

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Markus Visnapuu 206354IACB

Testseadme disainimine ja komplekteerimine ettevõtte Superhands OÜ tootele

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Peeter Ellervee
PhD

Kaasjuhendaja: Alvar Pällo
BSc

Tallinn 2024

Autorideklaratsioon

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

Autor: Markus Visnapuu

10.05.2024

Annotatsioon

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on luua ettevõtte Superhands OÜ, kes on tarkade lahenduste ja tarkvaraarendusega tegelev Eesti ettevõtte, tootele SuperCounter testseade. Seni on olnud SuperCounteri testimine täiesti manuaalne töö, mis on ajakulukas ning mille käigus on suur vigade tekkimise oht. Neid kahte probleemi üritatakse antud lõputööga lahendada.

Lõputöö väline lõppeesmärk on muuta ettevõtte omatoodet kvaliteetsemaks ja töökindlamaks ning arendada ühtne testseadme arhitektuur, mis on kohandatav mitmetele toodetele.

Antud lõputöö tulemusena valmis testseadme esimene versioon, mis täidab algselt seatud nõudeid ehk võimaldab läbi veebiliidese toote tõhusat testimist ja toote korrasolekus veendumist. Valminud testseade koosneb riistvaralistest, mehaanilistest ning tarkvaralistest lahendustest.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 22 leheküljel, 5 peatükki, 19 joonist.

Abstract

Testbench design and assembly for a product made by Superhands OÜ

The aim of this bachelor's thesis is to establish the company Superhands OÜ, which is an Estonian company engaged in smart solutions and software development, with the product SuperCounter test device. So far, testing of SuperCounter has been entirely manual work, which is time-consuming and prone to a high risk of errors. These two problems are attempted to be solved with this thesis.

The goal outside of the thesis is to enhance the quality and reliability of the company's own products and to develop a unified test device architecture adaptable to multiple products.

As a result of this thesis, the first version of the test device was completed, which meets the initially set requirements, enabling efficient testing of the product through a web interface, and ensuring its proper functioning. The completed test device consists of hardware, mechanical, and software solutions.

The thesis is in written in Estonian and contains 22 pages of text, 5 chapters, 19 figures.

Lühendite ja mõistete sõnastik

ADC	<i>Analog-to-digital converter.</i> Analoog-digitaalmuundur analoogsignaali digiteerimiseks.
ARM	<i>Advanced RISC Machines.</i> Kärbitud käsustikuga arvutiarhitektuur madala voolutarbega seadmete jaoks.
DNS	<i>Domain Name System.</i> Domeene ja IP-aadresseid teisendav internetiteenus.
DUT	<i>Device Under Test.</i> Tootmisjärgses testimises olev seade.
ESD	<i>Electrostatic discharge.</i> Staatiline elekter ehk elektrilaengute kogum objekti pinnal või selle sees.
Flashimine	<i>Flashing.</i> Püsivara laadimine riistvara väikmällu.
HTML	HyperText Markup Language. Märgistuskeel veebilehtede sisu defineerimiseks.
IoT	<i>Internet of Things.</i> Asjade internet ehk interneti kaudu seotud asjade võrk.
Kinnituskäpp	Kindla detaili fikseerimiseks mõeldud tööriist.
LED	<i>Light-emitting diode.</i> Valgusdiod, muudab elektrienergia nähtavaks valguseks.
Lõim	<i>Thread.</i> Eraldatud ressurssidega programmi alamprotsess.
SWD	<i>Serial Wire Debug.</i> Protokoll ARM protsessoriga seadmete testimiseks ning andmevahetuseks.
TCP	<i>Transmission Control Protocol.</i> Edastusohje protokoll ehk edastuskihi võrguprotokoll.
Teek	<i>Library.</i> Kolleksioon funktsioonidest ja rutiinidest, mis on mõeldud korduvkasutamiseks.
USB	<i>Universal Serial Bus.</i> Elektrooniliste seadmete ühendamise standard, mis võimaldab andmeedastust ja toitevoolu jagamist.
Veebiliides	Välise süsteemiga suhtlev kasutajaliides veebibrauseris.

Sisukord

1 Sissejuhatus	8
1.1 Algolukord.....	8
1.2 Eesmärk	8
2 Seadme ülesehitus	10
2.1 Riistvara.....	10
2.2 Mehaanika	11
2.3 Püsivara	12
2.4 Veebiliides	12
3 Kasutatavad tehnoloogiad.....	13
3.1 Altium Circuit Studio	13
3.2 SOLIDWORKS	13
3.3 ESP32	14
3.4 Püsivara teegid.....	14
3.4.1 ESP32_nRF52_SWD	14
3.4.2 AsyncTCP.....	14
3.4.3 ESPAsyncWebServer	14
4 Seadme arendus	16
4.1 Riistvara.....	16
4.1.1 Trükkplaadid.....	19
4.2 Mehaanika	22
4.3 Püsivara	26
4.4 Veebiliides	27
4.5 Testimine ja ettepanekud	28
5 Kokkuvõte	30
Kasutatud kirjandus	31
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	33
Lisa 2 – Lõputöö GitHubi repositoorium	34

Jooniste loetelu

Joonis 1. Seadme plokkdiagramm	10
Joonis 2. Riistvara plokkdiagramm	11
Joonis 3. Mikrokontrolleri ja ühenduste elektriskeem	17
Joonis 4. Sensorite soojendite elektriskeem	17
Joonis 5. Tagasiside LED indikaatorite elektriskeem	18
Joonis 6. Voolu mõõtmise elektriskeem.....	18
Joonis 7. Vedruklemmide trükkplaadi elektriskeem	19
Joonis 8. Peamine trükkplaat pealtvaates	20
Joonis 9. Peamine trükkplaat altvaates	20
Joonis 10. Vedruklemmide trükkplaadi pealmine külg	21
Joonis 11. Vedruklemmide trükkplaadi alumine külg.....	21
Joonis 12. Komplekteeritud trükkplaadid.....	22
Joonis 13. Komplektse testseadme 3D mudel	23
Joonis 14. Testseadme aluse 3D mudel	23
Joonis 15. Kinnituskäpa aluse 3D mudel	24
Joonis 16. Peamise trükkplaadi toe 3D mudel.....	24
Joonis 17. Vedruklemmide trükkplaadi ja DUTi toe 3D mudel.....	25
Joonis 18. Komplektne testseade.....	26
Joonis 19. Testseadme veebiliides.....	28

1 Sissejuhatus

Ettevõtte Superhands OÜ [13] üheks tooteks on SuperCounter, mis kompaktne IoT seade. See lõputöö keskendub sellele, kuidas luua esimene versioon usaldusväärsest ja tõhusast seadmest, mis võimaldaks Superhands OÜ-l paremini testida ja hinnata SuperCounteri jõudlust ja töökindlust.

1.1 Algolukord

SuperCounter on IoT toode Superhands OÜ tootevalikus, mida kasutatakse jalakäijate ja ratturite loendamiseks. Lahendus on mõeldud linnakeskkonda ning spordiradadele, mille tõttu on toode ilmastikukindel, töötab akutoitel ning seda juhib nRF52840 [11] mikrokontroller. Vaatamata toote ilmastikukindlale korpusele ja lakitud elektroonikale tuleb siiski ette olukordi, kus karmi väliskeskkonna tõttu lõpetab toode osaliselt või täielikult oma töö. Lisaks esineb vigaseid tooteid veel tootmispraagi ja jootevigade tõttu. Tüüpilisteks vigadeks on oodatust kõrgem voolutarve ja toote osaline või täielik funktsionaalsuse puudumine.

Hetkel puudub ettevõttel seade, mis võimaldaks mugavalt veenduda toote korrasolekus ning hinnata toote jõudlust ja töökindlust. Seega on seni olnud SuperCounteri testimine täiesti manuaalne töö, mis on ajakulukas ning mille käigus võib kergelt tekkida inimvigasid. Nendel põhjustel tekkis vajadus välja töötada toote spetsiifiline testseade.

1.2 Eesmärk

Lõputöö eesmärgiks on luua Superhands OÜ-le spetsiaalne testseade, mis võimaldaks toote SuperCounter testimist ning *flash*'imist. Spetsiaalse testseadme ülesandeks on suurendada SuperCounteri töökindlust, parandada funktsionaalsust ning tagada kokkupanud toodete kvaliteetne ja kiire testimine.

