TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

# KONTAKTMOODULI TESTRI KONSEPSTIOONI JA PROTOTÜÜBI ARENDUS

## CONCEPT AND PROTOTYPE DEVELOPMENT OF A CONTACT MODULE TESTER

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Age-Iiris Rim

Üliõpilaskood 222975

Juhendaja: Margus Müür, Lektor

Tallinn 2025

# 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.

"02" juuni 2025.

Autor: .....
(allkirjastatud digitaalselt)

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

"02" juuni 2025

Juhendaja: .....
(allkirjastatud digitaalselt)

Kaitsmisele lubatud

"02"juuni 2025

Kaitsmiskomisjoni esimees .....
(allkirjastatud digitaalselt)

**Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks[1]**

Mina Age-Iiris Rim

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kontaktmooduli testri kontseptsiooni ja prototüübi arendus,

mille juhendaja on Margus Müür ja Ergo Pehtla,

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.

---

02.06.2025

[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 loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.*

## Mehaanika ja tööstustehnika instituut

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane**: Age-Iiris Rim, 222975EARB

**Õppekava, peaeriala:** EARB, Robootika

**Juhendaja(d):** Lektor, Margus Müür, 6203252

**Konsultant:** Ergo Pehtla, riistvara insener

Defendec, +372 55643526, ergo.pehtla@defendec.com

**Lõputöö teema**:

(eesti keeles) Kontaktmooduli testri kontseptsiooni ja prototüübi arendus

(inglise keeles) Concept and prototype development of a contact module tester

**Lõputöö põhieesmärgid**:

1. Disainida seade selleks, et tuvastada montaaži vigu kontakt mooduli tootmis protsessis.
2. Välistada testimise käigus inimvigade teket.
3. Testimise protseduur peaks olema võimalikult lihtne ja kiire.
4. Luua kontaktmooduli testri prototüübi kontseptuaalne lahendus.

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

| Nr | Ülesande kirjeldus | Tähtaeg |
|---|---|---|
| 1. | Testri nõuete spetsifikatsiooni kirjutamine | 02.03.25 |
| 2. | Komponentide valik ja põhjendus | 04.04.25 |
| 3. | Tehniliste jooniste ja skeemide koostamine | 18.04.25 |
| 4. | Tarkvara loogika kirjeldamine | 25.04.25 |
| 5. | Hinna analüüs | 16.05.25 |
| 6. | Võimalikud edasiarendused | 23.05.25 |
| 7. | Töö vormistamine | 01.06.25 |

**Töö keel:** Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "02" juuni 2025a

# SISUKORD

EESSÕNA ..... 6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU ..... 7
SISSEJUHATUS ..... 8
1.KOMPONENTIDE TESTIMINE JA AUTOMATISEERIMISE OLULISUS TOOTMISETTEVÕTETES ..... 10
1.1 Komponentide testimise tähtsus ..... 10
1.2 Automatiseerimise kasvav roll tootmisettevõtetes ..... 10
2.TESTITAV TOODE ..... 13
2.1 Kontaktmooduli kirjeldus ..... 13
2.2 Kontaktmooduli testimine ..... 13
2.3 Testri nõuete spetsifikatsioon ..... 15
3.TURU-UURING ..... 18
3.1 Multimeeter ..... 18
3.2 Kontaktitakistuse testrid ..... 19
3.3 Ettevõtted ..... 19
4.TESTRI ARHIDEKTUUR ..... 21
4.1 Mikrokontroller ..... 24
4.2 Jõutransistori moodul ..... 28
4.3 Klemmid ..... 29
4.4 Pistikud ..... 29
4.5 Püsivooluallikas ja jõutakisti ..... 30
4.6 Toiteplokk ..... 30
4.7 LED tuled ..... 32
4.8 Test käivitus lüliti ..... 32
4.9 Relee ..... 33
4.10 Sisendite ja väljundite kaitse ..... 34
4.11 Süsteemi plokkskeemi kirjeldus ..... 35
5.TARKVARA LOOGIKA ..... 37
6.KATSE STENDI MEHHAANILINE LAHENDUS ..... 39
7.HINNA ANALÜÜS ..... 41
8.VÕIMALIKUD EDASIARENDUSED ..... 44
KOKKUVÕTE ..... 45
SUMMARY ..... 46
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU ..... 47
LISAD ..... 50

# EESSÕNA

Käesolev lõputöö teema ,,Kontaktmooduli testri kontseptsiooni ja prototüübi arendus'' käsitleb kontaktmooduli testri väljatöötamist, mille eesmärk on tõhustada kontaktmoodulite testimist tootmisprotsessis. Töö keskendub kvaliteedikontrolli parendamisele ja testimise automatiseerimisele, et vähendada inimlike eksimuste mõju ning tagada usaldusväärne ja korduv mõõteprotsess.

Lõputöö koostati koostöös Defendec OÜ-ga (edaspidi Defendec), kus töö autor on töötanud toodete kvaliteedikontrolli meeskonna liikmena alates 2021. aasta oktoobrist. Nimetatud ettevõttes toimus ka praktiliste katsete läbiviimine ja lähteandmete kogumine. Eriline tänu kuulub Ergo Pehtlale, kelle teadmised ja praktilised nõuanded mängisid olulist rolli töö suunamisel ja tehniliste lahenduste kujundamisel.

Töö eesmärk on pakkuda tootmisettevõtetele rakendatav kontseptsioon ja prototüüp, mis võimaldab kontaktmoodulite kiiret ja turvalist testimist. Lõputöös käsitletakse testimisprotsessi nõudeid, komponentide valikut, skeemide ülesehitust, mikrokontrolleri kasutust ning prototüübi tarkvara- ja riistvara loogikat. Töös esitatud lahendus on suunatud reaalse tootmiskeskkonna vajadustele ning loob aluse edasisteks arendusteks.

Võtmesõnad: kontaktmoodul, testimine, kvaliteedikontroll, automatiseerimine, bakalaureusetöö.

# LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ADC – analoog-digitaalmuundur (ingl. *Analog-to-Digital Converter*). Seade, mis teisendab analoogsignaali digitaalseks väärtuseks.

DC/DC – alalisvoolu-alalisvoolu muundur (ingl. *DC-to-DC converter*)

DUT – testitav seade (ingl. *Device Under Test*). Komponent või süsteem, mida testitakse.

ESD – elektrostaatiline lahendus (ingl. *Electrostatic Discharge*). Äkiline elekrilaeng, mis võib kahjustada elektroonikat.

GSM – globaalne mobiilisidesüsteem (ingl. *Global System for Mobile Communications*). Standard mobiiliside ja andmeside jaoks.

LED – valgusdiood (ingl. *Light Emitting Diode*).

LSB – väikseim arvestatav bitt (ingl. *Least Significant Bit*). ADC puhul väikseim pingemuutus, mida muundur suudab eristada.

MCU – mikrokontroller (ingl. *Microcontroller Unit*).

MUX – multiplekser (ingl. *Multiplexer*). Elektroonika seade, mis võimaldab valida mitme sisendi hulgast ühe väljundi.

PCB – trükkplaat (ingl. *Printed Circut Board*).

PETG – glükooliga modifitseeritud polüetüleentereftalaat (ingl. *Polyethylene Terephthalate Glycol-modified*)

USB – universaalne jadaliides (ingl. *Universal Serial Bus*).

# SISSEJUHATUS

Tänapäeva tootmistööstuses on kvaliteedikontroll ja töökindluse tagamine muutunud olulisemaks kui kunagi varem. Eriti kriitiline on see elektroonikatööstuses, kus isegi üksik halb kontakt võib põhjustada seadme rikke, tootmise seiskumise või lõppkliendi jaoks kahjuliku olukorra. Seetõttu pööratakse järjest rohkem tähelepanu testimise ja kontrollsüsteemide täiustamisele, mis suudaksid kiiresti ja täpselt tuvastada kontaktivigu, lühiseid, vale polaarsusega ühendusi ning muid defekte enne, kui need jõuavad tootmisprotsessi järgmisesse etappi.

Käesoleva lõputöö eesmärk on arendada kontaktmooduli tester, mis võimaldab kiiresti ja usaldusväärselt tuvastada ühendusvigu, lühiseid ja vale polaarsust. Testri käivitamine toimub automaatselt hall-anduri ja magneti abil kaane sulgemisel, mis võimaldab testimist teostada kasutajasõbralikult ja kontaktivabalt. Süsteemi keskmes on mikrokontrolleri põhine loogika, mis juhib mõõteahelaid ja visuaalseid indikaatoreid.

Töö teema valik on seotud praktilise vajadusega luua töökindel ja taskukohane testimislahendus, millega saaks teostada kvaliteedikontrolli kontaktmooduli ühendustele. Uurimistöö käigus koostati elektroonika skeemi visioonlahendus, valiti sobivad komponendid ning kavandati mehhanism, mis võimaldab testi automaatset käivitamist.

Töö jaguneb kaheksaks peatükiks, milles käsitletakse kontaktide testimise vajadust, arendatava seadme arhitektuuri, komponentide valikut, tööpõhimõtteid, tarkvara ning prototüübi edasiarendamise võimalusi. Töös kasutati SolidWorks´i modelleerimiseks ja Draw.io-d elektriskeemide ja diagrammide tegemiseks.

Esimeses peatükis antakse ülevaade komponentide testimise ja automatiseerimise vajalikkusest. Teises peatükis kirjeldatakse kontaktmooduli ehitust ja seniseid testimismeetodeid, analüüsitakse nende puudusi ning selgitatakse välja testimisnõuete spetsifikatsioon automatiseeritud testrile. Kolmandas peatükis antakse ülevaade olemasolevatest võimalikest lahendustest ja nende puudustest. Neljandas peatükis käsitletakse elektroonilise lahenduse ülesehitust ja põhimõttelisi skeeme. Viiendas peatükis kirjeldatakse lahti tarkvaraloogika. Kuuendas peatükis keskendutakse mehhaanilisele ülesehitusele, kus on näha kogu seadme 3D mudel. Seitsmendas peatükis esitatakse hinnaanalüüs, kus võrreldakse käsitsi ja automaatse testimise

kulusid ning hinnatakse investeeringu tasuvust. Kaheksandas peatükis antakse soovitusi edasisteks arendusteks.

# 1. KOMPONENTIDE TESTIMINE JA AUTOMATISEERIMISE OLULISUS TOOTMISETTEVÕTETES

Tänapäeva tööstusmaailmas, kus konkurents on tihe, klientide nõudmised järjest kasvavad ning nendega koos kasvab ka toodete keerukus, omandab järjest olulisemat rolli toodete kvaliteedikontrolli protsesside efektiivsus ning töökindlus. Mida keerulisemad on tooted ning nende komponendid, seda suuremad on mitteautomatiseeritud kvaliteedikontrolli protsessidega seotud ohud inimlike vigade tõttu. Sestap võib väita, et testimise portsesside automatiseerimisel on oluline roll ettevõtte konkurentsivõime loomisel ning säilitamisel.

## 1.1 Komponentide testimise tähtsus

Komponentide testimine on tootmises vajalik kvaliteedi tagamiseks. Selle eesmärgiks on tagada, et kõik süsteemi kuuluvad osad vastaksid nõutud tehnilistele parameetritele, tagades lõpptootes soovitud omadused. Toodangu kvaliteet sõltub valmistamise täpsusest, koostamise korrektsusest ja komponentide töökindlusest. Seetõttu tuleb tooteid ja nende osi süstemaatiliselt kontrollida ja mõõta.

Kontrolli- ja mõõtesüsteem on üks tootmise olulisematest alamsüsteemidest, kuna see võimaldab tagada soovitud kvaliteeti, koguda infot reaalajas ja prognoosida võimalike tõrkeid. Tänapäeval on üha enam kasutusel automatiseeritud mõõtesüsteemid, mis kasutavad andureid, mõõtemasinaid ja mõõteroboteid, tagades sellega kiire ja täpse kontrolli [1].

## 1.2 Automatiseerimise kasvav roll tootmisettevõtetes

Tehnoloogia pidev areng on viimastel aastakümnetel oluliselt kiirendanud automatiseerimise levikut tootmisettevõtetes. Tööstuslik automatiseerimine hõlmab protsesside juhtimist ja infosüsteemide rakendamist eesmärgiga suurendada

tootlikkust, parandada kvaliteeti, vähendada kulusid ja saavutada maksimaalne paindlikus [2].

Automatiseerimise elluviimine ei ole lihtne, kuna suurem tootlikkus võib kaasa tuua kvaliteedi probleeme ning kulude alandamine võib pärssida töö efektiivsust. Oluline on leida tasakaal nelja kriitilise teguri vahel – tootlikkus, kvaliteet, kulu ja paindlikus. Nende tegurite tasakaalustamine võimaldab ettevõttel saavutada konkurentsieelise rahvusvahelisel turul. Paljud ettevõtted on tänu hästi planeeritud ja rakendatud automatiseerimisele saavutanud märkimisväärseid parandusi nii kvaliteedis kui tootlikuses [2].

