3 V. Kõrgemate pingete toetuseks on tarvis arvutada uued komponentide väärtused.



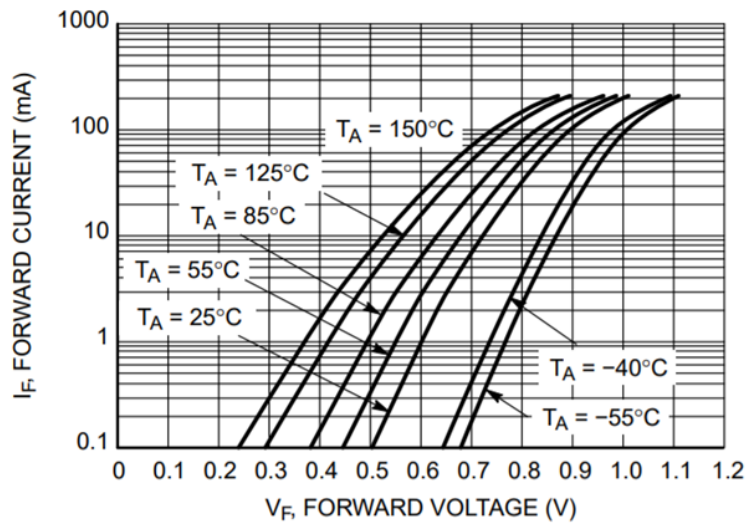
Joonis 30. VBUS ning mikrokontrolleri ühendus 5 V pingele indikeerimiseks.

R2 on voolu piirav takisti. Voolu suurus on valitud võttes arvesse lülitusdiodi pärivoolusid ning päripingeid. Lülitusdiodi (Joonis 31) valimisel oli oluline, et komponendi pingelangud oleksid 3.3 V pingest väiksemad väärtused. Valitud lülitusdiod BAV99L [39] on välja töötatud ON Semiconductor poolt.



Joonis 31. Lülitusdiodi sümbol. [39]

R2 takisti väärtus valiti samuti võttes arvesse lülitusdiiodi minimaalseid päripingeid ja pärioolusid (Joonis 32).



Joonis 32. ON Semiconductor BAV99L lülitusdiiodi päripinged ja pärioolud erinevatel temperatuuridel. [39] Jooniselt loetud nimetatud suurused on 0.1 mA ja 0.5 V. Takisti R2 väärtuse leidmiseks kasutati minimaalset VBUS pinget, et tagada nimetatud GPIO klemmil 3.3 V pinge. Kui antud klemmil ei ole pinget, loeb mikrokontroller seda kaabli eemaldamiseks. Takisti väärtuse arvutamiseks kasutati oomi seadust, mis avaldub antud rakenduses kui:

$$R_2 = \frac{U_{min}}{I_{min}} \tag{3}$$

Kus:

R₂ on otsitav takisti väärtus,

U_{min} on minimaalne kasutatud pinge,

I_{min} on lülitusdiiodi minimaalne päriool.

Valemisse arvud asendades avaldub R₂ väärtus kui:

$$R_2 = \frac{3.3}{0.0001} = 33000 \Omega = 33.0 \text{ k}\Omega$$

R2 takisti väärtust teades on võimalik määrata erinevatele VBUS pingetele vastavad lülitusdiiodide pingelangud. Selleks leiti antud nimetatud pingetele vastavad voolud. Minimaalne vool on eelnevas

arvutuses kasutatud vool. Maksimaalse voolu leidmiseks kasutati oomi seadust, mis avaldub antud rakenduses kui:

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{R_2} \quad (4)$$

Kus:

I_{max} on maksimaalne esinev vool 25 V pingel juures,

U_{max} on rakenduse jaoks valitud maksimaalne pingeline,

R_2 on rakenduses kasutatav takisti.