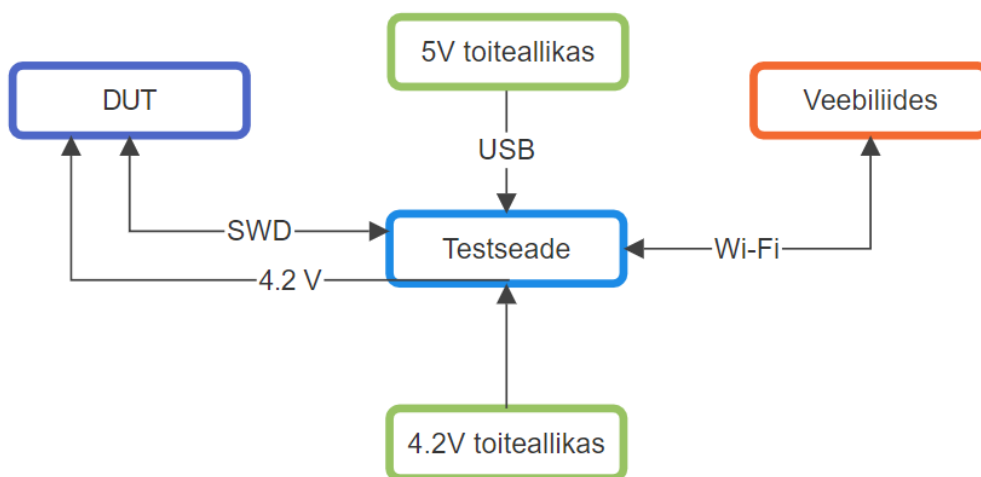
Enne arendustööga alustamist seati paika lisaeesmärgid. Esiteks peab testseade võimaldama toote parameetrite logimist, seega peab testseade võimaldama suhtlust nRF52840 mikrokontrolleriga. Teiseks peab toote paigaldamine ja eemaldamine

testseadmelt olema kerge, mis tähendab, et see ei tohi nõuda tööriistade nagu näiteks kruvikeeraja kasutamist. Kolmandaks peab seade põhinema ESP32 mikrokontrolleril. Viimaks peab seadmelt olema võimekus muuta temperatuuri keskkonnas, kus paiknevad toote sensorid. Lõputöö raames piirdub autor testseadme esimese versiooniga, mis ei oma täielikku tüüpilise tootmistestri funktsionaalsust ja täpsust, kuid on esimene samm selle suunas.

Lõputöö väline lõppeesmärk on muuta ettevõtte omatooted kvaliteetsemaks ja töökindlamaks ning arendada ühtne testseadme arhitektuur, mis on kohandatav mitmetele toodetele. Lõputöö käigus loodud lahendus on aga üks väikestest sammudest nende eesmärkide saavutamiseks.

2 Seadme ülesehitus

Lõputöö lahendus hõlmab testseadet, mida kasutatakse testitava toote ehk edaspidi DUTi *flash*'imiseks ning sellega suhtlemiseks. Lisaks tagab testseade DUTi toitepinge. Selle saavutamiseks on testseadmega ühendatud kaks toiteallikat ning veebiliides (Joonis 1), mille abil saab testseadet üle Wi-Fi võrgu juhtida. Testseade ise koosneb riistvarast, mehaanikast ja püsivarast. Järgnevalt käsitleme antud komponente detailsemalt.

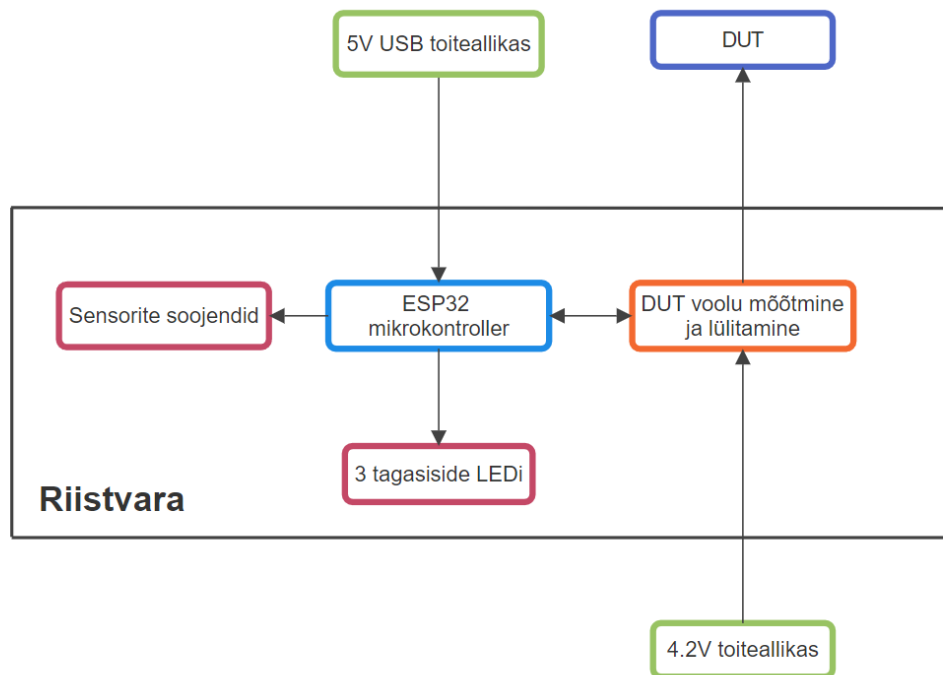


Joonis 1. Seadme plokkdiagramm

2.1 Riistvara

Testseadme üheks osaks on riistvara, mis koosneb omakorda neljast peamisest komponendist ning sisenditest ja väljunditest (Joonis 2). Riistvaraline lahendus on realiseeritud kahe eraldiseisva trükkplaadina. Esimesele ehk peamisele trükkplaadile on paigaldatud kogu seadme riistvara ehk ESP32 mikrokontroller, sensorite soojendid, LED indikaatorid, toitelahendused ja DUTi voolu mõõtmine ja lülitamine. Teise trükkplaadi ainukeseks eesmärgiks on luua vedruklemmide abil vajalikud ühendused DUTiga. Trükkplaadid on omavahel ühendatud lamekaabliga. Kahe trükkplaadi lahendus on

kasutusel seetõttu, et juhul, kui toote uuel versioonil peaks ühenduspunktid teisiti paiknema siis on testseadme sellele sobivaks disainimine oluliselt lihtsam, sest ümber peab disainima vaid väikse klemmidega trükkplaadi.



Joonis 2. Riistvara plokkiagramm

2.2 Mehaanika

Riistvara kinnitamiseks ja kaitsmiseks, testitava seadme fikseerimiseks ja testseadme mugavaks kasutamiseks peab antud seadmel olema mingit sorti mehaanika. Testseade koosneb mitmetest detailidest, millest osa on vaja seadme arenduse käigus modelleerida ning valmistada. Lisaks peab seade fikseerima testitava toote ning omama kinnitusvahendeid, et seadme osad omavahel kinnitada. Mehaanika abil on tulemuseks komplektne seade, mis ei ole habras ning mille mehaanika tagab mugava ja kiire toodete testimise.

2.3 Püsivara

Testseadmes kasutusel oleva ESP32 mikrokontrolleri püsivara on kirjutatud C++ keeles ning selles olev loogika ja funktsioonid juhivad kogu testseadme riistvara ning loovad kasutaja jaoks olulise silla riistvara ja veebiliidese vahel. Pidades silmas vajadus, et testseadme arhitektuuri oleks võimalikult lihtne kohandada ka teistele toodetele siis põhineb püsivara modulaarsel disainil. Seega kompileeritakse püsivara kokku mitmest failist ja teekidest.

2.4 Veebiliides

Testseadme juhtimine toimub täielikult üle veebiliidese, mis on kirjutatud HTML keeles ning töötab samuti ESP32 mikrokontrolleril, mis käitub samaaegselt kõigele muule ka veebiserverina. Veebiliides on üle Wi-Fi kättesaadav vaid kohalikus võrgus, mis tagab selle kasutaja ja ettevõtte jaoks turvalise andmevahetuse. Veebiliides koosneb kuuest peamisest sektsioonist, milleks on:

- Tootega suhtlemine.
- Toote *flash*'imine kasutaja poolt sisestud kompileeritud püsivaraga.
- Sensorite soojendamise lülitamine.
- Toote voolutarbe jälgimine.
- Testseadme staatus ja sõnumid.
- Toote info ja staatus.

Need sektsioonid katavad kogu testseadmele vajaoleva funktsionaalsuse, tänu millele ei vaja seade keerulisi riistvaralisi tagasiside lahendusi.

3 Kasutatavad tehnoloogiad

Nimekiri tehnoloogiatest, mida on kasutatud lõputöö lahenduse realiseerimiseks. Antud tehnoloogiad valiti kahel põhjusel. Esiteks, ei piira valitud tehnoloogiad oma võimekuselt lõputöö eesmärkide täiemahulist saavutamist. Teiseks, on need ettevõttes Superhands igapäevaselt kasutatavad tehnoloogiad ning olid seega kergelt kättesaadavad. Lisaks on valitud tehnoloogiad lõputöö autorile tuttavad ja käepärased, mis aitas panustada rohkem aega arendustegevusele, mitte uute tehnoloogiatega tutvumisele.

3.1 Altium Circuit Studio

Circuit Studio [14] on professionaalne trükkplaatide disainimis tarkvara, mida on lõputöös kasutatud elektriskeemide ja trükkplaadi disainide loomiseks. Tarkvara pakub mugavat töökeskkonda ning laia valiku tööriistasid ka kõige keerulistemaks disainideks. Lisaks võimaldab tarkvara luua ja hallata elektroonikakomponentide kogumikke, määrata ja kontrollida trükkplaadi disainireegleid ning genereerida trükkplaadi tootmisfaile koos dokumentatsiooniga.

3.2 SOLIDWORKS

SOLIDWORKS [15] on laialdaselt kasutatud professionaalne raalprojekteerimise tarkvara, mida on lõputöös kasutatud mehaaniliste detailide ning testseadme 3D mudeli loomiseks. Tarkvara võimaldab luua keerukaid 3D-mudeleid, teha neist analüüsi ja simulatsioone ning genereerida tehnilisi jooniseid ja dokumentatsiooni. Lisaks saab seda kasutada tootmisprotsesside planeerimiseks ja tootmiseks, sealhulgas CNC-tööpinkide ja 3D-printerite jaoks. Tarkvara väga laialdase funktsionaalsuse tõttu kasutatakse seda laialdaselt pea kõigis tööstusharudes.