Automatiseerimise kiire areng on saanud võimalikuks tänu tehnoloogilistele läbimurretele, milleks on: kiiremad ja usaldusväärsemad arvutid, tõhusam tarkavar, targemad seadmed ja parem võrgutaristu. Oluline on mõista, et automatiseerimise kasutuselevõttu ei suru peale tootjad, vaid hoopis lõppkliendid ja klientide kliendid, kelle ootused parema kvaliteedi, suurema valiku, madalama hinna ja kohese kättesaadavuse osas on muutnud automatiseerimise vältimatuks [2].

Tööstusautomaatika kasutajad ootavad süsteemidelt järjest rohkem. Lisaks protsesside täpsele juhtimisele ja kvaliteetsete tulemuste tagamisele peavad automaatikasüsteemid vastama ka järgmistele ootustele:

1. Süsteemi töökindel ning kuluefektiivne elutsükkel – kasutus, hooldus, varuosad.
2. Integreeritud arhitektuur – lihtne liidestamine, avatud standardite kasutus ja laiatarbe andmebaaside tugi.
3. Sujuv andmevahetus ettevõttesiseste muude infosüsteemiga.
4. Küberturvalisus.
5. Koosvõimelisus – süsteemid peavad olema lihtsasti omavahel seotavad, võimaldades erinevate osade omavahelist sujuvat koostööd.
6. Tootlikuse ja kasumlikkuse tõstmine.
7. Lühem tarneaeg ja kiirem süsteemide käivitamine.
8. Targad teenused – kaug-diagnostika, ennustatav hooldus ja tõrkeolukordade turvaline käsitlemine.
9. Lisandväärtust loovad teenused – madalad tootmiskulud, süsteemide skaleeritavus ja optimeeritud varude hooldus.
10. Väiksem omamiskulu ja minimaalne remontimisaeg [2].

Need nõudmised on sundinud automaatikasüsteemide tootjaid investeerima pidevasse arendus- ja teadustöösse, et pakkuda konkurentsivõimelisi ja tehnoloogiliselt uuenduslikke lahendusi. Tulemuseks on süsteemid, mis pakuvad:

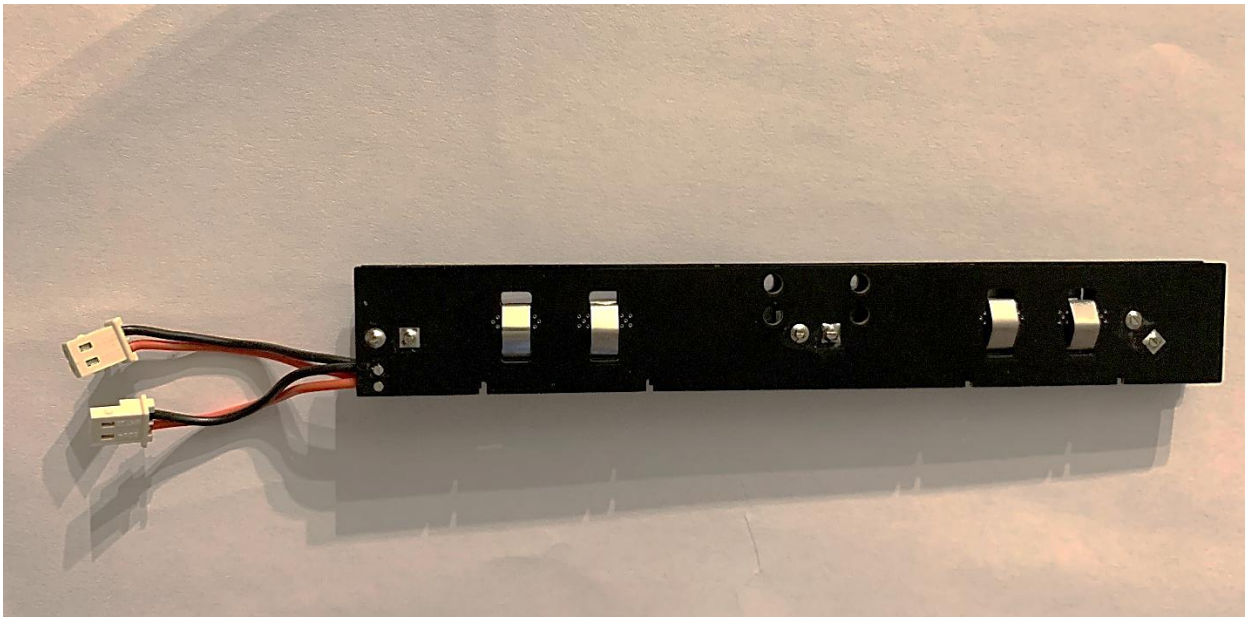
1. Järjepidevust – tarbijad ootavad sama kvaliteeti, olenemata asukohast.
2. Usaldusväärsust – iga ootamatus maksab tootjale märkimisväärselt, seega peab süsteem toimima tõrgeteta.
3. Madalamaid kulusid – tootmise optimeerimine peab toimuma ilma kvaliteedis järeleandmisi tegemata.
4. Paindlikkust – vajadus tootmisliine kiiresti ümber seadistada, et reageerida turu ja kliendi nõudmistele [2].

Tööstusautomaatika areng on olnud pikk tee alates lihtsatest käsitsi lülitavatest lülititest kuni keerukate, omavahel seotud ja iseõppivate süsteemideni. Selle arengu tulemusena on tänased tootmisettevõtted varustatud tehnoloogiaga, mis võimaldab neil konkureerida globaalsetel turgudel senisest tõhusamalt, kiiremini ja paindlikumalt [2].

# 2. TESTITAV TOODE

## 2.1 Kontaktmooduli kirjeldus

Kontaktmoodul (joonis 2.1) on trükkplaatidest tehtud kooste, mis ühendab akud omavahel tarbijaga. Antud juhul GSM (*Global System for Mobile Communications*) kontrolleriga. Kontaktmoodul ise ei oma ühtegi aktiivset elementi ega ka kaitseelemente. Kontaktmoodul paigaldatakse seadme korpusesse montaaži faasis, peale mida seda täielikult ei testita. Sellepärast on vajalik tagada toote kvaliteet välistamaks vale polaarsust ja ühendusvigu.

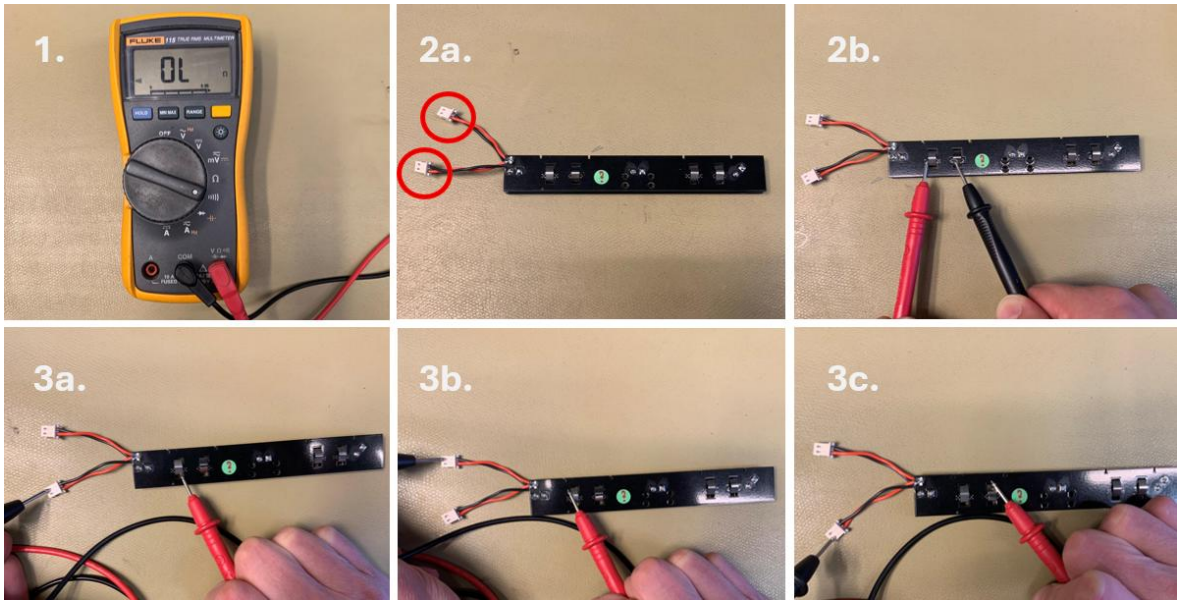


Joonis 2.1 Kontakt moodul.

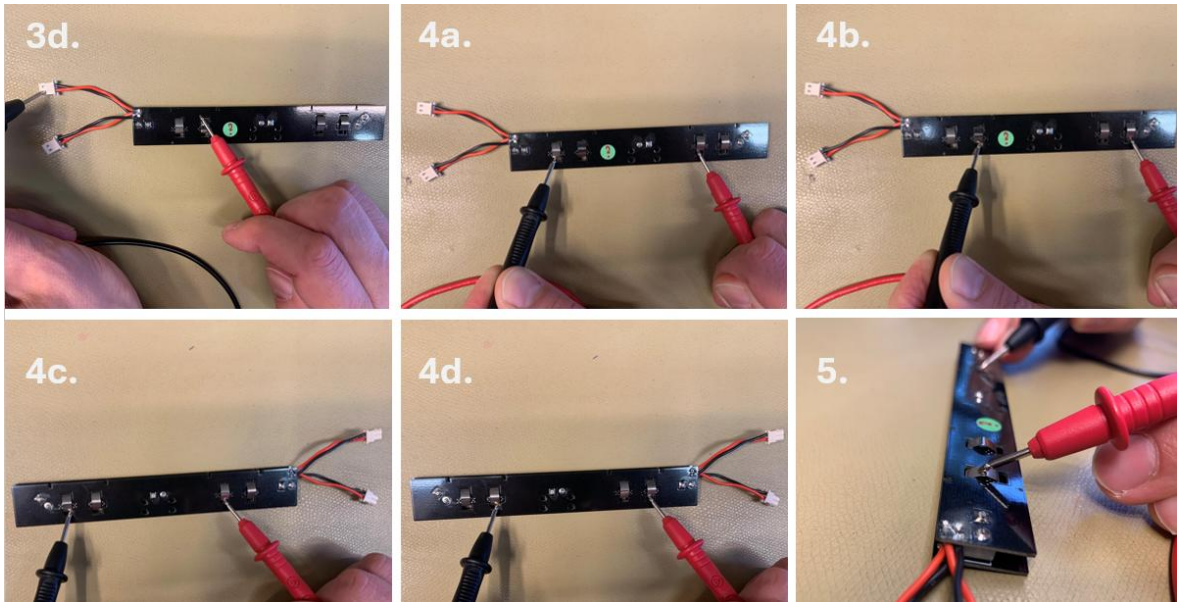
## 2.2 Kontaktmooduli testimine

Defendec on oma tootmises kontaktmooduleid kasutanud enam kui 10 aastat. Esialgselt testiti neid kas multimeetriga, sooritati visuaalne kontroll või jäeti komponent testimata.

Plaadi testimisel multimeetriga kontrolliti ühenduste olemasolu (joonised 2.2 ja 2.3). Visuaalse kontrolli puhul vaadati, kas ühendused olid olemas. Sellised testimise meetodid on ebatäpsed ja ei suuda kõiki võimalikke vigu tuvastada, nagu näiteks vale polaarsust või halvad ühendused.




Joonis 2.2 Kontakt mooduli testimine multimeetriga.




Joonis 2.3 Kontakt mooduli testimine multimeeriga.

Alljärgnevalt on kirjeldatud jooniste 2.2 ja 2.3 alampiltidel kujutatud testimise sammud:

1. Multimeeter pannakse katkemiskatse funktsioonile (continuity test) (1.).
2. Polaarsuse kontroll (2a., 2b.).
3. Pluss ja miinus klemmide lühiste kontroll (3a., 3b., 3d., 3c.).

4. Kontrollitakse pistikute pluss ühendust klemmiga (4a., 4b.). Kontrollitakse pistikute miinus ühendust klemmiga (4c., 4d.).
5. Klemmide joodete kontroll, ideaalis avaldatakse klemmile survet (5.).

## 2.3 Testri nõuete spetsifikatsioon

**Üldised nõuded:**

Nõue 1 – Seade peab olema lihtsasti kasutatav.