Valemisse arvud asendades avaldub I_{max} kui:

$$I_{max} = \frac{25}{33000} = 0.000758 \text{ A} = 0.758 \text{ mA}$$

Antud voolu juures on lülitusdiodel esinev pingelang ligikaudu 0.58 V (Joonis 32). Seega on pingelangu vahemik minimaalse ning maksimaalse VBUS pingel juures 0.5 V kuni 0.58 V. Diodi pingelangu tõttu avaldub lülitusdiode klemmile nr 3 (Joonis 30) pingeline kui:

$$U_3 = U_{VCC} + \Delta U_{diode} \quad (5)$$

Kus:

U_3 on lülitusdiode klemm nr. 3 pingeline,

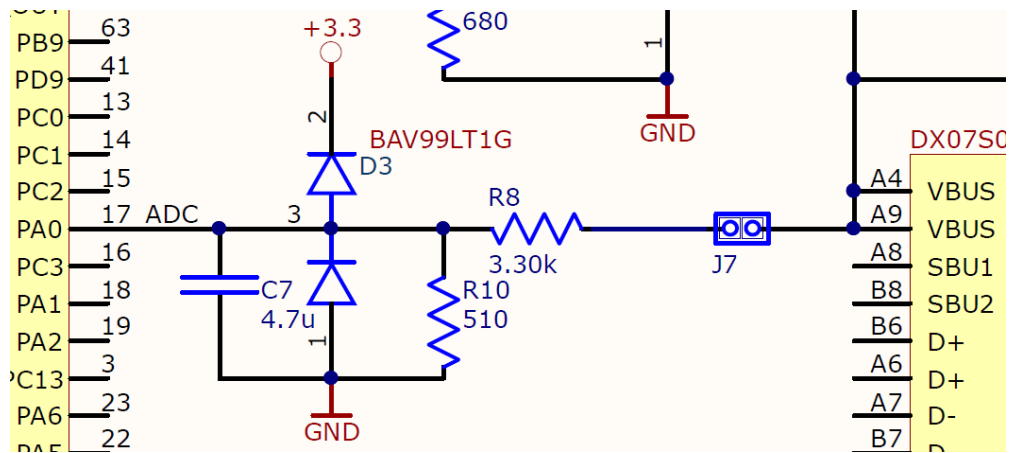
U_{VCC} on skeemi toitepingeline,

ΔU_{diode} on lülitusdiode päripingelang

Seega on antud sõlme pingevahemik 3.8 V kuni 3.88 V. Saavutamaks antud pingevahemiku korral mikrokontrolleri sisendpingeks 3.3 V, kasutati pingelagurit (Joonis 30). Pingelaguri takistite R1 ning R4 suurused valiti vastavalt 100 Ω ja 680 Ω . Antud lahendus hoiab pingeline vahemikus 3.3 V kuni 3.38 V, mis on soovitud piirides.

USB Type-C VBUS klemmi pingeline mõõtmiseks on viimane ühendatud mikrokontrolleri PA0 klemmi külge läbi kaitsva skeemi (Joonis 33). Pingeline mõõtmise peamine eesmärk on indikeerida ülepinget.

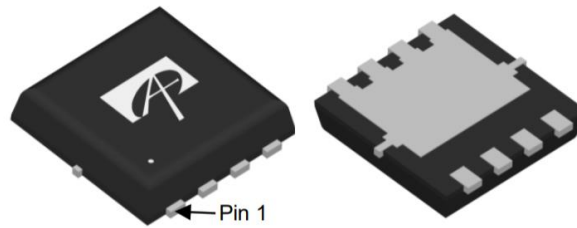
Ülepinge väärtus on kasutaja poolt valitav läbi tarkvara. Selleks on PA0 klemm seadistatud, kui ADC, mis suudab antud skeemi ning komponentide väärtustega mõõta pingeid vahemikus 0 V kuni 25 V.



Joonis 33. VBUS Pinge mõõtmise skeem.

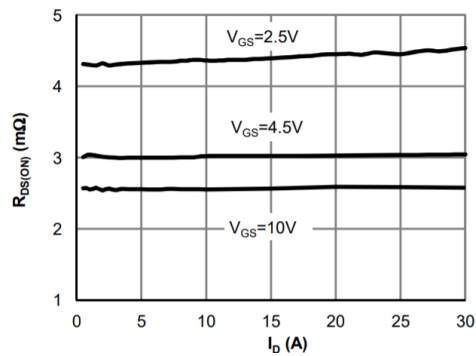
J7 tähisega kujutatud ühendusklemm on ahela lahti või kinni ühendamiseks. See võimaldab kasutajal jätta nimetatud funktsionaalsus kasutamata. Pingejagur takistitega R8 ja R10 piirab 25 V pinge 3.34 V pingeni. See tähendab, et 0 V kuni 25 V pingele vastab 0 V kuni 3.34 V pinge analoog digitaal muunduris. Eelmise skeemiga analoogselt on kasutatud samu lülitusdiode pingetaseme hoidmiseks. Kondensaator C7 tõstab analoog-digitaal muunduri täpsust ja töökindlust hoides pinge liinil stabiilsemana.