3.3 ESP32

ESP32 [16] on madala energiatarbega taskukohane mikrokontrollerite seeria, millel on integreeritud Wi-Fi ja Bluetooth. Lõputöös on kasutusel ESP32-S3-DevKitM-1 [9] arendusplaat, mis hõlmab endas ESP32-S3-Mini mikrokontrollerit ning mille ülesandeks on kogu testseadme juhtimine. ESP32-S3 võimaldab luua kompaktsed madala energiatarbega väga mitmekülgsed IoT lahendusi. Lisaväärtustena on ESP32 tooteserial usaldusväärne Wi-Fi ja Bluetooth traadita andmeedastus, integreeritud turvafunktsioonid, kaks tuuma ja põhjalik dokumentatsioon. Antud põhjustel on tegemist väga populaarse mikrokontrolleriga, mida kasutavad nii suuretevõtted kui ka hobiarendajad.

3.4 Püsivara teegid

ESP32 mikrokontrolleri tarkvaralise funktsionaalsuse saavutamiseks on lõputöös kasutusel kolm vabavaralist teeki.

3.4.1 ESP32_nRF52_SWD

ESP32_nRF52_SWD [3] on teek, mis võimaldab ESP32 ja ESP8266 mikrokontrolleril teostada andmevahetust NRF52 seeria mikrokontrolleriga läbi SWD liidese [7]. Lõputöös võimaldab see testseadme ja toote vahelist andmevahetust ning ka toote *flash*-imist. Lisaks abistad antud teek püsivaras teiste teekide liidestamisega ning pakub vajadusel NRF52 turvafunktsioonide mahasurumist.

3.4.2 AsyncTCP

AsyncTCP [4] teek, võimaldab ESP32 mikrokontrolleril luua ja hallata TCP ühendusi asünkroonseks andmevahetuseks üle Wi-Fi võrgu. Täpselt seda funktsionaalsust võimaldab see teek ka lõputöös ehk tagab võimaluse luua testseadmega traadita ühendus. Antud teek on efektiivne ja ressursisäästlik ning võimaldab mikrokontrolleril hallata mitut ühendust ilma kogu süsteemi jõudlust oluliselt mõjutamata, mille tõttu sobib see suurepäraselt antud lahendusse.

3.4.3 ESPAsyncWebServer

ESPAsyncWebServer [5] on teek, mis võimaldab ESP32 mikrokontrolleril toimida veebiserverina ja esitada dünaamilist veebilehtede sisu. Teegiga loodud veebiserver on tõhus ning toetab asünkroonseid HTTP taotlusi, võimaldades sellega veebiliidese kaudu

juurdepääsu ESP32 mikrokontrollerile ning selle andmetele ja funktsioonidele. Lõputöös on teegi abil realiseeritud veebiliides, millele saab ligi kohalikus võrgus ning mis võimaldab kontrolli testseadme ja selle funktsionaalsuse üle.

4 Seadme arendus

Kui lõputöö eesmärgid ning testseadme osad ning struktuur said paika pandud, asuti nende põhjal elektroonika ning trükkplaatide disainimise juurde. Peale trükkplaatide disainide valmimist tuli anda need tootmisesse ja tellida ära kõik vajalikud komponendid. Elektroonika ooteaeg sisustati mehaanika disainimise ja tootmisega. Tänu sellele oli võimalik testseade pärast trükkplaatide saabumist ja komponentide jootmist kohe komplekteerida. Pärast seadme komplekteerimist asuti püsivara ja veebiliidese arendamise juurde. Viimaks tuli kõik seadme komponendid omavahel lõplikult liidestada ja kõrvaldada kõik avastatud pisiprobleemid. Arendus toimus kahenädalaste sprintidena ning igal sprindil oli fikseeritud peamine teema ning oodatav vahetulemus.

4.1 Riistvara

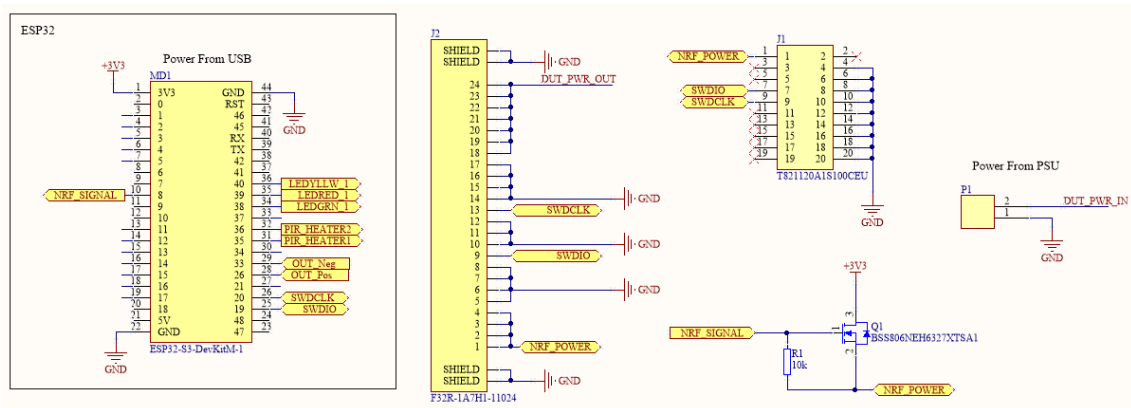
Riistvara arendus algas sobilike lahenduste ja komponentide otsimistest ning Circuit Studio arendustarkvaras projektide loomisest. Kuna testseade peab põhinema ESP32 mikrokontrolleril alustati esmalt sobiva mudeli otsimisega. Valituks osutus ESP32-S3 mudel, sest see on oma kategoorias üks uuemaid ja võimekamaid, kuid siiski väga taskukohane. Kaasaegne valik tagab seadme pika kasutusea ning arenduse käigus hea ja ajakohase toe ja dokumentatsiooni. Samuti on tänu kahele tuumale ja 8MB välmälule S3 mudel võimekuse poolest hea valik, sest seade peab täitma päris mitut funktsiooni korraga ning võimaldama püsivara talletamist.

Kuna testseadme puhul pole maksumus ja mõõtmed kriitilised kasutatakse seadmes ESP32-S3-DevKitM-1 arendusplaati, mis hõlmab endas valitud mikroprotsessorit, UART silda, toitemuundurit, USB pesasid ja kõike muud vajalikku. Arendusplaadi kasutamise suureks eeliseks on väiksem riistvara arendusele kuluv aeg ning kiire vahetusvõimalus juhul, kui mikrokontrolleri või sellega seotud komponentidega peaks midagi juhtuma.

Valitud arendusplaadi trükkplaadile kinnitamiseks võeti kasutusele kaks 22x1 emast terminali [19]. Kuna arendusplaat pole sellisel viisil trükkplaadi külge joodetud ongi kiire

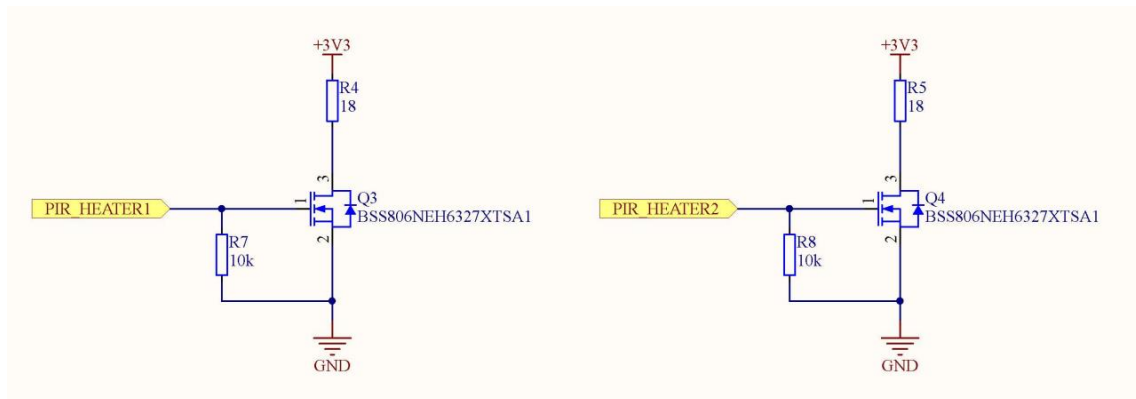
ja lihtne vahetamine tagatud. Lisaks vajab seade veel kolme pistikut. Esiteks 2x1 kruviterminali, et ühendada toiteplokk DUTi jaoks vajaliku toitepingega. Teiseks lamekaabli pistik vedruklemmide trükkplaadi ühendamiseks peamise trükkplaadiga. Kolmandaks varu pistikut, kuhu sobituvad tootja SEGGER tööriistad [1], mis võimaldavad SWD suhtlust. Varu pistiku abil on kasutajal võimalik soovi korral ESP32 asemel kasutada toote *flashi* miseks ja sellega suhtlemiseks neid spetsiaalseid tööriistaid.