Nõue 2 – Tester peab vähendama inimlike vigade ohtu.

Nõue 3 – Testimine peab olema automatiseeritud.

Nõue 4 – Testimine peab olema kiirem, kui multimeetriga mõõtmisel.

Nõue 5 – Testimine peab olema testijale mugavam.

Kontaktmooduli testri arendamisel on üheks peamiseks eesmärgiks kasutajamugavus ning töökindluse tagamine. Selleks on oluline, et seadme kasutamine vajaks minimaalset ettevalmistust ja seda saaks kasutada tootmistöötajad ilma aeganõudva koolituseta. Kuna manuaalne komponentide kontrollimine on ajamahukas aitab automaatne testimisseade välistada inimlike vigu, mis võivad tekkida valede mõõtmiste või loetud tulemuste tõttu. Automatiseeritud testimine võimaldab korratavaid mõõtmisi ning vähendab sõltuvust testija oskustest. Komponentide kontrollimine käsitsi multimeetri abil on aeglane ja sõltub operaatori tähelepanelikkusest ning kiirusest. Kontaktmooduli automatiseeritud tester võimaldab sama testi läbiviimist kordades kiiremini. Lihtne seadistamine, visuaalne tagasiside ja automaatne käivitusprotsess muudavad seadme kasutamine mugavaks ka pikemaajalisel perioodil.

**Füüsilised nõuded:**

Nõue 1 – operaator käivitab testi ühe liigitusega.

Nõue 2 – testitav seade fikseeritakse kaanega.

Nõue 3 – Testitakse korraga ühte seadet.

Nõue 4 – Test algab automaatselt kaane sulgemisel.

Nõue 5 – Kaane avamisel peab test automaatselt lõppema.

Nõue 6 – Tester lõpetab testimise esimese vea tuvastamisel ja indikeerib seda vastavat värvi valgusdioodiga (edaspidi LED).

Nõue 7 – juhtmeotsas olevatele pistikutele on ettenähtud pesad testri pinnal.

Nõue 8 – süttib valge LED, kui testimise seade on töövalmis.

Nõue 9 – süttib kollane LED, mis indikeerib testi jooksmist.

Nõue 10 - süttib roheline LED, kui testimine on edukas.

Nõue 11 – süttib punane LED, kui test ebaõnnestus.

Nõue 12 – seadme ükski osa, mis on operaatorile ligipääsetav ei tohi ületada temperatuuri 45℃.

Nõue 13 – Testrit peab olema vajadusel võimalik igapäevaselt lihtsalt transportida.

Nõue 14 - Tester töötab toiteeploki abil.

Nõue 15 - Toiteplokk peab olema ühendatud USB-ga (*Universal Serial Bus*).

Kontaktmooduli testri konstruktsioon ja tööpõhimõte peavad toetama kiiret, ohutut ja efektiivset testimisprotsessi ja selleks on määratud mitmed füüsilised nõuded. Kogu testimisprotsess peab olema käivitatav ühe lihtsa liigutusega, et aega säästa. Testitav toode peab olema usaldusväärselt kaanega fikseeritud, et tagada kontaktide stabiilne ühendus. Selleks, et tagada mõõtmiste täpsus ja välistada mitme seadme omavahelisi häireid, peab tester olema projekteeritud selliselt, et testida saab korraga ühte moodulit. Kasutusprotsessi lihtsustamiseks ja kiirendamiseks peab test algama automaatselt kaane sulgedes. Testimise turvalisuse tagamiseks peab test lõppema automaatselt kaane avamisel. Selleks, et vältida ajakulu lõpetab süsteem testimise kohe esimese tõrke korral ning indikeerib vea olemasolu punase LED-iga. Valge LED indikeerib operaatorile, et tester on füüsiliselt töökorras ja valmis testimise alustamiseks. Kollane LED indikeerib operaatorile, et mõõtmine on aktiivne ning operaator peaks ootama testimise lõppu. Eduka testimise korral aktiveerub roheline LED, mis näitab, et testitav toode vastab kvaliteedinõuetele. Kui testimise käigus aktiveerub punane LED, siis see indikeerib, et moodul vajab parandust või tagasilükkamist. Ohutusnõuete täitmiseks ei tohi testri ükski pind, mis on operaatorile ligipääsetav ületada 45℃. Seade peab olema kompaktne ja kerge, et seda saaks vajadusel töökohtade vahel liigutada. Seade peab töötama stabiilsest toiteallikast, mis võimaldab ühtlast ja töökindlat funktsioneerimist. Lisaks tagab see, et testimine ei katkeks aku tühjenemise või pinge kõikumise tõttu. Toiteploki ühendus peab toimuma

USB kaudu, mis võimaldab laialdast kättesaadavust ja universaalset toiteviisi, lisaks toetab see võimalust, et seadet saab toita otse arvutist.

**Testimis nõuded:**

Nõue 1 – Testitakse klemmi ühenduvust teiste klemmidega samas ahelas.

Nõue 2 – Testitakse klemmi ühenduse kvaliteeti kasutades voolu 1 A ning mõõdetakse pinge langu, mis ei tohi ületada 100 mV.

Nõue 3 – Testitakse lühiste puudumist pluss ja miinus ahelate vahel.

Kontaktmooduli tester on seade, mis on loodud testima kahe juhtme paari ja 8 klemmi ühendust. Üheks oluliseks osaks on kontrollida klemmide vahelise elektrilise ühenduse olemasolu. See tähendab, et kõik ühte vooluahelasse kuuluvad klemmid peavad olema omavahel ühendatud. Selleks rakendab tester kontrollpinget või voolu ühele klemmile ning mõõdab seda ülejäänud ahelas. Kõrgenenud takistus või katkenud ühendus viitab kontaktprobleemile. Kuna ühenduse olemasolu ei taga mooduli töökindlust, siis kontrollitakse ka ühenduse kvaliteeti. Voolu 1 A rakendamine testimise käigus aitab tuvastada nõrku kontakte, mis võivad kõrge koormuse all põhjustada pingelangu. 100mV on seatud pingelangu ülempiiriks, sellest kõrgem väärtus viitab kehvale ühendusele. Selleks, et vältida seadme kahjustusi tuleb kontrollida, et pluss ja miinus ahelate vahel puudub elektriline lühis. See tähendab, et polaarsuste vaheline takistus peab olema piisavalt suur, et tõendada nende isoleeritust.

# 3. TURU-UURING

## 3.1 Multimeeter

Multimeetri (joonis 3.1) kasutamine kontaktmooduli testimiseks on näiliselt küll lihtne lahendus. Seade ei ole ka ülearu kulukas, töökindlate multimeetrite hinnad algavad 50 eurost ja võivad ulatuda kuni 500 euroni. Samas aga on sellise testimise protsessiga seotud erinevad täiendavad kulud, kuna selle seadmega testimine eeldab mitme sammu käsitsi korrektset teostamist, mis muudab testimise protsessi ebaefektiivseks ning veaohtlikuks. Näiteks testija unustab mõne sammu korrektselt teostamata ning seetõttu väljub tootmisest ebakvaliteetne lõpptoode. Sellega omakorda kaasneb kliendi rahulolematus, mainekahju ning toote garantiiga seonduvad kulud.

Kontaktmooduli testimise automatiseerimine aitab tõhustada testimise protsessi kvaliteeti ning seeläbi vähendada vigaste toodete jõudmist lõppkliendini.

Joonis 3.1 Multimeeter [3].

## 3.2 Kontaktitakistuse testrid

JYL Contact Resistance Tester (joonis 3.2), on loodud madala kontaktitakistuse mõõtmiseks, et tagada elektriliste ühenduste kvaliteet. Need seadmed kasutavad suuremat testvoolu kuni 100A. JYL testri eeliseks on kõrge mõõtetäpsus ja sobivus tööstuslike ühenduste testimiseks, kuid selle kasutamine väikese vooluga PCB-de (*Printed Circut Board)* puhul võib olla piiratud, kuna testvool võib olla liiga suur ja seade on kallis (seadme hind võib ulatuda mõne tuhande euroni). Lisaks puudub seadmel antud ülesande jaoks vajalik automatiseerimise võimekus [4].

Joonis 3.2 JTL kontakttakistuse tester [4].

## 3.3 Ettevõtted

Mitmed ettevõtted toodavad testimise erilahendusi, nagu näitseks Saksamaa ettevõte INGUN, kuid sellised eritellimusel valmistatud testimisrakised (joonis 3.3) on suunatud pigem suuremahulistele tootmisettevõtetele, kuna erilahenduste väljatöötamine kolmanda osapoole poolt on väga kulukas. Testri erilahenduse tootmise hinnad algavad kümnetest tuhandetest eurodest, millele lisanduvad tellija poolsed arenduskulud [5].

Defendeci laadsete väiketootjate jaoks on sellised testrakiste hinnad kuluefektiivse tootmise tagamiseks ebamõistlikud.

Joonis 3.3 Eritellimusel toodetud testimisrakise näidis [5].

# 4. TESTRI ARHIDEKTUUR

Enne testri disaini alustamist sooritati katse toimiva testitava seadmega. Katse vajadus tulenes sellest, et antud tootel puudub varasemalt koostatud ja dokumenteeritud disaini spetsifikatsioon, mistõttu ei olnud võimalik lähtuda täpsetest tehnilistest andmetest. Tüüpiliselt jäävad kontaktide takistused mitme A voolude puhul alati kümnetesse milli-oomidesse. Suuremate takistuste puhul eralduks liigselt soojust mis põhjustaks plastikdetailide deformatsiooni. Kui kontaktide takistus jääb alla 100 milli-oomi, siis keskmise voolu juures 1 A eraldub võimsus 100 mW. Kuna seadmes on paralleelselt 4 akut siis maksimaalne teoreetiline eralduv võimsus oleks 25 mW klemmi kohta. Antud toode ei tarbi keskmist voolu rohkem kui paarsada mA. Joonisel (4.1) on näha katse üles seadistus.

Katses kasutati laboratoorset toiteplokki (Agilent E3631A), millele seadistati voolu piirang 1 A ja pingeks 5 V. See ühendati krokodilliühendustega testitava seadme külge. Samadesse punktidesse ühendati ka multimeeter (Keithley 2015 THD) pinge mõõtmiseks.
Katse tulemused näitasid, et mõõdetava ahela takistus jäi vahemiku 30-55 milli-oomi mõõteahel koosnes $0{,}70\text{mm}^2$ vaskjuhtmetest kogupikkusega 40 cm, mille arvutuslik takistus on:

$$R = \rho \frac{l}{S} \qquad (4.1)\ [6]$$

Kus $R$ – takistus Ω;
$\rho$ – eritakistus;
$l$ – juhi pikkus m;
$s$ – juhi ristlõike pindala $m^2$ [6];
Vase eritakistus on 20 ℃ juures $1{,}724 \times 10^{-8}\, m\Omega$ [7].

$$R = 1{,}724 \times 10^{-8} \times \frac{0{,}4}{0{,}75 \times 10^{-6}} = 9{,}195 \times 10^{-3} \approx 9{,}20\, m\Omega \qquad (4.2)$$