Testseadmel on võimekus avada ning sulgeda USB PD toiteploki väljundvooluahelat. Selleks on kasutatud MOSFETi. MOSFETi valimisel oli vajalik jälgida paisu pinget, maksimaalset lätte ja neelu vahelist pinget, lubatud võimsust ning avatud oleku takistust. Antud komponent valiti olemasolevate MOSFETide seast firmas, kus töö koostati. MOSFET on skeemil tähistatud tähisega Q1. MOSFETi pais on ühendatud mikrokontrolleri PB10 klemmi külge, mis on konfigureeritud kui GPIO väljund. Pais on ühtlasi *pull-down* takistiga seotud vastu maad, et vältida ebasoovitav avanemisi. *Pull-down* takisti väärtus tuleneb STM32G071B-Disco arendusplaadil [18] sama otstarvet omava takisti väärtusest. Valitud MOSFET AON7524 (Joonis 34) on Alpha & Omega Semiconductor väljatöötatud komponent.



Joonis 34. Alpha & Omega Semiconductor AON7524 MOSFET. [36]

MOSFET peab suletud olekus vastu pingele 30 V. See avaneb väga madala paisu pingega 2.5 V. Antud komponent sobib testplaadil kasutatava 3.3 V pingetasemega. Avatud oleku takistus on paremini kujutatav graafikuna (Joonis 35). Jooniselt võib lugeda 3.3 V V_{GS} juures komponendi takistuseks ligikaudu 4 m Ω . [36]

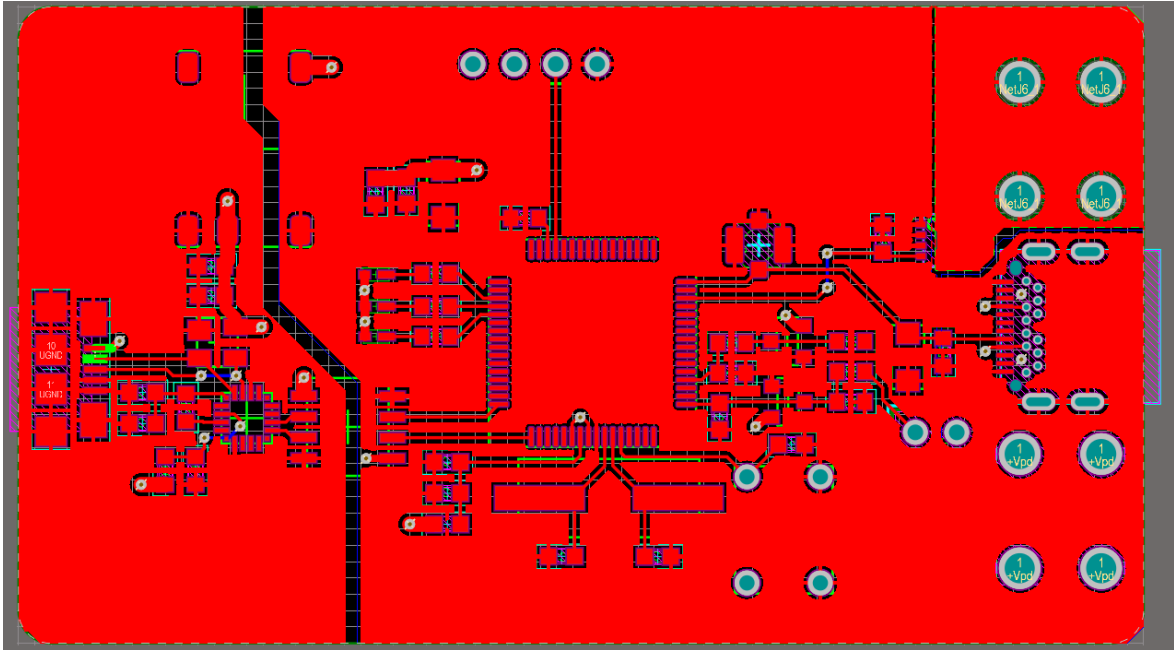


Joonis 22. MOSFETi paisu pingetase ja avatud oleku takistused [36]

USB-C pistikuks on valitud komponent, mis on kasutusel firmas, kus töö koostati.

2.4 Trükkplaadi disain

Trükkplaadi disainimisel (Joonis 36) lähtuti USB Type-C pistiku ning väljundklemmide vaheliste kadude minimeerimisest, mikrokontrolleri töökindlusest ning kasutajaliidese mugavusest.