Valitud komponendid paigutati peamise trükkplaadi elektriskeemile, kuhu koonduvad kõik süsteemi komponendid. Arendusplaadi andmelehe [10] põhjal otsustati, millistele klemmidele erinevad signaalid ühendatakse (Joonis 3). Lisaks loodi kõigile pistikutele vajalikud ühendused ning lisati MOSFET DUTi lisatoite lülitamiseks.



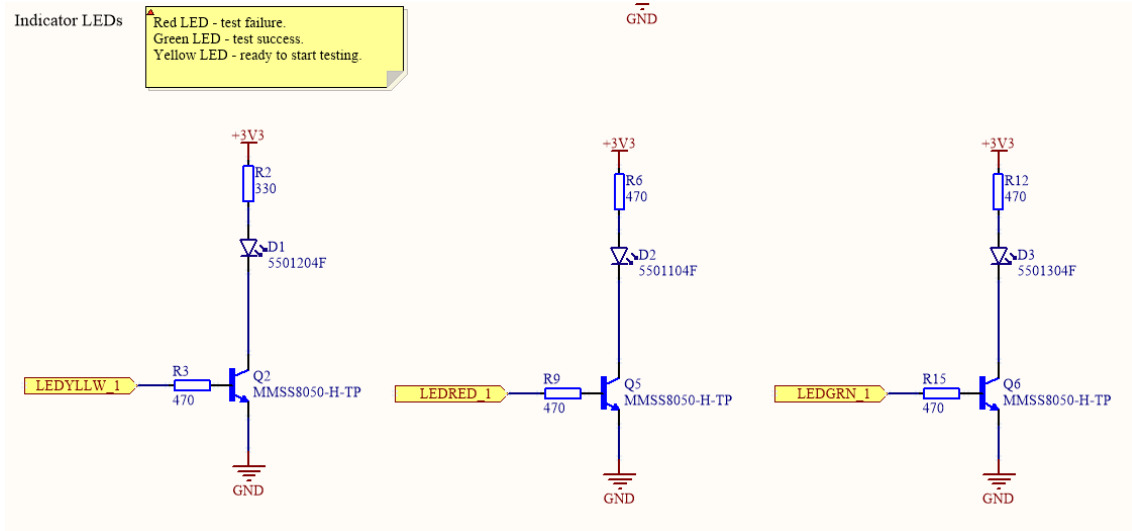
Joonis 3. Mikrokontrolleri ja ühenduste elektriskeem

Samuti kasutati MOSFET väljatransistore sensorite soojendite lülitamiseks. Soojusallikateks valiti 18 Ω 2 W takistid (Joonis 4), millest mõlemast eraldub 0.6 W soojust, et soojendada DUTi sensoreid ja neid ümbritsevat keskkonda. Soojendite lülitamise signaal on ühendatud ESP32ga.



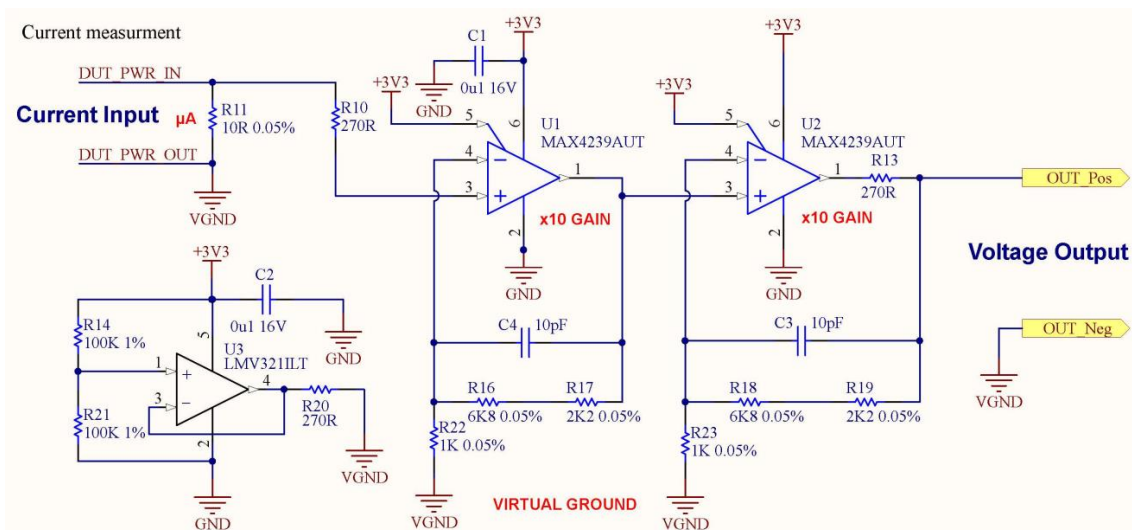
Joonis 4. Sensorite soojendite elektriskeem

ESP32 arendusplaadiga on ühendatud ka tagasiside jaoks mõeldud punane, kollane ja roheline LED indikaator, mida lülitatakse transistoridega ning mille voolu piiratakse jadatakistitega, et vältida liiga eredaid või läbipõlenud indikaatoreid (Joonis 5). LED indikaatorite ülesandeks on anda kasutajale esmane tagasiside testseadme olekust.



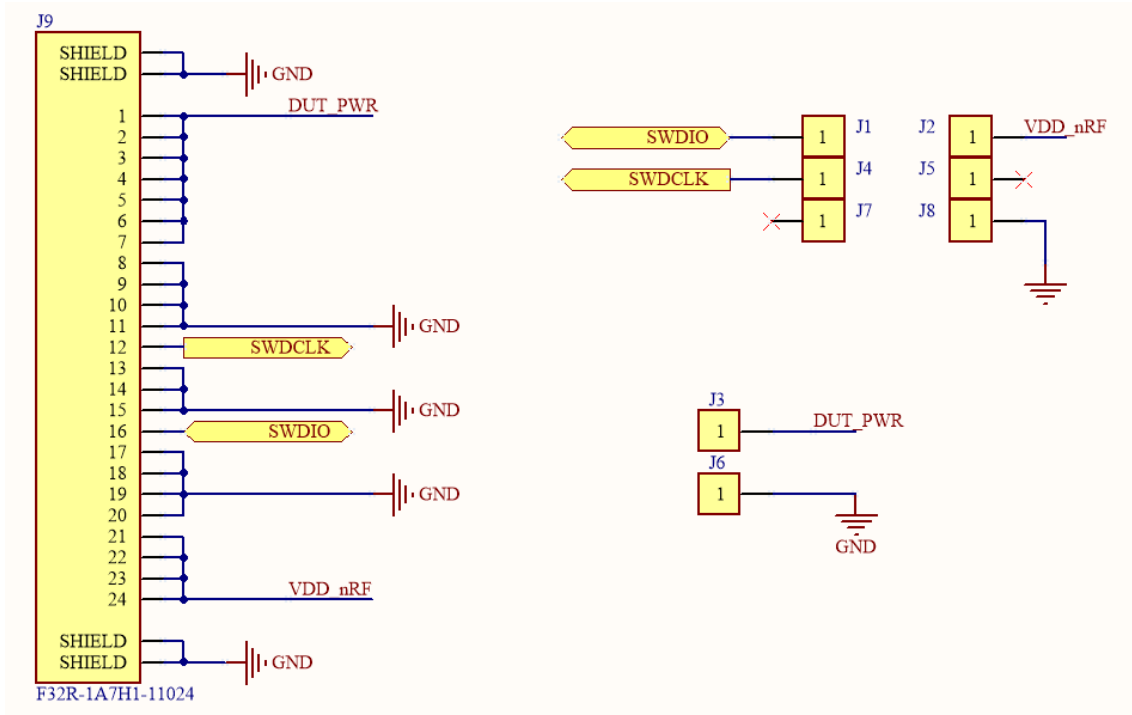
Joonis 5. Tagasiside LED indikaatorite elektriskeem

Esimese ehk peamise trükkplaadi viimaseks osaks on voolumõõtmise ahel (Joonis 6). Antud elektriskeemi loomisel on referentsina kasutatud vabavaralist riistvaralahendust tinyCurrent [6]. Lahendus sai valitud, sest autoril ja ettevõttel on sellega väga head kogemused, kuna antud lahendus on üpriski lihtne ja taskukohane, kuid vaatamata sellele täpne. Modifitseeritud lahendusega saab mõõta mikroamprite vahemikku, mis on oluline, et hinnata DUTi voolutarvet magavas režiimis.



Joonis 6. Voolu mõõtmise elektriskeem

Pärast peamise trükkplaadi komponentide liidestamist ning elektriskeemi lõpetamist loodi elektriskeem ka teise trükkplaadi jaoks. Antud elektriskeemis on kasutusel sama lamekaabli pistik ning 8 spetsiaalse pikkusega vedruklemmi (Joonis 7), mis loovad vedrude surve abil DUTi kontaktidega ühenduse.