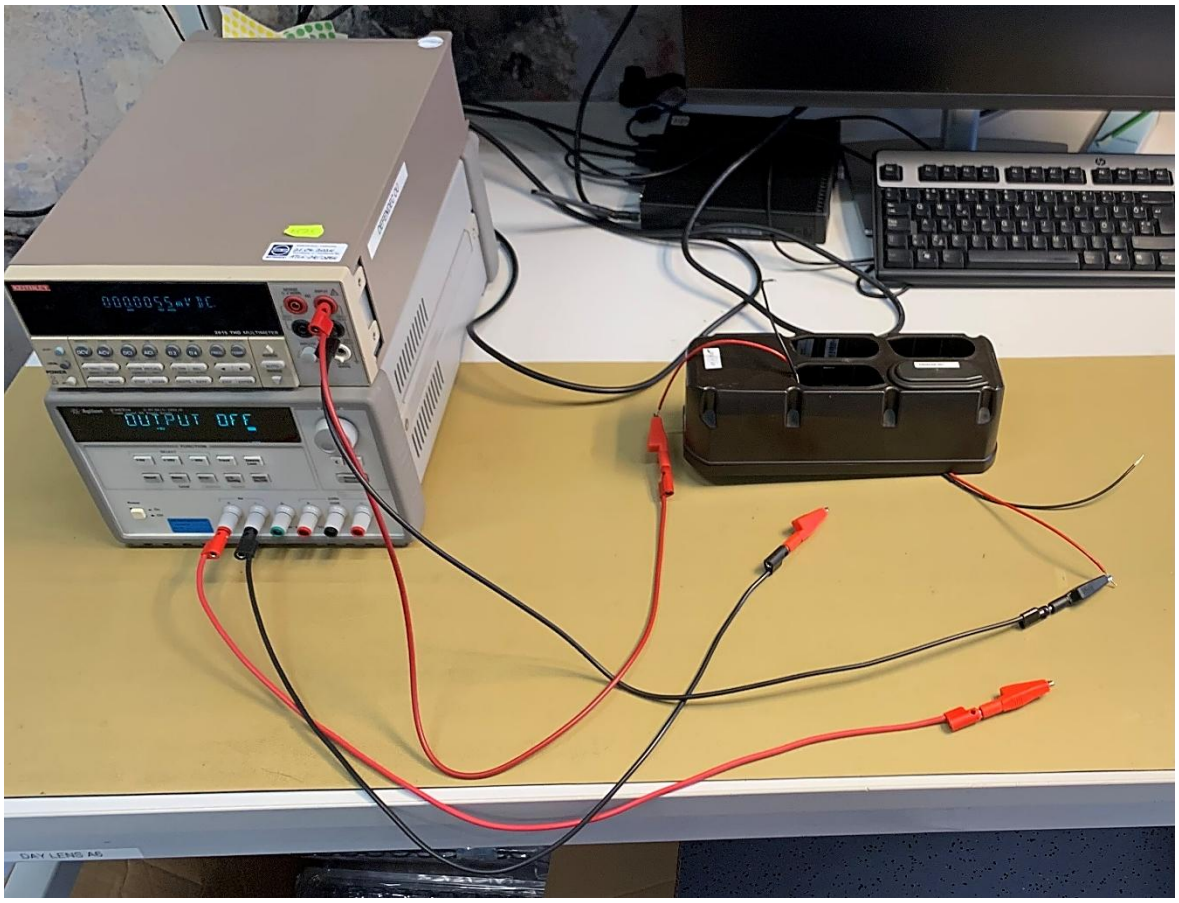
Seega kontaktide takistus, mis saadakse kogutakistusest juhtmetakistuse lahutamisel, jääb vahemikku:
Min:

$$30\ m\Omega - 9{,}20\ m\Omega\ = 20{,}80\ m\Omega \tag{4.3}$$

Max:

$$55\ m\Omega - 9{,}20\ m\Omega = 45{,}80\ m\Omega \tag{4.4}$$

Seega kontaktide takistus jääb vahemikku 20,80-45,80 milli-oomi.



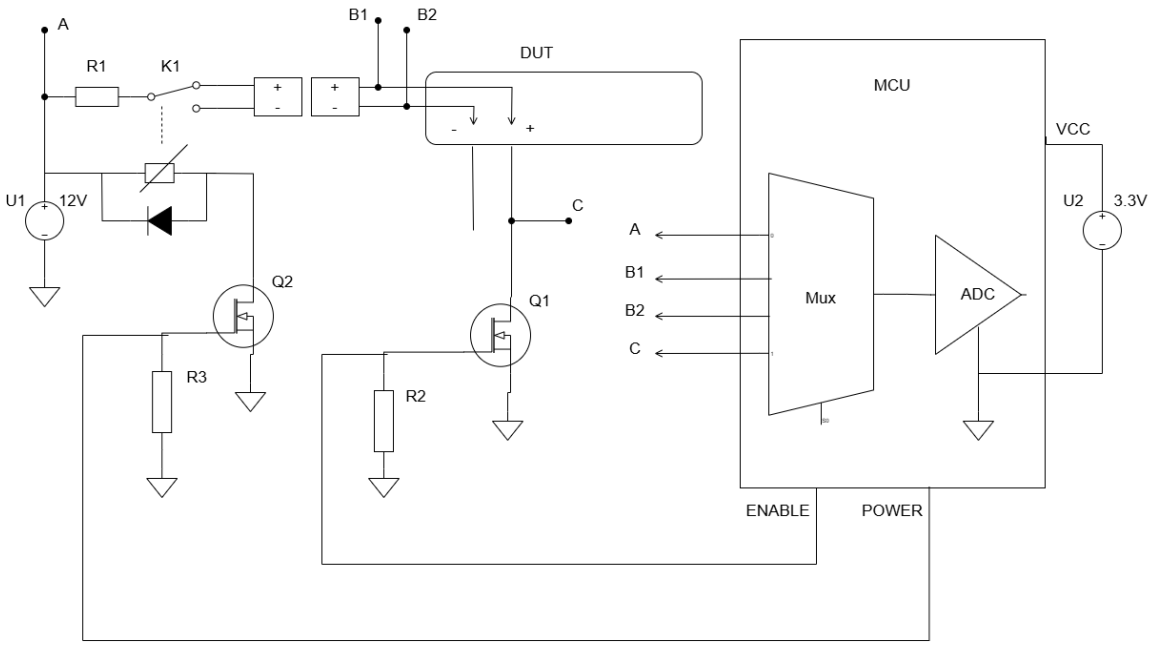
Joonis 4.1 Katse.

Testri disainimisel võeti aluseks (joonis 4.2) põhimõtte skeem.
Testri peamisteks elementideks on:

- Pseudo püsivoolu allikas, koosneb pingeallikast U1 ja takistist R1.
- Transistor Q1, mida juhitakse mikrokontrolleri digitaalse väljundiga "ENABLE", sulgeb vooluahela klemmide takistuse mõõtmiseks.
- Transistor Q2, mida juhitakse mikrokontrolleri digitaalse väljundiga "POWER", juhib releed K1. See võimaldab pinget suunata kas pluss või minus ahelasse.
- Kui pingestatud on pluss ahel ja Q1 on ''off'' asendis peab punktis B1 olema 12 V. Kui B1 punktis pinge puudub võib tegu olla pistikupesa monteerimis veaga.
- Kui pistiku montaaži korrektsus on kontrollitud, ning rakendada Q1 peab pinge langema punktis B1 millivoltide piirkonda. Kui see on nii saab mõõta B1 ja C

punkti vahelise pingelangu ning arvutada kontaktide takistuse. Kui punktis B1 pinge ei langenud peale Q1 rakendumist on tegu kontaktmooduli montaaži veaga.

- Kui pingestatud on miinus ahel, kuid punktis B1 mõõdetakse +12V võib tegu olla kas pistiku monteerimisveaga või lühisega pluss ja miinus ahela vahel. Selleks, et kinnitada lühise olemasolu mõõdetakse punkti B2 (seal on samuti +12 V).
- Kui pingestatud on pluss ahel ja Q1 on välja lülitatud ning punktides B1 ja B2 pinge puudub võib tegu olla pistiku montaaži veaga, kus juhtmeots on jäetud isolatsioonist puhastamata. Sama moodi saab testida ka miinus ahelat samas relee asendis.
- Pingete mõõtmiseks punktides A, B1, B2 ja C kasutatakse ADC-d (*Analog to Digital Converter*), mis on integreeritud mikrokontrollerisse ja omab sisendis multiplekserit (MUX). See võimaldab ühte ADC-d kasutada erinevate ahelate mõõtmiseks ilma välise ümberlülitus skeemita.



Joonis 4.2 Põhimõtte skeem.

Oluline on märkida, et käesolev põhimõtteskeem illustreerib vaid ühe testitava ahela mõõtmise printsiipi. Tegelikus süsteemis, arvestades testitava seadme keerukust ja vajadust mõõta mitut kontakti paralleelselt, oleks reaalses rakenduses vajalik oluliselt detailsem skeem. Kuna antud töö keskendub kontseptsiooni ja prototüübi tasandi demonstratsioonile on lihtsustatud põhimõtteskeem piisav illustreerimaks testeri funktsionaalseid aluspõhimõtteid.

## 4.1 Mikrokontroller

Testri arendamisel on oluline järgida lihtsuse ja kättesaadavuse põhimõtteid nii riistvara kui ka tarkvara tasandil. Valitud komponentide ühendamine ning nende programmeerimine peaks olema võimalikult lihtne ja intuitiivne. Seetõttu eelistatakse mikrokontrollereid ja arendusplatvorme, millel on olemas ulatuslik kasutajaskond, hea dokumentatsioon ja kergesti kättesaadavad näidiskoodid. Sellistele tingimustele vastavad näiteks Arduino, STM32 arendusplaadid, Raspberry Pi, BeagleBone ning ESP32 mikrokontrollerid. Samuti on olemas kasutajasõbralikud tarkvaraplatvormid Texas Instruments´i ja NXP kontrolleritele. Antud prototüübi arendamise juures, kus kasutatakse ainult ühte mõõtekanalit ei ole väga palju piiranguid, millist konkreetset arendusplatvormi kasutada, sest enamusel on vähemalt 3 ADC sisendit ja piisavalt jõudlust, et täita vajalike ülesandeid. Tõenäoliselt ainukene suurim piirang valiku tegemisel ongi ADC parameetrid. Seda eeldusel, et valikusse võetakse ainult ARM mikrokontrollerid, millel on vähemalt 32 bitti andmesiini laiust. See on tänapäeval väga tavaline arhitektuur, kuigi eksisteerivad ka 8 bitised mikrokontrollerid. Nende kasutusala on peamiselt masstoodangutes, kus on iga kokkuhoitud sent oluline.

**Integreeritud ADC**

ADC-ga voolu ja pinge mõõtmisel tuleb kasutada pinge jagurit pingete puhul mis on suuremad ADC sisendile lubatud pingest. ADC sisendpinge ei tohi ületada referent pinget. Olenevalt mikrokontrolleri tüübist võib referentspinge olla kokku ühendatud toite pingega, ühendatud sisemise referentsi külge või referentspinge antakse mikrokontrollerile väljastpoolt (väline referentspinge allikas on vajalik). DUT kontaktide pingelangu mõõtmisel, võttes arvesse, et kontakttakistus on mõned (NB sõltub juhtme takistusest) milli-oomid, tuleb mõõta mõndadesse millivoltidesse ulatuvad pinged. Absoluutse miinimum kontaktitakistuse mõõtmine ei ole oluline, kuna me soovime tuvastada ainult vigu mitte kaardistada absoluutväärtusi. Disainis püüame saavutada maksimaalse takistuse mõõtmise piiri kuni 500 milli-oomi. Kui me tahame, et ADC sisendpinge on kuni 0,5 V tuleb, kas ADC referents pinge valida samas suurusjärgus või kasutada eelvõimendit. On olemas ka mikroprotsessoreid millel on valikus sisemisi referentse erinevate pingetega. Näiteks 1024 mV referentsi ning 10 bitt ADC puhul oleks LSB (*Least Significant Bit*) väärtus 1 mV, mis vastaks nõuetele. 12 bitise ADC puhul samasuguse referentsiga oleks LSB väärtus 0,25 mV. Tegelik ADC konfiguratsioon selgub peale konkreetse mikrokontrolleri valikut.

LSB tähistab väiksemat võimalikku pingesammu, mida ADC suudab eristada. See on seotud valitud referentspingega ning ADC resolutsiooniga ja määrab mõõtmise täpsuse. LSB väärtust arvutatakse järgmise valemi abil:

$$LSB = \frac{Vref}{2^n} \quad (4.1)\ [8]$$

Kus:

$Vref$ — $ADC\ referentspinge$;

$n$ — $ADC\ resolutsioon\ (bitid)$;

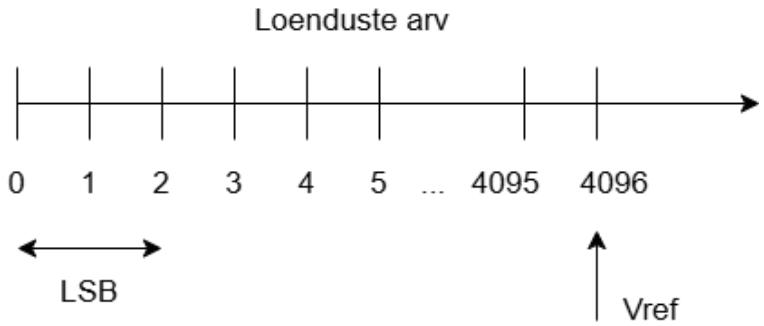
Kui $V_{ref} = 1{,}024\ V$ ja ADC resolutsioon on 10 bitti:

$$LSB = \frac{1{,}024}{2^{10}} = \frac{1{,}024}{1024} = 1mV \quad (4.2)$$

Kui sama referentspinge juures kasutatakse 12-bitist ADC-d:

$$LSB = \frac{1{,}024}{2^{12}} = \frac{1{,}024}{4096} = 0{,}25mV \quad (4.3)$$

All olev joonis illustreerib, kuidas ADC teisendab analoogpinget digitaalseks väärtuseks, kasutades selleks astmelist loendurit 0-st kuni maksimaalse väärtuseni. Iga samm selles vahemikus vastab ühele LSB-le, mis on väikseim pingemuutus, mida ADC suudab eristada. Nagu alloleval joonisel (4.3) näha siis 12-bitise ADC ja 1,024 V korral jaguneb kogu mõõtevahemik 4096 sammuks, kus iga samm ehk LSB on 0,25 mV.