Joonis 36. Testseadme trükkplaadi disainiprotsess.

Trükkplaadil on kolm erineva pingetasemega planaari: 3.3 V, 5 V ning USB PD toiteploki väljundpinge. Lisaks on kaks eraldiseisvat maa planaari: 5 V pingeploaariiga seotud UGND ning ülejäänud kahe planaari jaoks GND. Kahekihilise trükkplaadi mõõtmed on 39 mm laiust, 69 mm pikkust ning 0.45 mm paksust.

Disainimist alustati mikrokontrolleri lähedalt ning liiguti väljapoole. USB micro-B ja USB Type-C pistikud asuvad plaadi eri otsades. Toiteploki väljudi klemmid asuvad USB Type-C pistiku kõrval, et vähendada radade pikkusi minimeerides kadusid. Toiteploki väljundvoolu ahela avab MOSFET, mis on paigutatud klemmide lähedale. Reset lüliti asub mikrokontrolleri NRST klemmi lähedal. Plaadi servas asub SWD liidese jaoks 4 klemmiga päis koos vastavate klemmide tähistustega. Valgusdiodide asetus on mikrokontrolleri küljel. Integraallülituste paigutuse juures arvestati eelkõige radade pikkuste ning *via*'de arvu minimeerimist. Ostsillaator koos kondensaatoritega on paigutatud võimalikult lähedale mikrokontrollerile, et minimeerida parasiitmahtuvust. Ostsillaatori radade parasiitmahtuvuse võib arvutada valemiga [43]:

$$C_{\text{parasiit}} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{dielektrik}} \cdot \frac{S_{\text{rajad}}}{d_{\text{dielektrik}}} \quad (6)$$

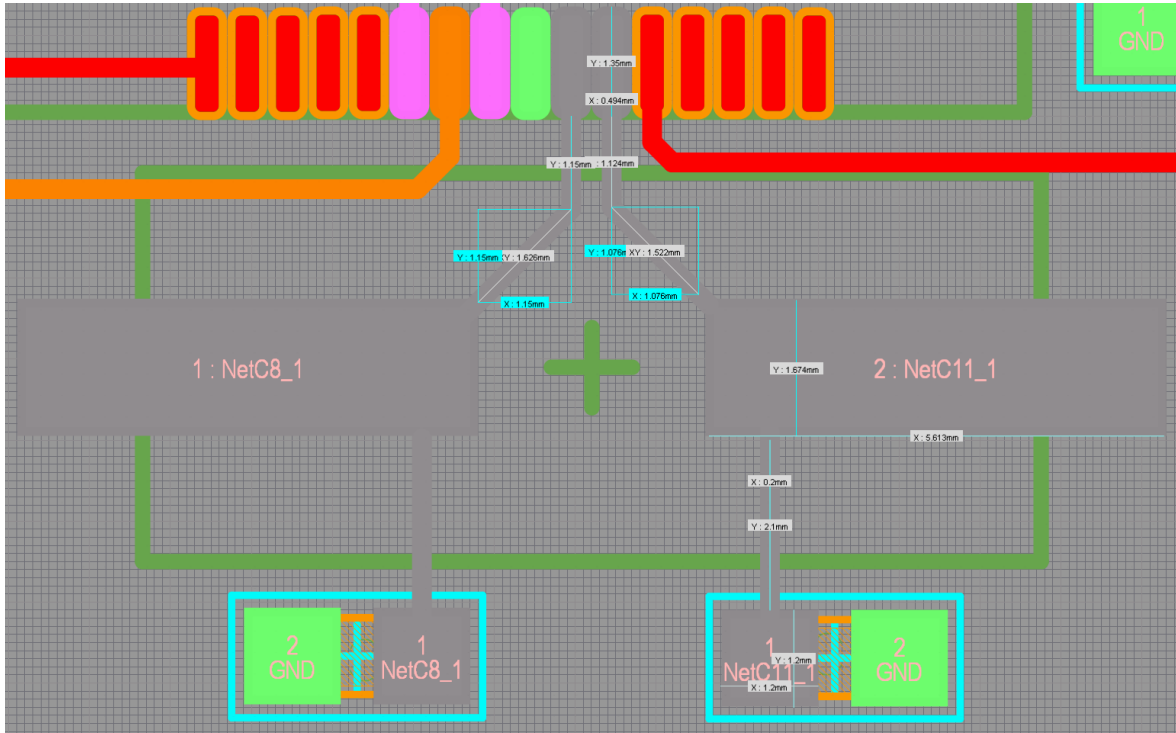
Kus:

ϵ_0 on vaakumi dielektriline läbitavus, mis on ligikaudu $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m [44],

$\epsilon_{\text{dielektrik}}$ on trükkplaadis kasutatava dielektriku R-1650V dielektriline läbitavus 4.4 F/m [45],

$d_{\text{dielektrik}}$, ehk dielektriku paksus $d_{\text{dielektrik}}$ on 0.32 mm ehk $0.32 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. See tuleb välja Altiumi projekti disainidokumendist.

S_{rajad} on radade pindala, mille leidmiseks on võimalik trükkplaadi pealt mõõta ühenduste füüsilised mõõtmed. (Joonis 37). Arvutatud radade ja jooteplatside kogupindala on ligikaudu 27.57 mm^2 ehk $2.757 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$.



Joonis 37. Ostsillaatori radade ja jooteplatside pindala leidmine.

Valemisse arvud asendades avaldub parasiitmahtuvus kui:

$$C_{\text{parasiit}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 4.4 \cdot \frac{2.757 \cdot 10^{-5}}{0.32 \cdot 10^{-3}} = 3.36 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

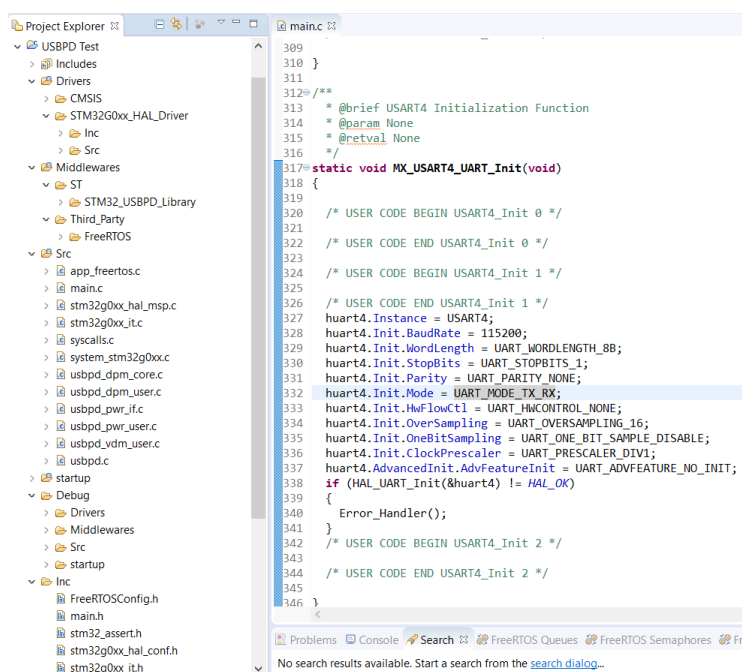
Kasutatud nimetatud valemit ning leitud arvused saadi parasiitmahtuvuse väärtuseks $3.36 \cdot 10^{-12} \text{ F}$ ehk 3.36 pF . Soovitud ostsillaatori töörežiimi saavutamiseks peab selle mahtuvus vastu maad olema 20 pF [30]. Valitud kondensaatoreid kogumahtuvus on 20 pF . Seega on tarvis ostsillaatori ideaalseks töötamiseks 8.32 pF kondensaatoreid. Kuna antud suurusega kondensaatoreid ei ole laialdaselt saadaval, siis annab lähedase tulemuse ka 8 pF kondensaatoreid.

Seadme töötemperatuuri vahemik on -20° C kuni 70° C . Töötemperatuuri vahemiku määrab temperatuurile kõige tundlikum komponent, mis on siinkohal ostsillaator. Töötemperatuuri muutumisel tuleb arvestada vigade tõenäosuse kasvuga, sest ostsillaator kaotab täpsust temperatuuri muutudes.

2.5 Testimine

Seadme testimiseks on valminud mikrokontrolleri tarkvaraprojekt. Tarkvara projekt alustati STM32Cube MX tarkvaraga vajalike teekide ning seadete inicialiseerimisega. Projekt kirjutati C keeles kasutades eelnevalt mainitud Atollic Truostudio tarkvara.