Joonis 7. Vedruklemmide trükkplaadi elektriskeem

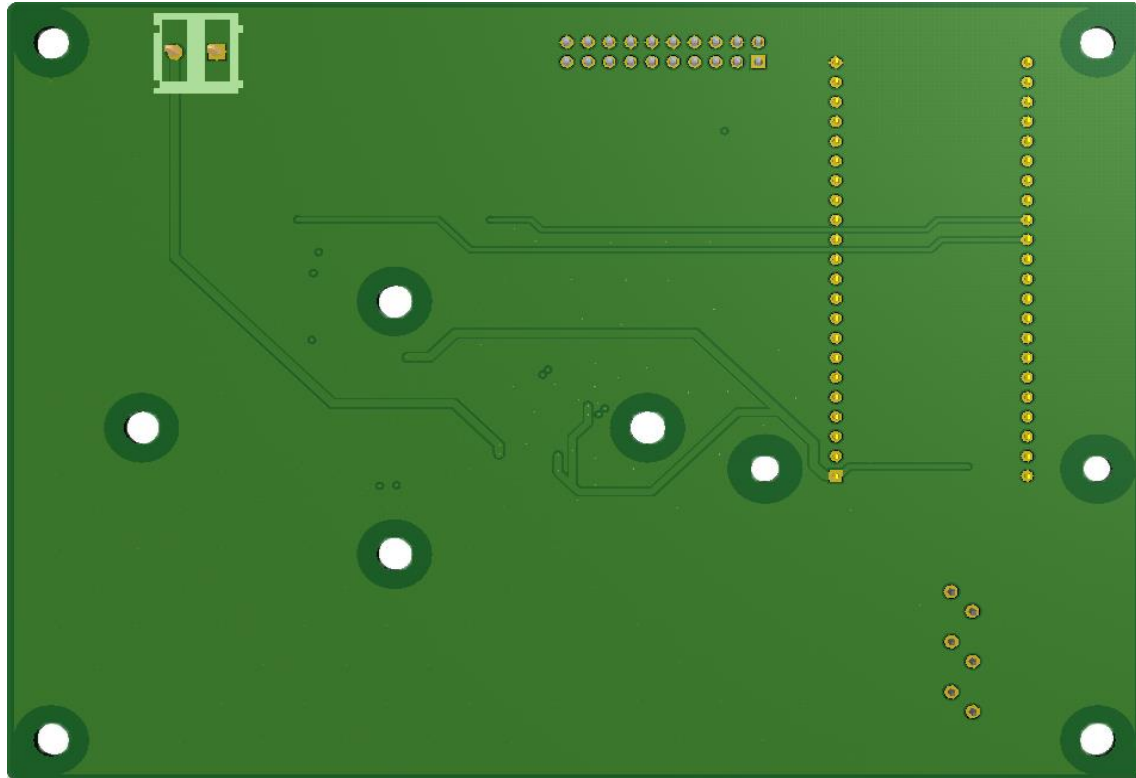
4.1.1 Trükkplaadid

Loodud elektriskeemide põhjal hakati disainima kahte trükkplaati, millel kasutatakse nii läbiaugu- kui ka pindmontaaži komponente. Esmalt seati paika trükkplaatide mõõdud ning seejärel augud, et neid oleks võimalik mehaanilistele detailidele kinnitada. Kõige aeganõudvamaks protsessiks ostus komponentide paigutamine trükkplaatidele. Enne lõplike paigutusteni jõudmist prooviti mitmeid erinevaid disaine, sest minimaalsete muudatuste tõttu, pidi komponentide asetus oluliselt muutuma. Seejärel loodi komponentide vahelised ühendused ning korrastati tähistused.

Peamisel trükkplaadil asetsevad kõik komponendid ühel ehk pealmisel küljel (Joonis 8). Trükkplaadi alumisel küljel on näha vaid läbi augu montaažiga komponentide jalgasid ning ühendusradasid (Joonis 9). Komponentid on paigutatud nõnda, et trükkplaadi alumine külg saaks asetseda seade aluse pinnale lähedal. Trükkplaat on neljakihiline ning selle kõik kihid on kaetud vasealadega, mis on häirekindluse suurendamiseks maandatud.

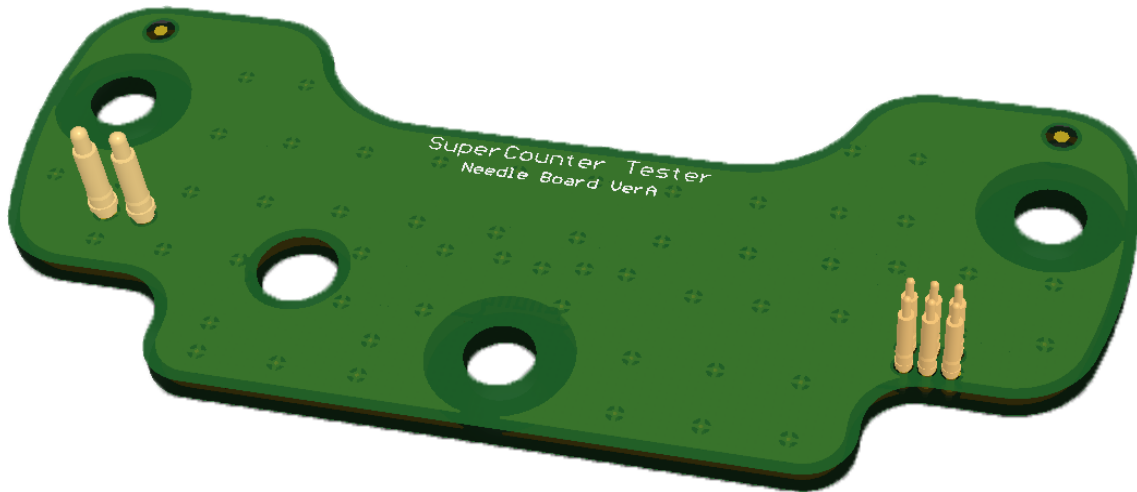


Joonis 8. Peamine trükkplaat pealtvaates



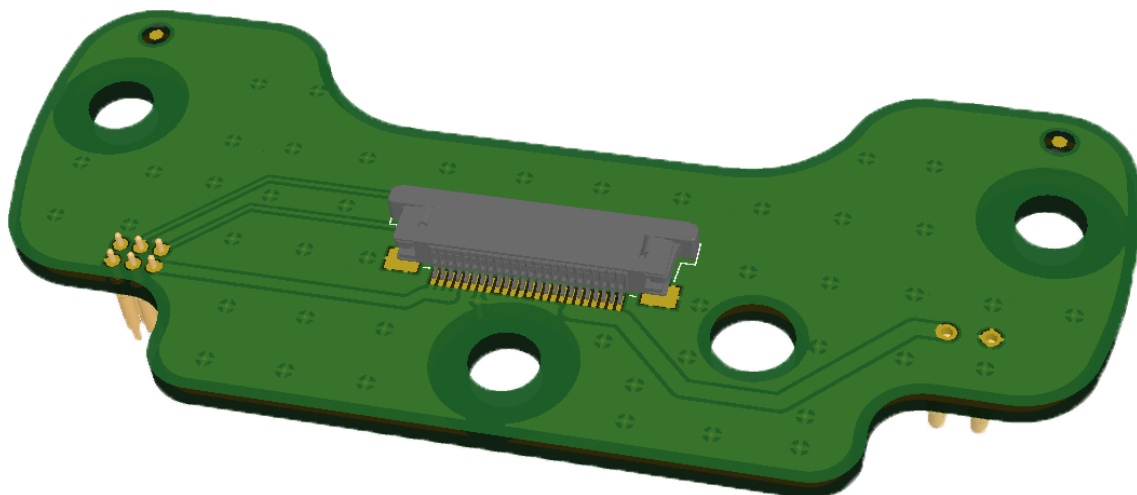
Joonis 9. Peamine trükkplaat altvaates

Vedruklemmidega trükkplaat on oma disainilt palju lihtsam. Selle ühel küljel asuvad kaks jämedamat ning 6 peenikesemat vedruklemmi ning tähistus (Joonis 10). Jämedamad vedruklemmid on kasutusel toitekontaktide poolel, sest neid läbiv maksimaalne tootjapoolne lubatud vool on oluliselt suurem.



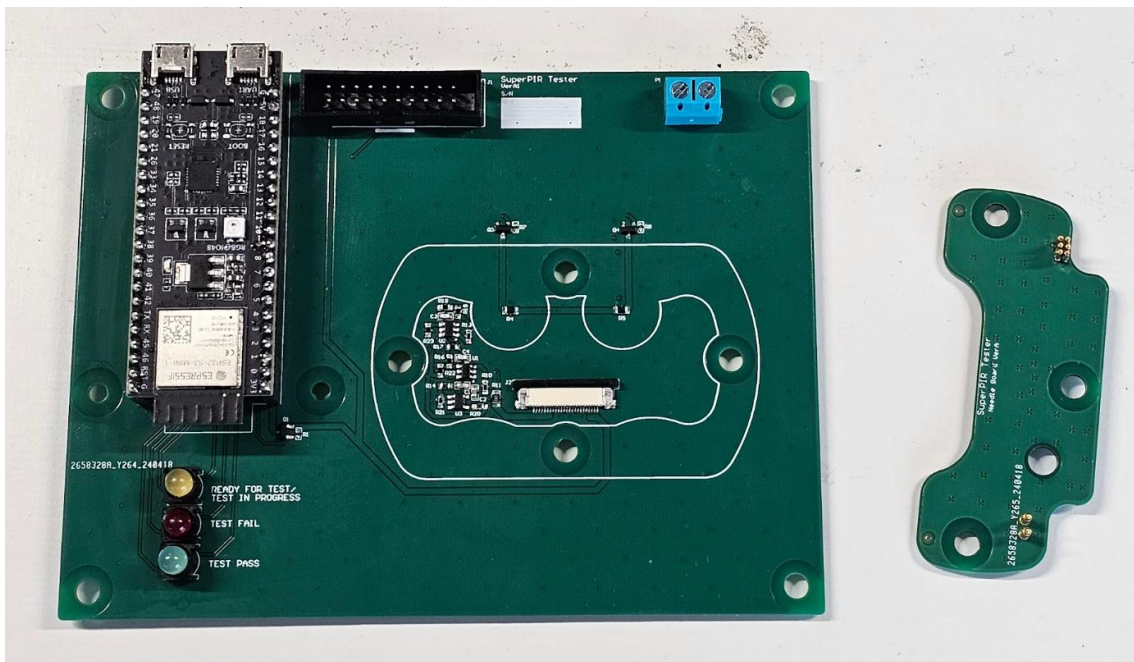
Joonis 10. Vedruklemmide trükkplaadi pealmine külg

Trükkplaadi teisel küljel on vaid pistik, mille abil ühendub see peamise trükkplaadi külge (Joonis 11). Ühendus on loodud 24 soonelise lamekaabliga ning läbi kaabli tagatakse DUTi toitepinge, maandus ning SWD protokollide kellatakt ja andmesünn.