Joonis 4.3 LSB graafik 12-bitise ADC korral.

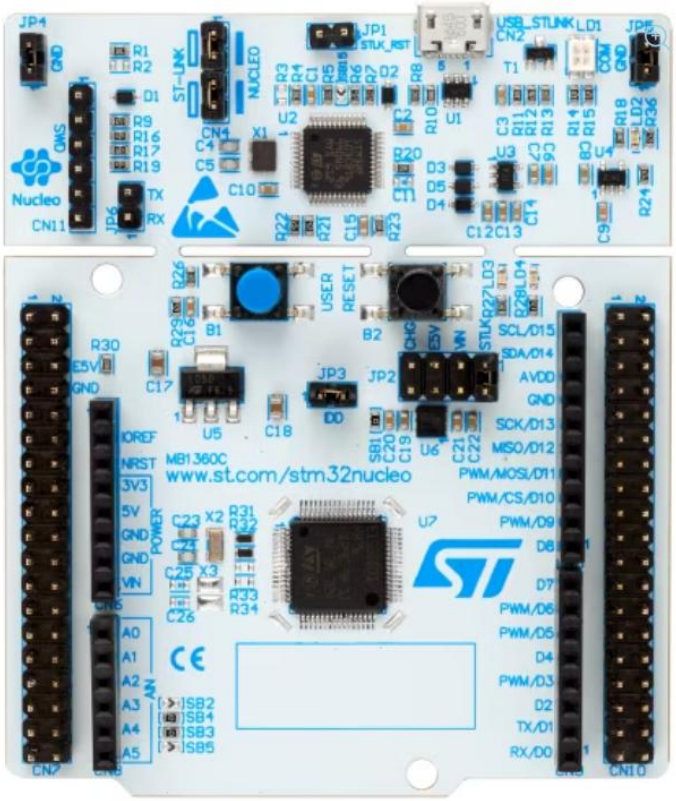
Tabelis (4.1) on toodud mõned näited mikrokontrolleri arendusplatvormidest, mis võiksid sobida antud projekti.

Tabel 4.1 Mikrokontrolleri kittide võrdlus [9], [10], [11].

| **Nimi** | STMicroelecttonics/<br>STM32 Nucleo-64 boards | Texas Instruments/<br>LP-MSPM0L LaunchPad™ | Raspberry Pi 3 Model B+ |
|---|---|---|---|
| **Arendus platvorm** | STM32 NUCLEO-G071RB (STM32G071RBT6) | MSPM0L1306 M0+ MCU platvorm | Raspberry Pi 3 Model B+ koos Raspberry Pi OS-i ja Linux tööriistadega |
| **Näidiskoodide olemasolu** | Jah | Jah | Jah |
| **Programmeerimis keel** | C/C++ keel, kasutades STM32CubeIDE | C/C++ keel, kasutades Code Composer Studio | C/C++ , Python, Java, JavaScript, Scratch. Raspberry Pi OS |
| **Programmaator** | Integreeritud ST-LINK/V2-1 programmaator | Integreeritud XDS110 programmaator | Ei ole vaja, kasutatakse mikro SD kaarti |
| **Hind, €** | 11 | 15 | 30 |

Valituks osutus STM32 Nucleo-64 (joonis 4.4), kuna see vastas projekti nõuetele ning vastav arendusplaat ja tarkvara (STM32CubeIDE) olid juba olemas. Platvorm pakub rohkelt näidiskoode, sisseehitatud programmeerijat ning tuttavat arenduskeskkonda. Texas Instrumentsi LaunchPad™ platvormiga puudub varasem kokkupuude, mistõttu oleks sellega tutvumine eeldanud täiendavat õppimist ja ajakulu. Raspberry Pi sobib

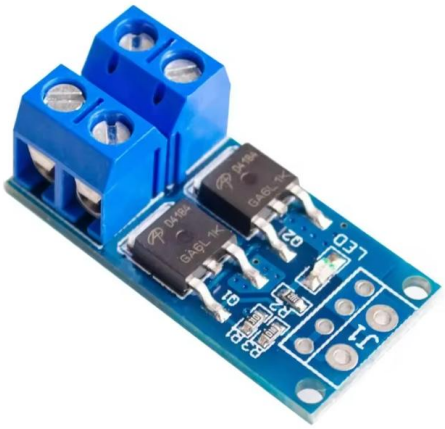
paremini keerukamate rakenduste jaoks, ning antud projekti kontekstis oli STM32 tehniliselt ja praktiliselt sobivam valik.




Joonis 4.4 STM32G071RB Nucleo-64 arendusplaat [9].

## 4.2 Jõutransistori moodul

Selleks et juhtida DUT-i (*Device Under Test*) voolu 1 A-ga on vaja seda lülitada jõutransistoriga. Praktilisuse huvides on kõige lihtsam kasutada jõutransistori moodulit, mille saab otse ühendada mikrokontrolleri plaadiga ilma vajaduseta lisajooniste või keerukate skeemide järele. Mooduli väljundid võiksid olla varustatud kruviklemmidega, mis tagavad kindla ja hõlpsasti teostatava ühenduse (joonis 4.5).



Joonis 4.5 Jõutransistori moodul [12].

## 4.3 Klemmid

DUT-iga kontakti loomiseks kasutame jäiku vasklehest kontakte. DUT-i klemmi deformatsiooni määr imiteerib seadmes olevat.

Seadmes tuvastati, et aku ja kontaktmooduli vahe on 2,4 mm. Kompressioon jaguneb võrdselt aku ja kontaktmooduli klemmide vahel. Testris kompresseeritakse kontaktmooduli vedrukontakte 1,2 mm jagu mõlemal kontaktmooduli küljel.

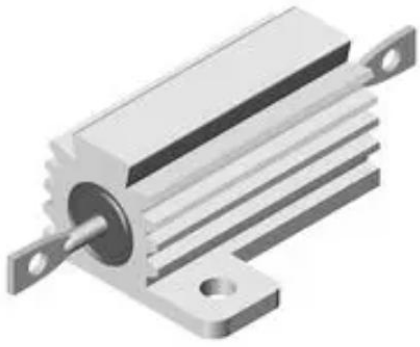
## 4.4 Pistikud

DUT-i ühendamiseks testriga kasutatakse juhtmeotstes olevaid pistikuid (joonis 4.6), millele vastavad pesad on kinnitatud eraldiseisvale vahetatavale plaadile. Selline lahendus võimaldab kiirest hooldust ja komponentde asendamist juhul, kui ilmneb kontaktide mehaaniline väsimus või riknemine.

Joonis 4.6 pistik [14].

## 4.5 Püsivooluallikas ja jõutakisti

1 A Voolu seadmiseks peaks ideaalis kasutama püsivooluallikat, kuid lihtsuse mõttes saaks ka kasutada voolupiiramiseks jõutakistit (joonis 4.7), kuna kontaktide takistus jääb milli-oomide piirkonda on see lihtsasti teostatav. Selleks, et teostada kontakti takistuse mõõtmist voolu piirava takistiga tuleb mõõta pinge lang sellel takistil ja kontaktidel. Takisti takistuse ja pingelangu teadmisel saame välja arvutada ahelat läbiva voolu, voolu teades saame arvutada välja kontaktide takistuse teades neil pinge langu. Kuna voolupiirava takistuse täpsus ei ole ülihea tuleb testri koostamisel selle takistus mõõta täpismultimeetriga ning lisada see väärtus konstandina tarkvarasse.



Joonis 4.7 Jõutakisti [15].

## 4.6 Toiteplokk

Toiteplokki (joonis 4.8) valikul tuleb lähtuda summaarsest voolutarbest ja sobivaimast pingest. Teades, et ADC mõõdab kontaktide pingelangu vahemikus kuni 1 V siis jõutakistil olev pingelang võiks olla suurusjärgus suurem. Seega võiks sisendpingeks valida 12 V ning võimsustakistiks 12 oomi.

Joonis 4.8 Toiteadapter [16].

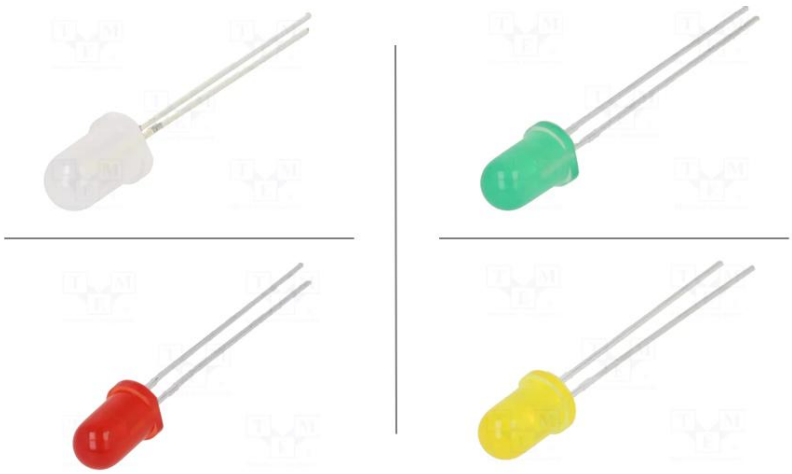
Mikrokontrolleri Arenduskitt toitub USB toitest seega on kaks valikut kuidas seda toita. Kasutada eraldi USB toiteadapterit või muundada 12 V pinget 5 V pingeks eraldiseisva toitemuunduriga. Viimase variandi eelis on see, et on ainult üks toiteplokk, mida ühendada vooluvõrku. Võimaliku toitemuunduri näidis on joonisel (4.9).

Joonis 4.9 Toitemoodul [17].

## 4.7 LED tuled

LED-ide juhtimiseks on vajalik väike vool suurusjärgus 5 mA, mida saab voolupiirava takisti abil otse mikroprotsessori väljunditest. LED-d (joonis 4.11) paigutatakse LED pessa (joonis 4.10), mis monteeritakse omakorda testri külge.

Joonis 4.10 LED pesa [18].

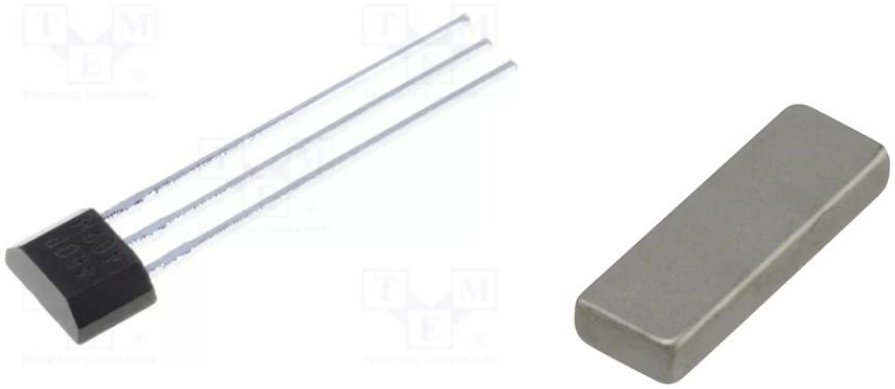


Joonis 4.11 Valge, roheline, punane ja kollane LED [19], [20], [21], [22].

## 4.8 Test käivitus lüliti

Testi käivitus lülitina kasutatakse halli andurit ja magnetit (joonis 4.12). Katse tulemusel peab ligikaudu 400 g kompresseerima kontaktmoodulit, et klemmidele piisavalt survet avaldada joodete kontrollimiseks. Peale prototüübi valmistamist tuleb antud parameeter üle kontrollida ja korrigeerida.

Magnet N35 neodüümium plokkmagnet 7,9 mm x 15,9 mm x 7,7 mm. Lisaks on vaja 0,5 mm - 1,5 mm paksust terasplaati, mis suunaks hästi magnetvälja.



Joonis 4.12 Paremal pool magnet, vasakul pool hall andur [23], [24], [25].