Kui testseadme täielikku funktsionaalsust võimaldab tarkvara kasutab FreeRTOS teeki, mis võimaldab USB PD adapteri kommunikatsioone ajastada standardijärgselt, siis testseadme esialgse testimise jaoks kasutatakse lihtsustatud tarkvara ilma antud teegita. FreeRTOS on vabavaraline reaallaja operatsioonisüsteem disainitud spetsiaalselt mikrokontroleritel kasutamiseks [46]. Testimiseks vajaliku tarkvara projekt koosneb mitmetest programmifailidest (Joonis 38)



```
309 }
310 }
311
312 /**
313  * @brief USART4 Initialization Function
314  * @param None
315  * @retval None
316  */
317 static void MX_USART4_UART_Init(void)
318 {
319
320 /* USER CODE BEGIN USART4_Init 0 */
321
322 /* USER CODE END USART4_Init 0 */
323
324 /* USER CODE BEGIN USART4_Init 1 */
325
326 /* USER CODE END USART4_Init 1 */
327 huart4.Instance = USART4;
328 huart4.Init.BaudRate = 115200;
329 huart4.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
330 huart4.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
331 huart4.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
332 huart4.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
333 huart4.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
334 huart4.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
335 huart4.Init.OneBitSampling = UART_ONE_BIT_SAMPLE_DISABLE;
336 huart4.Init.ClockPrescaler = UART_PRESCALER_DIV1;
337 huart4.AdvancedInit.AdvFeatureInit = UART_ADVFEATURE_NO_INIT;
338 if (HAL_UART_Init(&huart4) != HAL_OK)
339 {
340     Error_Handler();
341 }
342 /* USER CODE BEGIN USART4_Init 2 */
343
344 /* USER CODE END USART4_Init 2 */
345
346 }
```

Joonis 38. Testseadme testimiseks vajalik tarkvaraprojekt.

Lõputööga valminud tarkvara on võimeline testima, kas mikrokontroller töötab. Testtarkvaraga tehakse kindlaks ühenduse toimimine arvutiga ning valgusdiodide, lüliti ning pingemõõtmise toimimine. Arenduse skoobist jäi välja toiteploki ja testseadme vahelise suhtluse realiseerimine antud tarkvaraprojektis.

KOKKUVÕTE

Lõputööga loodi testseade, mis suhtleb USB PD toiteploki ja arvutiga võimaldades toiteühendust disainitud seadmelt. Turul oli vähe seadmeid, millel on nimetatud funktsionaalsus. Selles tulenevalt oligi lõputöö eesmärk luua testseade, mis keskendub USB PD toiteplokkide testimisele.

Testseadme nõuded lähtusid eelkõige USB standardi dokumentatsioonist, mikrokontrolleri piirangutest ning lõputöö autori poolt seatud funktsionaalsuse nõuetest. Lisaks tööriistadest, mis olid firmas, kus lõputööd sooritati, eelnevalt kasutusel. Peamised autoripoolsed funktsionaalsed nõuded olid, et seadme kaod oleksid minimaalsed ning et oleks tagatud testarvuti ning seadme ohutus.

19 nädala jooksul valmis USB standardite analüüs, komponentide analüüs, elektriskeem, trükkplaadi koostamine ning algne kood seadme testimiseks. USB standardite analüüsiga keskenduti peamiselt USB Type-C ühendustele, sest selle kasutusvaldkonnad kasvavad. Komponentide analüüsis käsitleti erinevaid tehnoloogiaid ning valiti trükkplaadile kõige optimaalsemad elemendid. Valimisel lähtuti nende laialdusest saadavusest, jooteprotsi ristkasutatavusest teiste komponentidega ning elektrilisest sobivusest. Elektriskeem loodi kasutades Altiumit, et visualiseerida, dokumenteerida ning koostada trükkplaat. Sellel on välja toodud mikrokontroller ning selle ühendused USB PD toiteploki, SWD klemmide ja arvutiga. Trükkplaadi disainimisel paigutati komponendid trükkplaadil selliselt, et säästa ruumi, tagada töökindlus ning minimeerida USB PD toiteploki ülekande kadusid. Töö käigus täideti kõiki nõuded.