Joonis 11. Vedruklemmide trükkplaadi alumine külg

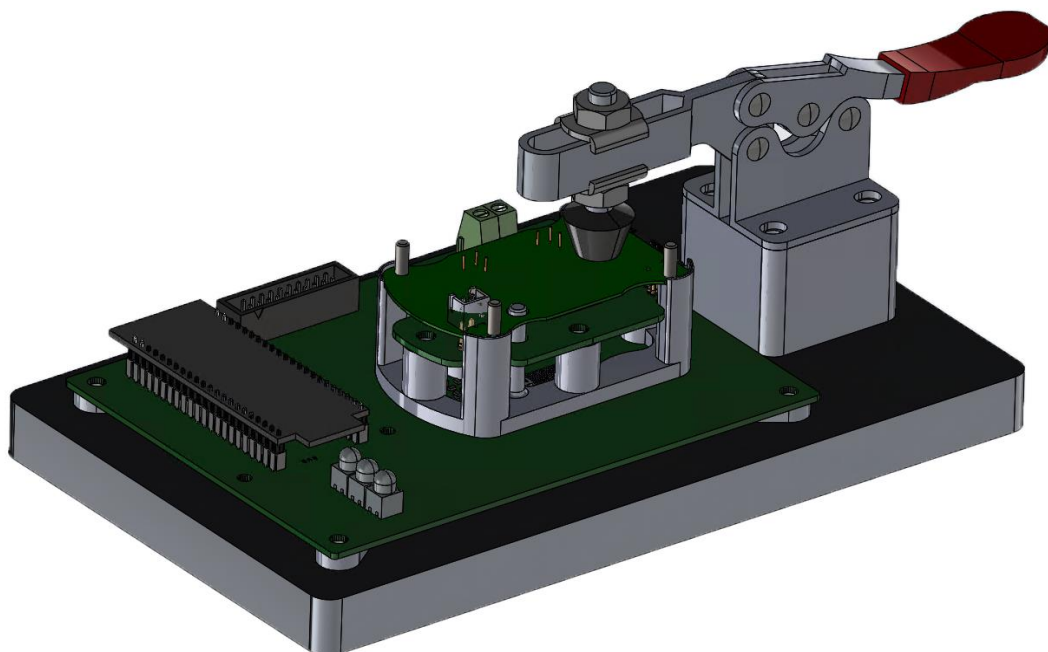
Circuit Studios valminud trükkplaatide disainide põhjal loodi tootjale sobivad [12] tootmisfailid, mille abil anti trükkplaadid tootmisesse. Lisaks võimaldas arendustarkvara luua BoMi ehk komponentide nimistu, mille abil anti telliti kõik disainides olevad komponendid. Pärast trükkplaatide ja komponentide tarnimist sai asuda neid kokku jootma. Kuna disainis on kasutusel ka väga väiksem 0402 korpuses komponendid siis joodeti komponendid kasutades spetsiaalset soojaõhupuhurit. Tulemuseks olid disainidele vastavad ja trükkplaadid koos kõigi ettenähtud komponentidega (Joonis 12).



Joonis 12. Komplekteeritud trükkplaadid

4.2 Mehaanika

Testseade koosneb 39st eraldi detailist, millest 4 on seadme arenduse käigus modelleeritud ning valmistatud. Detailide modelleerimiseks kasutati SOLIDWORKS-i ning valmistamiseks 3D printerit PETG *filament*’iga ning laserlõikurit. Lisaks on seadmel testitava toote fikseerimiseks kangiga kinnituskäpp [17]. Ülejäänud detailid on mitmesugused kinnitusvahendid, et seadme osad omavahel fikseerida. Tulemuseks on komplektne seade (Joonis 13), mis ei ole habras ning mille mehaanika tagab mugava ja kiire toodete testimise.



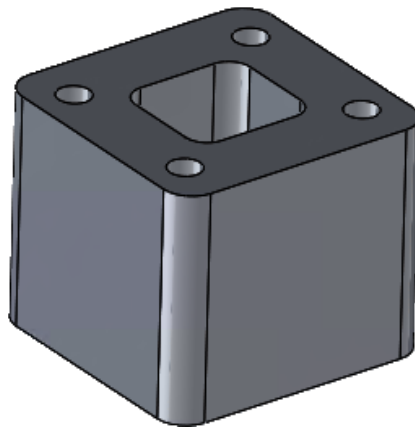
Joonis 13. Komplektse testseadme 3D mudel

Esmalt disainiti testseadmele metallist alus (Joonis 14), mis tagaks, et seade poleks liiga habras ning püsiks kasutuse jooksul paigal. Detaili valmistamiseks kasutati laserlõikurit, mis tagab täpse ning järel viimistlust mitte vajava tulemuse. Seejärel puuriti detailile CNC pingis augud, mis ka hiljem keermestati, et neisse kinnituksid M8 poldid.



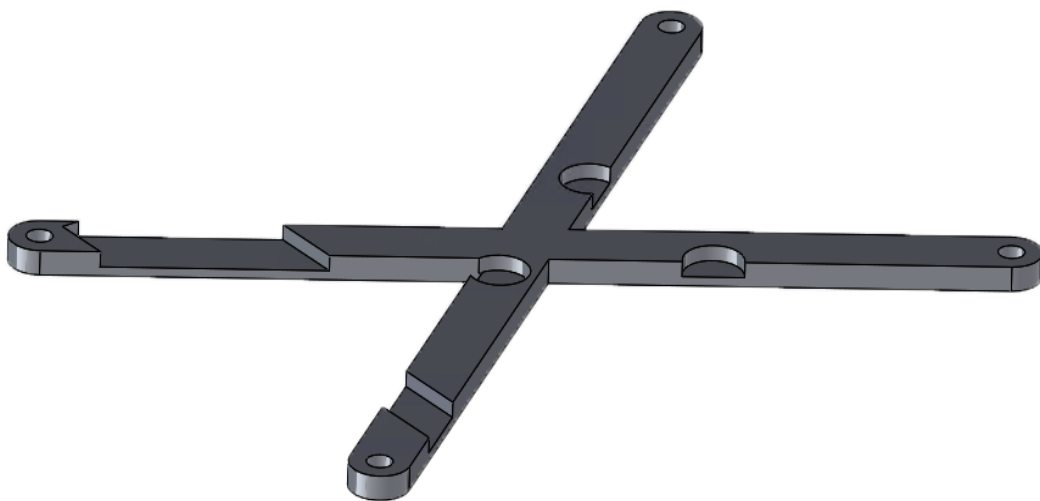
Joonis 14. Testseadme aluse 3D mudel

Järgmisena disainiti kõrgendus (Joonis 15), millele kinnitaks kangiga kinnituskäpp. Selleks arvutati välja vajaminev kõrgus ning kasutati kinnituskäpa andmelehte, et panna paika poldivalem. Kuna detaili valmistamiseks kasutati 3D printerit, jäeti detail seest tühjaks, et säästa aega ja materjali. Käpp koos kõrgendusega kinnitatakse aluse külge pikkade M8 poltide abil.