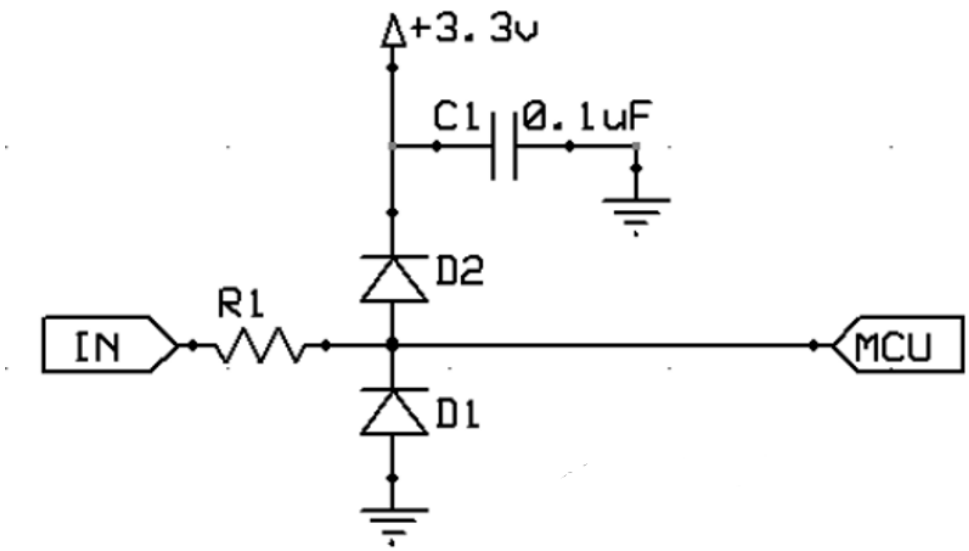
## 4.9 Relee

Pluss ja miinus ahela vahel lülitamiseks on lihtsam kasutada elektromagnet alalisvoolu releed (joonis 4.13). Selleks sobib 12 V juhtpingega ja vähemalt 1 A kontaktide reitinguga relee. Valitud relee on üks odavamaid, kergelt leitav tüüp ja oluliselt paremate parameetritega kui tarvis.

Joonis 4.13 Relee [26].

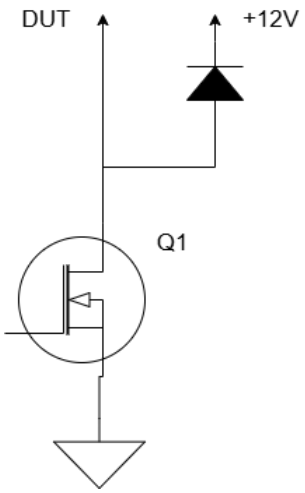
## 4.10 Sisendite ja väljundite kaitse

Et vältida ADC sisendite kahjustamist olukorras, kus sisendpinge ületab mikrokontrolleri lubatud piiri, kasutatakse kaitset. Punktid B1, B2 ja C ühendatavad ADC kanalid vajavad kaitse skeemi. Ülepinge ja ESD (*Electrostatic Discharge*) kaitse põhimõtte skeem on joonisel (4.14). Takisti R1 väärtus võiks olla 5,1 kilo-oomi, see piiraks maksimaalse voolu läbi kaitsedioodide alla 5 mA. Dioodid D1 ja D2 võiks olla päripingelanguga 0,3 V, et välistada ülepingetekitatud voolu juhtimist mikrokontrollerisse (näiteks BAT721S [27]). Punkti A ühenduv ADC kanal ei vaja ilmtingimata kaitse skeemi, kuna see ei ole otseses ühenduses DUT-ga kuid ESD immuunsuse huvides võiks seda kasutada ka seal. Antud tester on kasutuses ESD suhtes kaitstud keskkonnas seega ei ole ESD kaitse otseselt nõutud.




Joonis 4.14 Kaitseskeem.

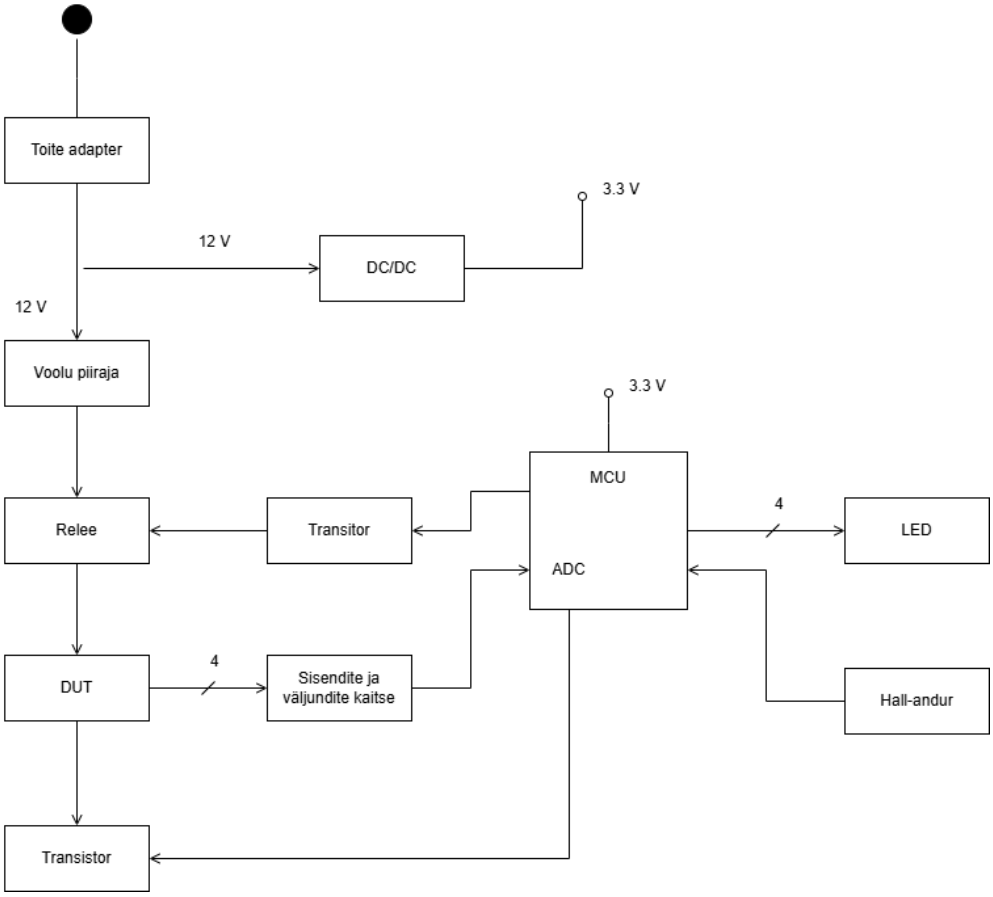
Mosfeti Q1 puhul on kriitiliseim võimalik variant otsene ühendus toitepingega, mis antud juhul pole võimalik, kuna toitepinge on alati ühendatud ainult läbi jõutakisti. Et kaitsta mosfeti väljundit induktiivsete ülepingete eest sinna ühendada dioodi mille katood ühendub 12 V toitepingesse (joonis 4.15). Mosfeti kaitseks sobib tavaline ränidiood, mille lubatud vastu pinge >30 V ja pärivool 500 mA. Q2 kaitsediood on juba põhimõtte skeemil ja sobib sama diood mis on Q1 puhul.




Joonis 4.15 Kaitseskeem transistorile.

## 4.11 Süsteemi plokkskeemi kirjeldus

Allolev plokkskeem (joonis 4.16) kirjeldab kontaktmooduli testri elektroonilise süsteemi arhitektuuri. Skeem illustreerib põhiliste alamsüsteemide omavahelist seotust.




Joonis 4.16 Kontaktmooduli testri komponentide süsteemidiagramm.

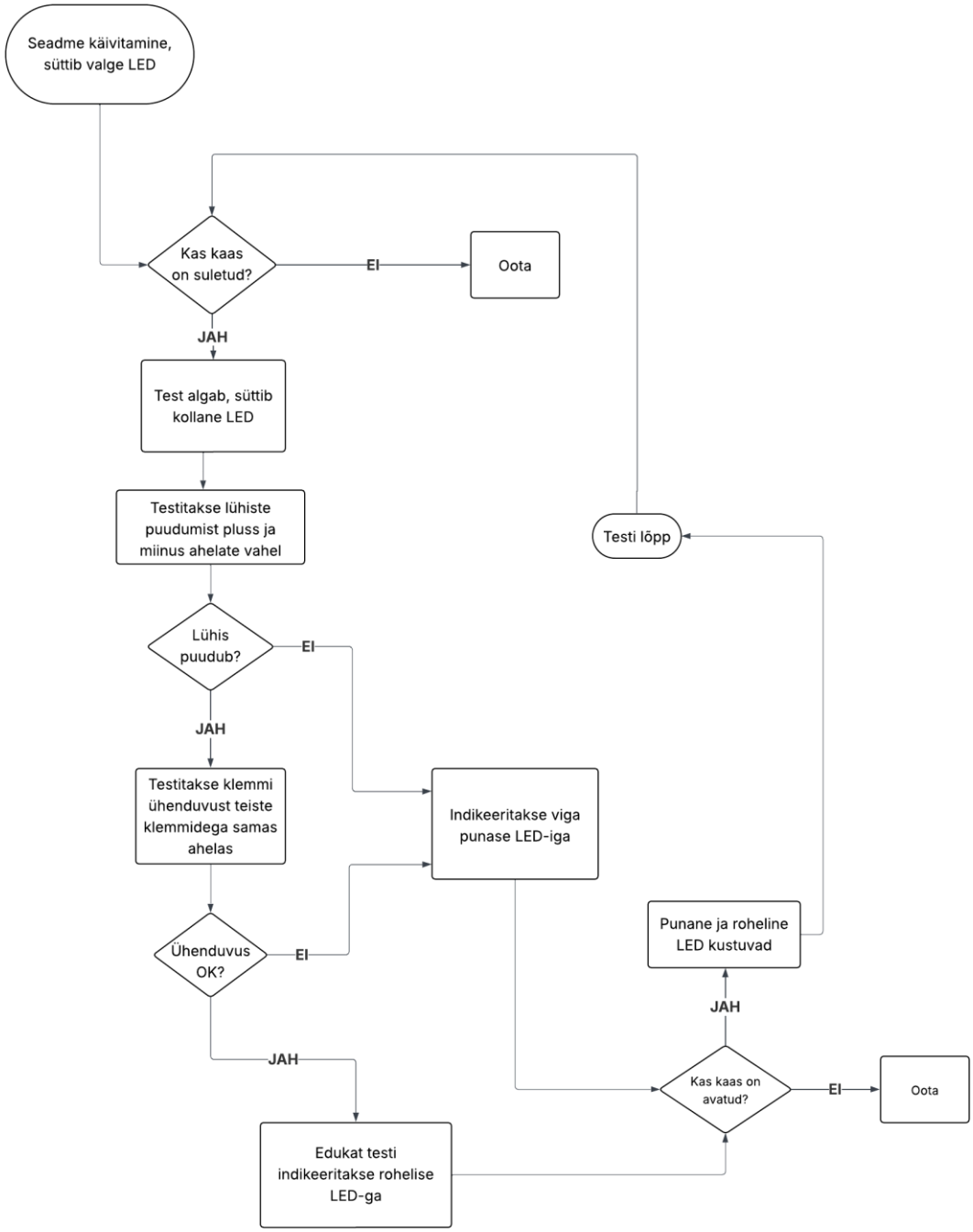
Süsteem saab toite 12 V adapterist, mis on ühendatud standartsesse pistikupessa. Toiteadapter toidab korraga kahte paralleelset haru. Esimene haru viib pinge voolupiirajani ja teine haru toitemoodulisse (DC/DC-muundur), mis alandab pinge 3,3 V peale, sobides mikrokontrolleri toiteks.

Voolupiirajast edasi liigub pinge relee kaudu DUT-i (testitav kontaktmoodul) suunas. Releed juhib transistor, mida omakorda juhitakse mikrokontrolleri digitaalse väljundsignaaliga. DUT-i teise otsa on paigutatud teine transistor, mille kaudu suletakse vooluahel. See on samuti juhitav mikrokontrolleri väljundiga.

Keskne juhtplokk on mikrokontroller, millele on sisseehitatud ADC. Selle kaudu mõõdetakse pingeid mitmes punktis (joonis 4.2), et hinnata kontakti takistust vastavalt pingelangule. ADC sisendid on varustatud kaitseahelaga, mis hoiab ära ESD ja ülepingekahjustused. Mikrokontrolleri digitaalväljundid juhivad relee ja transistor lülitust ning LED-e. Hall-anduri väljund on ühendatud mikrokontrolleri digitaalsisendiga, mis loeb olekut ja käivitab vastavalt testimisprotsessi.

# 5. TARKVARA LOOGIKA

Esitatud vooskeem (joonis 5.1) kirjeldab kontaktmooduli testri automaatset testimisprotsessi, alates seadme käivitamisest kuni testi tulemuste indikatsioonini.




Joonis 5.1 Tarkvara loogika voodiagramm.

Protsess algab seadme käivitamisega, millele järgneb valge LED-i süttimine, mis indikeerib süsteemi valmisolekut. Kui testitav seade on testrisse sisestatud kontrollitakse, kas kaas on suletud. Kui kaas ei ole suletud, jääb süsteem

ooteseisundisse, kuni kaas sulgub. Kaane sulgumisel algab testimisprotsess ning süttib kollane LED, mis annab märku testi algusest.