Lõputöö protsessis esinesid mõned kitsaskohad. Programmi Altium tundma õppimise peale kulus oodatust rohkem aega, mistõttu lükkusid töö tähtajad edasi. Teiseks oli suure mikrokontrolleri tarkvaraprojekt enda mahu poolest suurem ning keerukam kui algselt paistis. Siiski osutusid need kõige arendavamaks ning õpiti palju mikrokontrollerite, standardite ning nõuete kohta. Viimaseks kitsaskohaks osutus trükkplaadi tellimise viibimine, mistõttu ei ole olnud võimalik füüsilist plaati testida. Tuleviku testseadme versioonidele arendatakse juurde võimalus programmeerida üle USB ning kuvada andmeid testseadmelt oleval ekraanil.

SUMMARY

With this thesis, a test device was made, which allows for the communication of a USB PD adapter and the computer, enabling to extract the statement of power/capacity from the designed device.

Previously, there was very few devices on the market with said functionality. Therefore, the aim of this thesis became to design a test device that focuses on testing the USB PD adapters.

The test device's requirements were primarily based on the USB Specification, the limitations of the microcontroller and the functionality requirements set by the author. Additionally, by the tools that were used in the company were this thesis was completed. The main functional requirements by the author were, that the device's losses would be minimal, the functionality would be optimal and that the safety of the test device and computer would be ensured.

An analysis of USB standards and components, electrical schema, circuit board design and software for testing the device were completed within 19 weeks. With said analysis of USB standards, the main focus was on USB Type-C connections, because of its increasing areas of use. With the component analysis, different technologies were considered and the most favorable were selected. The selection was based on their wide availability, interoperability of the footprint with the other components and the electrical compatibility. The electrical schema was created using Altium, to visualise, document and design a circuit board. It contains a microcontroller and its connections to the USB PD adapter, SWD pins and the computer. With the design of the circuit board, the components were placed on the board to save space, ensure reliability and minimise the losses from the USB PD adapter transmissions. During this process, all requirements were met.

During the process there were some shortcomings. Firstly, getting to know the Altium software took longer than expected, which delayed the deadlines. Secondly, the large microcontroller software project's capacity was bigger and more complex than it originally appeared. Still, these two proved to be the most useful for learning about microcontrollers, standards and requirements. The last shortcoming was the delay in the order of the circuit board, which prevented the physical board from being tested. In the future, the test device will have a functionality to programme over USB and to display data on a screen on the device.

3. Kasutatud kirjandus

- [1] USB 3.0 Promoter Group, „Universal Serial Bus Type-C Cable and Connector Specification,“ August 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type-C%20Spec%20R2.0%20-%20August%202019.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [2] A. Rogers, „Microchip Technology Inc,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00001953a.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [3] Compaq Computer Corporation, Digital Equipment Corporation, IBM PC Company, Intel Corporation, Microsoft Corporation, NEC, Northern Telecom, „Universal Serial Bus Specification,“ 15 Jaanuar 1996. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://fl.hw.cz/docs/usb/usb10doc.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [4] Compaq Computer Corporation, Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, Lucent Technologies Inc, Microsoft Corporation, NEC Corporation, Koninklijke Philips Electronics N.V., „Universal Serial Bus Specification,“ 27 Aprill 2000. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.usb.org/documents>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [5] Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, Microsoft Corporation, NEC Corporation, ST-NXP Wireless, Texas Instruments, „Universal Serial Bus 3.0 Specification,“ 12 November 2008. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.usb3.com/whitepapers/USB%203%200%20\(11132008\)-final.pdf](https://www.usb3.com/whitepapers/USB%203%200%20(11132008)-final.pdf). [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [6] Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, Microsoft Corporation, Renesas Corporation, ST-Ericsson, Texas Instruments, „Universal Serial Bus 3.1 Specification,“ 26 Juuli 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.usb.org/documents>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [7] Apple Inc, Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, Microsoft Corporation, Renesas Corporation, STMicroelectronics, Texas Instruments, „Universal Serial Bus 3.2 Specification,“ 22 September 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.usb.org/document-library/usb-32-specification-released-september-22-2017-and-ecns>. [Kasutatud 18 Mai 2020].