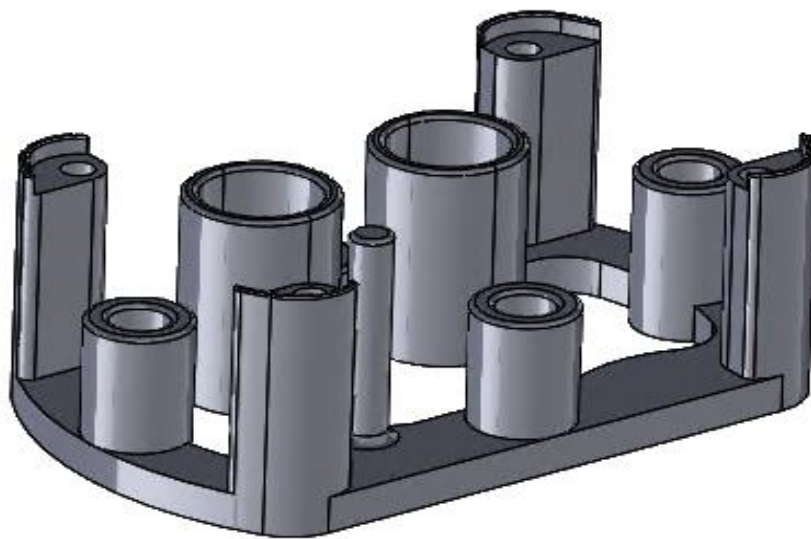
Joonis 15. Kinnituskäpa aluse 3D mudel

Peamise trükkplaadi fikseerimiseks ning metallist alusest eraldamiseks disainiti ka sellele kõrgendus (Joonis 16), mis tagab, et seadme komponentide jalad ei puutuks metallist alust. Ka see detail 3D prinditi ning selle disainimiseks kasutati samasid säästlike põhimõtteid, kuid peeti ka silmas, et säiliks detaili tugevus



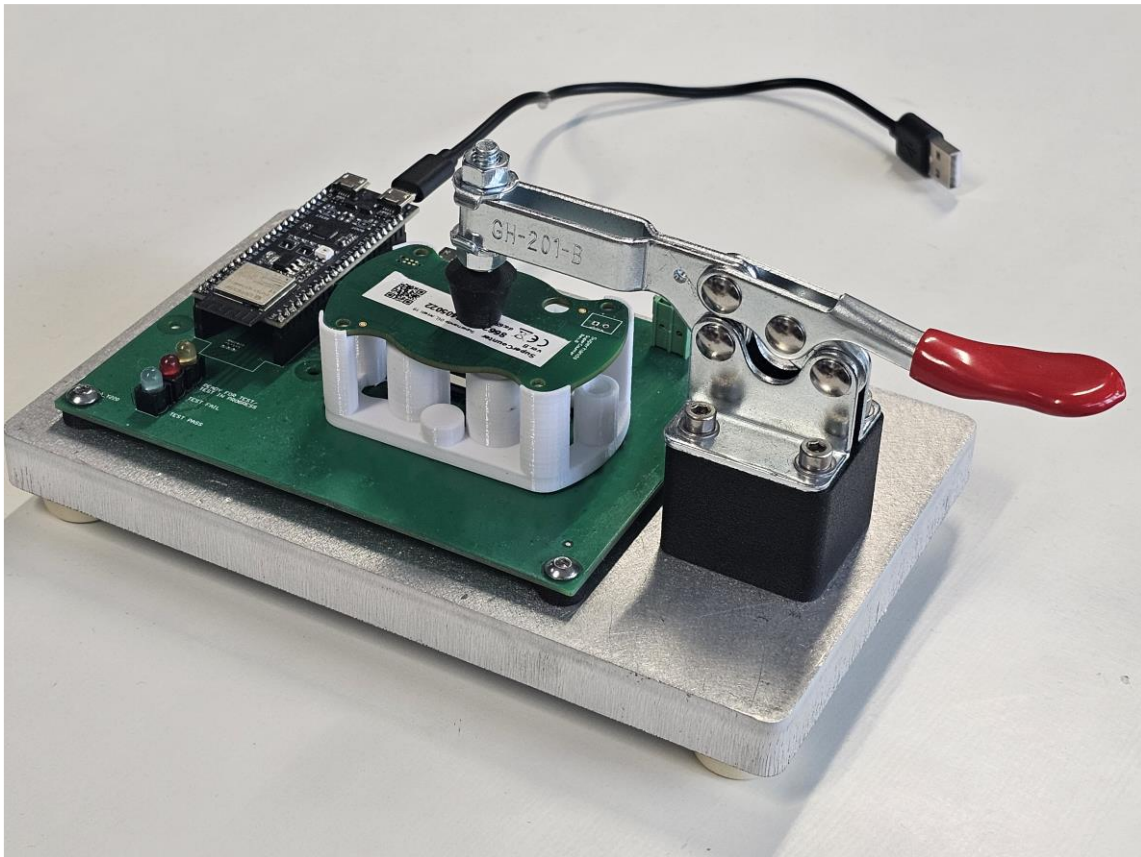
Joonis 16. Peamise trükkplaadi toe 3D mudel

Viimaseks modelleeritud ja valminud detailiks on vedruklemmide trükkplaadi ning DUTi tugi (Joonis 17). Toe nurkades paiknevad kõrgendused, mille sisse käivad 3 mm läbimõõduga metalltihvtid. Nende ülesandeks on koos kõrgenduste äärtega fikseerida testitav toode. Detaili keskel olevad kaks torni katavad DUTi sensorid, mis muudab nende testimise võimalikuks. Lisaks on toel trükkplaatide kinnitamiseks kõrgendused, millesse kuumpressitakse metallist M8 keermesüvised. Tugi on disainitud sellisel viisil, et kasutajal oleks võimalik toode sellele asetada vaid ühte pidi. See aitab vältida inimeksituse tõttu tekkivaid probleeme. Kogu 3D printitud detail asetub peamise trükkplaadi peale ning trükkplaadid kinnitatakse sellele samuti M8 poltidega.



Joonis 17. Vedruklemmide trükkplaadi ja DUTi toe 3D mudel

Valminud mehaanika ja trükkplaatide kokku komplekteerimisel saadud seade (Joonis 18) näeb välja tugev, kasutajasõbralik ja professionaalne. Lisaks paigaldati seadme aluse nurkadesse kummist jalad, et seade ei kriibiks teisi tööpindasid. Järgnevalt vajab seade tarkvaralist lahendust, et seda oleks võimalik kasutada eesmärgi päraselt .



Joonis 18. Komplektne testseade

4.3 Püsivara

Tarkvaralise lahenduse arendamist alustati püsivara teekide otsimisest. Leiti, et lahenduse realiseerimiseks on vaja kasutada kolme ESP32 mikrokontrollerit toetavat teeki, millest üks abistaks SWD protokolliga ning teised kaks võrgunduse ja veebiliidesega.

Esmalt loodi moodul, mis kasutab ESP32_nRF52_SWD teeki, et suhelda üle SWD liinide DUTiga. Moodul omab väliselt kättesaadavaid funktsioone, mille abil ülejäänud püsivara moodulid sellega infot vahetavad. Moodulis on defineeritud kindlad registrid ja funktsioonid, et suhtlus oleks võimalik just nRF52840 mudeliga.

Järgmisena tuli luua moodul, mis tekitaks ESP32 mikrokontrollerist samaaegselt ka veebiserveri. Selleks kasutati AsyncTCP ja ESPAsyncWebServer teeki, mis on ESP32 kasutajaskonnas laialt levinud ning ennast tõestanud. Moodul vastutab kohaliku Wi-Fi võrguga ühendamise eest ning seejärel seab üles veebiserveri, millele antakse mDNS abil aadress. Tänu sellele on seadme veebiliides kättesaadav swd.local aadressil ning IP

aadressi pole vaja ühendamiseks kasutada. Ühendatud kasutaja korral vastutab moodul püsivara ja veebiliidese vahelise andmeedastuse eest.

Lõpuks sai loodud püsivara moodulid ja nende funktsioonid ära kasutatud *main* lähtefailis, mis tagab seadme korrektse ülesseadmise ja seadme töötamise ajal korrektse rutiinide, tuumade ja globaalsete muutujate haldamise.

Valminud püsivara on modulaarne koosneb kolmest peamisest teegist, neljast lähtefailist ning neljast päisefailist. Failide ja teekide koostöös kompileeritud püsivara tagab testseadmele kogu soovitud funktsionaalsuse ning ESP32 mikrokontrolleri ressursside efektiivse kasutamise.

4.4 Veebiliides

Arenduse viimaseks etappiks oli luua lisaks püsivarale ka veebiliides, mis töötab samaaegselt veebiserverina käituval ESP32 mikrokontrolleril. Veebiliides jaotati sektsioonideks (Joonis 19), et tagada hea ülevaade ja kasutajamugavus.

Esmalt loodi sektsioonide kujundus ja tekst ning seejärel hakati implementeerima funktsioone ja rutiine, et tagada ka veebiliidese funktsionaalsus. SWD osa võimaldab kasutajal luua DUTi nRF52840 mikrokontrolleriga ühenduse ning seejärel sellega suhelda või manipuleerida registreid ja mälu. Flash osa võimaldab toote *flash* imist, kasutaja valitud nRF52840 jaoks kompileeritud püsivaraga. Lisaks saab välja lugeda juba DUTile kirjutatud püsivara. Heaters osa võimaldab läbi veebiliidese lülitada soojendamiseks kasutusel olevaid takisteid ning DUT Current sektsioon kuvab kasutajale reaalselt seadme voolutarbe mikroamprites. Kõrgematesse ühikutesse küündiva voolutarbe puhul kuvatakse suurim võimalik mikroamprite väärtus. Viimased sektsioonid on kasutusel seadme ning toote info ja suhtluse kuvamiseks. Kuvatud info näitab kasutajale mugavalt ära, kas seade on tootega ühendatud ning, mis järgus on testimine.