Esimene kriitiline testietapp on lühise puudumise kontrollimine pluss- ja miinusahelate vahel. Kui lühis on tuvastatud indikeeritakse viga punase LED-iga. Vea tuvastamisel oodatakse kaane avamist, ning kui kaas on avatud kustuvad punane ja roheline LED ja test lõpetatakse.

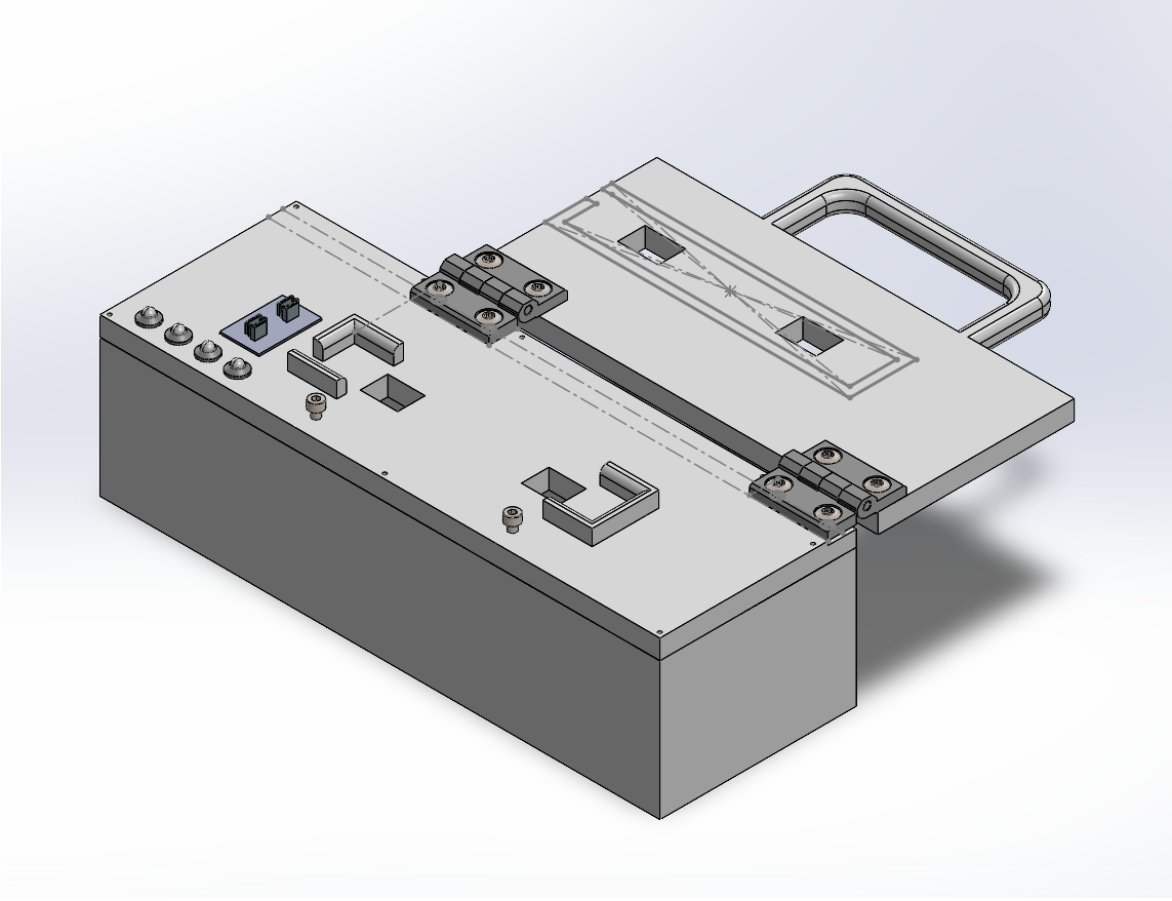
Juhul kui lühis puudub (JAH haru), jätkub testimine klemmide ühenduvuse kontrollimisega teiste klemmidega samas ahelas. See etapp on oluline selleks, et tagada korrektne elektrijuhtivus testitavas ahelas. Kui ühenduvus pole korras, indikeeritakse viga punase LED-iga ja kordub sama ahel mis eelmises lõigus.

Kui ühenduvus on edukalt kontrollitud (JAH haru), loetakse test edukaks ning seda indikeeritakse rohelise LED-iga. Pärast edukat testi oodatakse kaane avamist, kui kaas avatakse kustub roheline LED ja test lõppeb. Oodatakse kuni testrisse pannakse uus seade ja testi alustatakse kaane sulgemisega uuesti või lülitatakse tester välja, mida indikeerib valge LED-i kustumine.

# 6. KATSE STENDI MEHHAANILINE LAHENDUS

Antud konstruktsioon kujutab endast arendatavat prototüüpi (joonis 6.1), mille testri kaane, aluse (Lisa 2.), PCB-de fikseerimiseks mõeldud klotsid ja elektroonika karbi detailid kavatsetakse valmistada 3D-printimise meetodil, kasutades selleks PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol-modified*) filamentmaterjali.

Kuna testrit kasutatakse käsitsi ning kaane liikumine toimub ainult manuaalselt avades ja sulgedes, ei avaldu konstruktsioonile olulisi mehaanilisi koormusi. Jõuarvutuste tegemine ei ole siinkohal vajalik, kuna detailidele mõjuvad jõud on väiksed. Suurim võimalik koormus hingedele võib tekkida olukorras, kus kaas on täielikult avatud ja sellele rakendub omaenda raskuse ja gravitatsiooni jõud. Kaane mass on väike, mistõttu ei ole selle mõju prototüübi tasemel arvutamist vajav. Kostu joonis on nähtav Lisa 1.



Joonis 6.1 Testri koostu CAD joonis.

Tabelis (5.1) on välja toodud ostutooted ja 3D prinditavad detailid ning nende kogused.

Tabel 6.1 Kontaktmooduli testri ostutooted ja ise valmistatavad tooted.

| **Jrk nr** | **Ostutooted** | **Kogus (tk)** | **Ise valmistatud tooted** | **Kogus (tk)** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Hinged GN 237 | 2 | Testri kaas | 1 |
| 2 | LED pesad | 4 | Testri alus | 1 |
| 3 | LED tuled | 4 | Testri karp elektroonika komponentidele | 1 |
| 4 | Molex pistikud | 2 | Klots fikseerimaks trükkplaate | 5 |
| 5 | Boldid M5x10 | 8 | | |
| 6 | Boldid M4x16 | 2 | | |

# 7. HINNA ANALÜÜS

Käesoleva peatüki eesmärk on analüüsida loodava kontaktmooduli testri majanduslikku tasuvust võrreldes olemasolevate või alternatiivsete testimismeetoditega. Hinnang hõlmab nii otseseid kulusid kui ka potentsiaalseid sääste.

Testimisprotsessi peamine eesmärk on tagada kontaktmoodulite kvaliteet ja vältida defektsete toodete jõudmist kliendini. Käsitsi testimisel multimeetriga on küll madal otsene seadme soetuskulu, kuid testimise protsess on ajamahukas ja veaaldis. Defendecis vajab iga-aastaselt testimist vähemalt 3000 kontaktmoodulit. Hinnanguline otsene testimise aastane tööjõu kulu on ca 3000 eurot – ühe seadme testimine võtab aega 5-6 minutit, töötunni keskmine kulu tööandjale on 12 eurot tunnis (20 senti minutis), seega ühe seadme testimise otsene tööjõu kulu on 1 euro.

Automaatse testri puhul on vajalik algne investeering automatiseerimise seadme loomisesse hinnanguliselt summas 92,33 eurot (tabel 7.1), mis on võrreldav madalama hinnaga multimeetrite hinnaga. Ühe mooduli testimine automaatse testriga võtab aega ligikaudu pool minutit, tööjõu kulu on seega 0,10 eurot mooduli kohta, mis teeb testimise aastaseks kuluks 300 eurot.

Võrreldes manuaalset ja automatiseeritud testimist, ilmneb koheselt oluline kulueelis automatiseeritud süsteemi kasuks, mis vähendab testimiskulusid kümnekordselt.

Tabel 7.1 Komponentide maksumus.

| **Komponent** | **Kogus (tk)** | **Hind, €** | **Ostukoht** |
|---|---|---|---|
| STM32 NUCLEO-G071RB (STM32G071RBT6) | 1 | 10,47 | https://eu.mouser.com/ |
| Toiteadapter 12V | 1 | 9,50 | https://www.oomipood.ee/ |
| LED tuled (punane, kollane, roheline, valge) | 4 | 1,37 | https://www.tme.eu/ |
| Hinged | 2 | 14,78 | https://www.tme.eu/ |
| Pistik | 2 | 0,34 | https://www.digikey.ee/ |

| Komponent | Kogus (tk) | Hind, € | Ostukoht |
|---|---|---|---|
| Hall-andur | 1 | 3,18 | https://www.tme.eu/ |
| LED-i pesa | 4 | 4,84 | https://www.tme.eu/ |
| PETG filament | 1 | 12 | https://www.tme.eu/ |
| Toitemoodul | 1 | 3,50 | https://www.oomipood.ee/ |
| N35 magnet | 1 | 0,25 | https://www.magnetsource.com/ |
| Relee | 1 | 0,69 | https://www.tme.eu/ |
| Jõutransistori moodul | 4 | 4,84 | https://www.aliexpress.com/ |
| Jõutakisti | 1 | 7,11 | https://ee.farnell.com/ |
| Dioodid | 15 | 4,46 | https://ee.farnell.com/ |
| KOKKU | | 77,33 | |

Lisaks tabelis toodud põhilistele komponentidele tuleb arvestada ka väiksemate lisa kuludega, nagu kruvid, poldid, juhtmed, trükkplaadid ning muud standardsed elektroonikakomponendid. Kuna nende hinnad on üldjuhul madalad ei ole need tabelis eraldi välja toodud. Hinnanguliselt võib nimetatud elementide kogumaksumus jääda suurusjärku 15 eurot, nende täpne arvutus ei ole antud töö raames oluline ega muuda oluliselt kogu prototüübi maksumust.

Lisaks komponentidele tuleb arvestada ka prototüübi modelleerimiseks kasutatud tarkvara litsentsi hinda ning füüsilisele koostamisele kuluvat tööaega. Prototüübi mehhaaniline osa modelleeriti SolidWorksi tarkvaraga. Kuigi tudengiversioon on tasuta, oleks professionaalseks kasutamiseks vajaliku litsentsi aastane maksumus ligikaudu 2400-4200 eurot aastas. Käesolevas töös kasutati tudengversiooni seega litsentsitasu pole lisatud eelarvesse, kuid ärikeskkonnas tuleks seda kindlasti arvesse võtta arenduskuluna.

Prototüübi füüsiline kokkupanek, seal hulgas testri montaaž ja jootmine võtab eeldatavalt aega 6-10 töötundi. Kui arvestada tööjõukuluks 9 eurot tunnis, kujuneb prototüübi koostamise hinnanguliseks tööjõukuluks 54-72 eurot. See summa lisandub

alginvesteeringule ja peaks olema arvestatud kogukulude juures. Lõputöö kirjutamine toimus perioodil veebruarist mai lõpuni, keskmiselt paar korda nädalas mitmetunniste tööseanssidena, mille kogumaht ulatus hinnanguliselt 100 tunnini. See vastab vastab 900 eurole. Kuigi see ei ole arvestatud kui projektikulu, aitab selline hinnang mõista arendustöö rahalist väärtust.

Oluline aspekt kulude analüüsimisel on ka vigade varajase avastamise väärtus. Nagu eelnevast praktikast on teada, esineb aeg-ajalt vigaseid kontaktmooduleid. Kuigi detailne statistika puudub, on selge, et defektsete moodulite avastamine enne nende kliendini jõudmist on majanduslikkult põhjendatud. Kui automaatne tester suudab tuvastada kasvõi ühe defektse mooduli aastas, on sellega kokku hoitud potentsiaalsed kulud, mis ületavad märgatavalt testri aastaseid käituskulusid.

Kliendi poolt avastatud probleemi lahendamisega kaasnevad olulised kulud hõlmavad:

1. Kliendihalduri ajakulu probleemi väljaselgitamisel (hinnanguliselt 1h, 15 EUR/h).
2. Transpordikulu (ligikaudu 200 EUR)
3. Seadme parandamisele kuluv aeg (ligikaudu 30 minutit, mis teeb firma kuluks 6 EUR).
4. Üldine tugi ja kommunikatsioon kliendiga. Kokku moodustab ühe kliendi poolt tuvastatud ja lahendatud probleemi kulu ettevõttele ligikaudu 250 EUR. Seega, juba ühe vea avastamine testri poolt enne kliendini jõudmist hoiab kokku summa, mis on ligikaudu võrdne testri kogu aastase käituskuluga.