- [8] Apple Inc, Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, Micorsoft Corporation, Renesas Corporation, STMicroelectronics, Texas Instruments, „Universal Serial Bus 4 Specification,“ August 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.usb.org/document-library/usb4tm-specification>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [9] USB 3.0 Promoter Group, „Universal Serial Bus Type-C Cable and Connector Specification,“ 11 August 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.those.ch/designtechnik/wp-content/uploads/2014/08/USB-Type-C-Specification-Release-1.0.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [10] USB-IF, *USB Power Delivery revision 1.0*, USB-IF, 2014.
- [11] USB-IF, „Universal Serial Bus Power Delivery Specification,“ 11 August 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.usb.org/documents>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [12] USB-IF, „Universal Serial Bus Power Delivery Specification,“ 7 Veebruar 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.usb.org/documents>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [13] Euroopa Komisjon, „KOMISJONI MÄÄRUS (EL) 2019/1782,“ *Euroopa Liidu Teataja*, p. II LISA, 2019.
- [14] E. P. j. E. L. Nõukogu, „EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2014/30/EL,“ *Euroopa Liidu Teataja*, 2014.
- [15] Granite River Labs, „USB Power Delivery and Type-C® Tester and Analyzer (GRL-USB-PD-C2),“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://graniteriverlabs.com/usb-pd-c2/>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [16] Altium, „Altium Designer,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.altium.com/altium-designer/>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [17] Silicon Labs, „UG296: USB Type-C Rechargeable Battery,“ 1 September 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug296-brd5203a-user-guide.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [18] STMicroelectronics, „STM32G071B-DISCO USB-C Discovery kit,“ Aprill 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00595951-stm32g071bdisco-usbc-discovery-kit-stmicroelectronics.pdf. [Kasutatud 18 Mai 2020].

- [19] STMicroelectronics, „STM32CubeMX,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [20] STMicrocontroller, „STM32G071x8/xB,“ Märts 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g071c8.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [21] STMicroelectronics, „STM32G071x8/xB,“ 2018. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [22] Recom-power, „2 Watt SMD Single & Dual Output,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://recom-power.com/pdf/Econoline/R2S_R2D.pdf. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [23] Littelfuse, „TVS Diodes,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/tvs_diodes/littelfuse_tvs_diode_smf3_3_datasheet.pdf. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [24] Würth Elektronik, „WE-CBF SMT EMI Suppression,“ 28 August 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.we-online.de/katalog/datasheet/742792651.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [25] STMicroelectronics, „Oscillator design guide for ST microcontrollers,“ Märts 2011. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.emcu.it/DOC-Digitale-Generale/AN2867%20Oscillator%20design%20guide%20for%20ST%20microcontrollers%20rev5.2.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [26] Digi-Key Electronics, „ATS08ASM-1,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digikey.com/product-detail/en/cts-frequency-controls/ATS08ASM-1/CTX506CT-ND/280206>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [27] RF, „What is Frequency Stability?,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-frequency-stability>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [28] CTS Corporation, „ATS/ATS-SM Series,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ctscorp.com/wp-content/uploads/ATS-ATSSM.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [29] OSRAM Opto Semiconductors, „TOPLED® E1608, KO DELPS1.22,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.osram.com/ecat/TOPLED%20E1608%20KO%20DELP1.22/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2191127/. [Kasutatud 18 Mai 2020].

- [30] OSRAM Opto Semiconductors, „KO DELPS1.22,“ 9 Märts 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.osram.com/ecat/TOPLED%C2%AE%20E1608%20KO%20DELP1.22/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2191127/#62a1fdff42f13778e2055fdc87c50fcb. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [31] Digi-Key Electronics, „1825910-7,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digikey.com/product-detail/en/te-connectivity-alcoswitch-switches/1825910-7/450-1804-ND/1731414>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [32] Silicon Labs, „Si8410/20/21 (5 kV) Si8422/23 (2.5 & 5 kV),“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/si841x-2x-datasheet.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [33] Silicon Labs, „USBXpress™ Family CP2102N Data Sheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/368/cp2102n-datasheet-1634912.pdf>. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [34] Littelfuse, „SP05 Series - 30pF 30kV Unidirectional TVS Array,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.mouser.ee/datasheet/2/240/Littelfuse_TV_S_Diode_Array_SP05_Datasheet.pdf-777043.pdf. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [35] Digi-Key Electronics, „U.FL-R-SMT(10),“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.digikey.com/product-detail/en/hirose-electric-co-ltd/U.FL-R-SMT\(10\)/H9161CT-ND/2135256](https://www.digikey.com/product-detail/en/hirose-electric-co-ltd/U.FL-R-SMT(10)/H9161CT-ND/2135256). [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [36] Alpha & Omega Semiconductor, „AON7524,“ Märts 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://aosmd.com/res/data_sheets/AON7524.pdf. [Kasutatud 18 Mai 2020].
- [37] L. S. Sterling, The Art of Agent-Oriented Modeling, London: The MIT Press, 2009.