SWD

Init SWD
Read nRF Lock State
Set nRF Lock Bit
Erase nRF
Reset nRF

Address
Value
Read nRF Register
Write nRF Register
Write nRF Flash

Power ON
Power OFF

Flash

Erase nRF
Reset nRF

Address 0x
Erase nRF Page

Flash File
Offset 0x
Flash File

Flash Uploaded File

Offset 0x
Choose File
No file chosen
Flash Uploaded File

Dump Flash to File
Offset 0x
Size 0x
Dump to File

Download Flash Contents Offset 0x
Size 0x
Download Flash

(All values in HEX)

Heaters

Toggle heater 1
Toggle heater 2

DUT Current

332 uA

Status

no task running, last speed 0.00kbps

nRF info

nRF not connected

ESP32 Memory Size: **2698** kB

ESP32 Free Memory: **2676** kB

Joonis 19. Testseadme veebiliides

4.5 Testimine ja ettepanekud

Pärast seadme valmimist sai alustada põhjalikuma testimisega. Esmalt ühendati seade USB kaabli ja toiteploki, mis tagasid vastavalt 5 V ja 4.2 V toitepinged. Seejärel testiti testseadet ilma DUTita, mille käigus kontrolliti LED indikaatorite ja toitevoolude lülitamist. Lisaks testiti soojendite tööd ja lülitamist infrapuna termomeetriga. Seadmele paigaldatud 18 Ω takistid suutsid 23°C toatemperatuuril neid ümbritseva keskkonna

soojendada 31°C ligi minutiga, mis täidab seatud eesmärgi ja tõestab disaini korrektsust. Järgmisena testiti veel veebiliidesega ühendamist ning selle korrasolekut.

Pärast esialgseid testimisi ja ootuspäraseid tulemusi asuti testima koos testseadmele paigaldatud tootega. Toote paigaldamine testseadme pesasse oli kerge ja kiire ning pärast seda oli toode kindlalt fikseeritud, seega oli mehaanika disainimine ja tootmine hästi õnnestunud. Ka edaspidises testimises tagasilööke ei tekkinud, sest DUTi voolu lülitamine tagas sellele voolu ning SWD liides tuvastas ka nRF52840 mikrokontrolleri olemasolu. Kasutades testseadet *flash*'iti tuvastatud tootele testimiseks kohandatud püsivara, pärast mida kontrolliti tootelt parameetrite küsimist. Selle käigus valideeriti, et ESP32 suudab toote püsivara edukalt hoiustada ning mälus on piisavalt ruumi, et talletada mitut püsivara versiooni. Lisaks anti tootele käsk püsida *deep sleep* režiimis, pärast mida mõõdeti magava seade voolutarvet. Mõõtmisi tehti SuperCounteri kahe versiooniga, millest ühe puhul oli voolutarbeks ligi 35uA ja teise puhul 43uA. Antud voolutarbe tulemused olid oodatud ning valideerimiseks korrati voolumõõtmist ettevõtte QOITECH Oti Arc Pro täppismõõtjaga [18], millest saadud tulemused olid samas suurusjärgus.

Peale tehtud testimisi leiti, et testseadme kontseptsioon töötab, kuid leidub süsteemi osasid mida järgmise versiooni tarvis edasi arendada ja testida. Näiteks oleks kasu mikrokontrolleri välisest ADC muundurist, mis annaks testseadmele täpsema voolumõõtmise tulemuse. Teiseks tuleks paika panna testseadme tehtud mõõtmiste piirmäärad ning läbi viia testimised erinevates keskkondades ja olukordades, et olla kindel testseadme usaldusväärsuses. Lisaks oleks mõistlik disainida testseadmele korrektne maandus, et vältida võimalikke ESD poolt põhjust probleeme.

Testimise lõpus nähti, et arenduse käigus korralikult läbimõeldud otsused ning süsteemi komponentide valideerimine ja testimine tagab palju meeldivama süsteemi lõpptestimise, sest probleemide tekkimise tõenäosus on oluliselt väiksem. Lõputöö ajaraamidesse ei mahtunud testseadmega SuperCounteri põhjalik testimine, kuid see polnud ka antud lõputöö eesmärk. Veenduti testseadme funktsionaalsuse olemasolus, seatud eesmärkide täitmisel ning leiti testseadme osad, mida järgmise versiooni puhul muuta ja täiustada.

5 Kokkuvõte

Lõputöö eesmärgiks oli luua Superhands OÜ-le spetsiaalse testseadme esimene versioon, mis võimaldaks toote SuperCounter testimist ning *flash*'imist. Spetsiaalse testseadme ülesandeks on suurendada SuperCounteri töökindlust, parandada funktsionaalsust ning tagada kokkupandud toodete kvaliteetne ja kiire testimine. Seatud eesmärkide saavutamiseks disainiti ESP32 mikrokontrolleril põhinev riistvara ja seadme mehaanika, mis ka telliti või toodeti ning viimaks komplekteeriti. Lisaks kirjutati valminud seadmele püsivara ja veebiliides, mis võimaldab kasutajal testseadet kontrollida ja selle abil toodet testida.

Töö algas lõputöö algolukorra, eesmärkide ning seadme ülesehituse paika panemisega, pärast mida algas arendustegevus. Testseadme arendus oli jaotatud kahenädalasteks sprintideks ning igal sprindil oli fikseeritud peamine teema ning oodatav vahetulemus. Pärast arenduse lõppu testiti valminud lahendust ning analüüsiti tehtud tööd.

Loodud lahendus on alles esimene versioon seega on sellel mitmeid võimalikke edasiarendusi järgmiste versioonide tarbeks. Täiustada annaks seadme täpsust ning testseadmele kohaselt tuleks põhjalikult veenduda selle poolt pakutavate andmete usaldusväärsuses ja täpsuses ning fikseerida seadme omadused ja parameetrid.

Kasutatud kirjandus

- [1] Segger. „Interface Description“. Vaadatud: 15.03.2024. [Online]. Available at: <https://www.segger.com/products/debug-probes/j-link/technology/interface-description/>
- [2] Segger. „Market leading development tools J-Link and J-Trace PRO“. Vaadatud: 15.03.2024. [Online]. Available at: <https://www.segger.com/products/debug-trace-probes/>
- [3] GitHub. „This software brings you the possibility to Read and Write the internal Flash of the Nordic nRF52 series with an ESP32“. Vaadatud: 24.03.2024. [Online]. Available at: https://github.com/atc1441/ESP32_nRF52_SWD
- [4] GitHub. „Async TCP Library for ESP32“. Vaadatud 20.03.2024. [Online]. Available at: <https://github.com/me-no-dev/AsyncTCP>
- [5] GitHub. „Async Web Server for ESP8266 and ESP32“. Vaadatud: 20.03.2024. [Online]. Available at: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer>
- [6] GitHub. „tinyCurrent“. Vaadatud: 18.03.2024. [Online]. Available at: <https://github.com/nfhw/tinycurrent>
- [7] Arm Developer Hub. „JTAG/SWD Interface“. Vaadatud: 09.03.2024. [Online]. Available at: <https://developer.arm.com/documentation/101636/0100/Debug-and-Trace/JTAG-SWD-Interface>
- [8] Nordic Semiconductor. „SWD interface“. Vaadatud: 09.03.2024. [Online]. Available at: https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fnwp_034%2FWP%2Fnwp_034%2Fnwp_034_swd_if.html
- [9] Espressif Systems. „ESP32-S3-DevKitM-1“. Vaadatud: 26.02.2024. [Online]. Available at: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32s3/hw-reference/esp32s3/user-guide-devkitm-1.html>
- [10] Espressif Systems. „ESP32-S3 Series Datasheet“. Vaadatud: 12.02.2024. [Online]. Available at: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf
- [11] Nordic Semiconductor. „nRF52840. Product specification“. Vaadatud: 08.03.2024. [Online]. Available at: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.7.pdf

- [12] JLC Mechanical Services. „PCB Manufacturing & Assembly Capabilities“. Vaadatud: 01.03.2024. [Online]. Available at: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities/>
- [13] Superhands OÜ. „Asjade interneti (IoT) tehnoloogia“. Vaadatud: 05.03.2024. [Online]. Available at: <https://superhands.ee/>
- [14] Altium. „CircuitStudio“. Vaadatud: 20.02.2024. [Online]. Available at: <https://www.altium.com/circuitstudio>
- [15] Solidworks. „Design tool“. Vaadatud 10.03.2024. [Online]. Available at: <https://www.solidworks.com/>
- [16] Espressif Systems. „ESP32 Series of Modules“. Vaadatud: 12.02.2024. [Online]. Available at: <https://www.espressif.com/en/products/modules/esp32>
- [17] Good Hand. „Horizontal Toggle Clamp Flat Base All Arm Types“. Vaadatud: 17.02.2024. [Online]. Available at: <https://www.goodhandclamps.com/Horizontal-Toggle-Clamp-Flat-Base-All-Arm-Types-GH-201-B.html>
- [18] Qoitech. „Otii Arc Pro“. Vaadatud: 19.02.2024. [Online]. Available at: <https://www.qoitech.com/otii-arc-pro/>
- [19] Mouser Electronics. „SSW-122-02-G-S-RA tooteleht“. Vaadatud: 02.03.2024. [Online]. Available at: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/200-SSW12202GSRA>

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Markus Visnapuu

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Testseadme disainimine ja komplekteerimine ettevõtte Superhands OÜ tootele", mille juhendaja on Peeter Ellervee
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

10.05.2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktile 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Lisa 2 – Lõputöö GitHubi repositoorium

Lõputööga seotud tarkvara ja 3D mudelid on kättesaadaval GitHubi repositooriumis, mis asub veebiaadressil <https://github.com/Viseksole/TestDevice>.