Lisaks mainitud kuludele tuleb arvestada ka otseseid komponentide kadusid. Kui GSM moodul, mille maksumus on 100 eurot peaks rikke tõttu maha põlema, on sellega kaasnev otsene kahju 100 eurot. Kui selliseid rikkeid juhtub mitu, on see oluline lisakulu, mida kontaktmooduli eelnev testimine aitaks vältida. Hinnaanalüüs näitab, et automatiseeritud kontaktmooduli testri arendamine on majanduslikult tasuv investeering.

# 8. VÕIMALIKUD EDASIARENDUSED

Kuigi lõputöö käigus töötati välja kontaktmooduli testri kontseptsioon ja otsiti põhikomponendid on mitmeid suundi kuhu oleks võimalik arendustööd edasi viia. Edasised arendused võimaldaksid muuta süsteemi töökindlamaks ja suurendada praktilist väärtust.

**Prototüübi valmimine ja mehhaaniline katsetamine.**
Esimene samm edasise arenduse suunas oleks töökindla prototüübi täielik koostamine. Kuigi disain ja põhimõtted on kirjeldatud ning komponentide valik tehtud, võimaldaks reaalne prototüüp hinnata reaalseid töötingimusi ja teha parendusettepanekuid.

**Testkäivitus lüliti katsetamine.**
Kuna testi käivitamine on planeeritud hall-anduri, magneti ja terasplaadi lahendusega, tuleb praktiliselt läbi viia katse, et aru saada magneti paigutuse mõjust ja anduri töökindlusest. Katses tuleb kontrollida, kas valitud magnet suudaks hall-andurit usaldusväärselt aktiveerida läbi metall plaadi ning samaaegselt fikseerida kaane kinni hoidmise.

**Tarkvara lõplik arendus.**
Hetkel on kirjeldatud tarkvara loogika skeemi tasandil. Edasine samm oleks kogu tarkvara realiseerimine, mis hõlmab andurite andmete töötlemist, vigade tuvastamist, testiloogika kontrolli ja LED-indikaatorite juhtimist.

**Mitme DUT-i samaaegne testimine.**
Praegune lahendus võimaldab testida korraga ainult ühte seadet. Edasine arendus võiks keskenduda testri arhitektuuri laiendamisele viisil, millega oleks võimalik samaaegselt testida mitut moodulit. See muudaks testimise protsessi efektiivsemaks ja vähendaks tsükli kestust olukordades, kus tuleb testida suuremaid koguseid.

**Loendur pistikutele ja kontaktidele.**
Arvestades, et pistikupesade ja kontaktide töökindlus võib aja jooksul halveneda, oleks otstarbekas lisada süsteemi loendur, mis jälgib pesade kasutuskordi. Tarkvarasse on võimalik integreerida ühenduste arvu põhine loendus, mille aluseks võetakse tootjapoolne maksimaalne lubatud ühenduste arv. Kui määratud lävi on ületatud võiks seade indikeerida hooldusvajadust spetsiaalse LED-i abil. See võimaldaks vältida olukordi, kus kontaktihäired tulenevad liigsest mehaanilisest kulumisest.

# KOKKUVÕTE

Käesolev bakalaureusetöö käsitles kontaktmooduli testri kontseptsiooni ja prototüübi arendust. Töö eesmärkideks oli: töötada välja lahendus, mis võimaldaks tuvastada tootmisvigadega kontaktmoodulid enne seadme lõplikku koostamist, vähendada inimlike vigade mõju testimisel, kiirendada kontrollprotsessi ning hinnata lahenduse kuluefektiivsust võrreldes senise testimismeetodiga.

Esijalgu uuriti kontaktmooduli ehitust ja seniseid testimismeetodeid, milleks olid visuaalne kontroll ja multimeetri kasutamine. Leiti, et need meetodid on aeganõudvad ja ei taga piisavalt usaldusväärsust. Töö käigus koostati testrile nõuete spetsifikatsioon ning viidi läbi turu-uuring, mille põhjal tõestati, et turul pakutavad lahendused on väikese tootmismahu korral liiga kulukad või ebasobivad. Lisaks täideti kontseptsiooni lahenduses kõik nõuded.

Töös kavandati mikrokontrolleri põhine testimisseade, milleks valiti STM32 Nucleo-64 arendusplaat. Lisaks valiti vajalikud elektroonika komponendid ning koostati SolidWorksis mehhaaniline lahendus, mis võimaldab testi automaatset käivitamist kaane sulgemisel hall-anduri abil. Tarkvara loogika on välja toodud voodiagrammina, mille alusel tuvastatakse ühendusvigade tüübid ning indikeeritakse tulemused LED-ide abil.

Hinnaanalüüsi põhjal selgus, et kontaktmooduli testri komponentide maksumus jääb alla 100 euro, samas kui aastane tööjõukulu testimiseks on automaatse lahendusega ligikaudu 300 eurot, mis on 10 korda väiksem kui hetkel kasutatav testimise lahendus. Samuti tuvastati, et iga tootmisse jõudnud defektne moodul võib põhjustada keskmiselt 250 euro suuruse kahju, mis õigustab testri kasutuselevõttu ka majanduslikus mõttes.

Autori hinnangul täidab arendatud lahendus kõik püstitatud eesmärgid. Prototüübi kõik olulised funktsioonid on läbimõeldud ning dokumenteeritud. Töö annab tugeva aluse reaalseks kasutuselevõtuks tootmisprotsessis.

Kuna töö keskendus peamiselt kontseptsiooni ja prototüübi tasemele, siis ei jõutud lõpuni teostada mehhaanilise prototüübi koostu ega tarkvara täieliku realiseerimist. Edasised arendused võiksid keskenduda tarkvara arendamisele, testimissageduse loenduri lisamisele, kuluvate komponentide jälgimisele ning mitme mooduli samaaegsele testimisele.

# SUMMARY

This bachelor´s thesis focused on the development of a concept and prototype for a contact module tester. The objectives of the work were to develop a solution that enables the detection of faulty contact modules before final device assembly to reduce the impact of human error during testing, to accelerate the inspection process, and to evaluate the cost effectiveness of the proposed solution compared to the current testing method. The conceptual solution also fulfilled all the requirements.

Initially, the structure of the contact module and existing testing methods, such as visual inspection and multimeter use, were examined. These methods were found to be time-consuming and insufficiently reliable. During the project, a requirement specification was created for the tester, and a market analysis was conducted, revealing that available commercial solutions are either too expensive or unsuitable for small-scale production.

A microcontroller-based testing device was designed using the STM32 Nucleo-64 development board. Necessary electronic components were selected, and a mechanical solution was developed in SolidWorks. This solution enables automatic test activation when the lid is closed, using a hall-effect sensor. The software logic is presented in a flow chart that outlines fault detection logic and results indication using LEDs.

According to the cost analysis, the total component cost of the contact module tester remains under €100, while the estimated annual labour cost for testing using the automated solution is approximately €300, which is 10 times slower than the current method. Additionally, it was found that each defective module that reaches production may cause an average loss of €250, which further justifies the implementation of the tester from an economic perspective.

In the author's view, the developed solution meets all of the stated objectives. All essential prototype functions have been carefully considered and documented. The work provides a solid foundation for real-world implementation in a production environment.

As the thesis focused primarily on concept and prototype level development, the final mechanical assembly and complete software implementations were not fully carried out. Future improvements could focus on software development, integrating a test cycle counter monitoring component wear, and enabling the simultaneous testing of multiple modules.

# KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] J. Riives, J. Lavin, *Tootmise korraldamine (170 lk)*. Õppematerjal kutsekoolidele, 2014. [18.05.2025]

[2] Elsevier Inc., *Industrial Process Automation Systems – Design and implementation (36 lk)*, 2015. [18.05.2025]

[3] Espak. Multimeeter EMOS MD-310. [Võrguväljaanne] https://espak.ee/epood/toode/multimeeter-emos-md-310/ [01.03.25]

[4] Kritester, „JYL Contact Resistance Tester", [Võrguväljaanne] https://www.kritester.com/product/JYL-Contact-Resistance-Tester.html [01.03.25]

[5] INGUN, „Manual Test Fixures", [Võrguväljaanne] https://ingun.com/en-US/products/test-fixture-kits/manual-test-fixtures/ [01.03.25]

[6] OpiK, „Füüsika õppematerjal – Ohmi seadus", [Võrguväljaanne] https://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/15107#/section/37104 [22.04.2025]

[7] Füüsikaleksikon, „Juhtide eritakistused", [Võrguväljaanne] https://xn--fsikaleksikon-woba.ee/artikkel/fuusikaliste-suuruste-tabelid/juhtide-eritakistused/ [22.04.2025]

[8] Mastering Electronics Design, „An ADC and DAC Least Significant Bit (LSB)", [Võrguväljaanne] https://masteringelectronicsdesign.com/an-adc-and-dac-least-significant-bit-lsb/ [06.05.2025]

[9] STMicroelectronics, *User Manual UM2324 – STM32 Nucleo-64 Boards (MB1360)*, [Võrguväljaanne] https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2324-stm32-nucleo64-boards-mb1360-stmicroelectronics.pdf [06.05.2025]

[10] Texas Instruments, *BQ769x2 Control Based on MSPM0 Through I2C (Rev. A)*, [Võrguväljaanne] https://www.ti.com/lit/an/slaaeb3a/slaaeb3a.pdf?ts=1748829421362&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FBQ76952EVM [06.05.2025]

[11] Raspberry Pi Foundation, „Raspberry Pi 3 Model B+”, [Võrguväljaanne] https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/ [06.05.2025]

[12] AliExpress, „MOSFET Driver Module”, [Võrguväljaanne] https://www.aliexpress.com/item/1005007245111789.html. [20.05.2025]

[14] DigiKey, „0022035025 Molex Connector”, [Võrguväljaanne ]

https://www.digikey.ee/en/products/detail/molex/0022035025/403301 [10.05.2025]’

[15] Farnell, „Vishay 25W Jõutakisti”, [Võrguväljaanne] https://ee.farnell.com/vishay/rha02512r00fe02/res-12r-25w-solder-lug-wirewound/dp/3976522 [20.05.2025]

[16] Oomipood, „12 V Toiteadapter PCE18-12”, [Võrguväljaanne] https://www.oomipood.ee/product/pce18_12_1_5_wm_toiteadapter_12v_1_5a_18w_2_1_5_5mm_pistik_smps [10.05.2025]

[17] Oomipood, „Toitemoodul MB102 3.3V / 5V”, [Võrguväljaanne]

https://www.oomipood.ee/product/oky0026_toitemoodul_maketeerimislauale_mb102_3_3v_5v_700ma_6_5_12v [10.05.2025]

[18] ECOM CZ, „LED Specification Document”, [Võrguväljaanne] https://ecom.cz/data/exportdokumentu?soubor=D80449.pdf&nazev=ECOM_80457_DL-PLED-50.pdf [10.05.2025]

[19] TME, „Lumex SSL-LX5093YD (Yellow LED)”, [Võrguväljaanne] https://www.tme.com/au/en/details/ssl-lx5093yd/tht-leds-round/lumex/ [10.05.2025]

[20] TME, „OPTOSUPPLY OSW54K5B62A-1MA (White LED)”, [Võrguväljaanne] https://www.tme.eu/ee/en/details/osw54k5b62a-1ma/tht-leds-round/optosupply/ [10.05.2025]

[21] TME, „Lumex SSL-LX5093LID (Red LED)”, [Võrguväljaanne]

https://www.tme.eu/ee/en/details/ssl-lx5093lid/tht-leds-round/lumex/ [10.05.2025]

[22] TME, „Lumex SSL-LX5093LGD (Green LED)”, [Võrguväljaanne] https://www.tme.eu/ee/en/details/ssl-lx5093lgd/tht-leds-round/lumex/ [10.05.2025]

[23] TME, „Honeywell SS460P Hall-effect sensor”, [Võrguväljaanne]

https://www.tme.eu/ee/details/ss460p/halli-andurid/honeywell/ [20.05.2025]

[24] [Magnet Source, „N35 Neodymium Magnet”, Võrguväljaanne]
https://www.magnetsource.com/collections/neodymium-block/products/nb0781547n-35 [20.05.2025]

[25] Honeywell, *SS360PT and SS460P Product Datasheet*, [Võrguväljaanne]
https://www.tme.eu/Document/b664b4aa213bd3a8d2133d36e905a7c4/SS360PT%20and%20SS460P.pdf [20.05.2025]

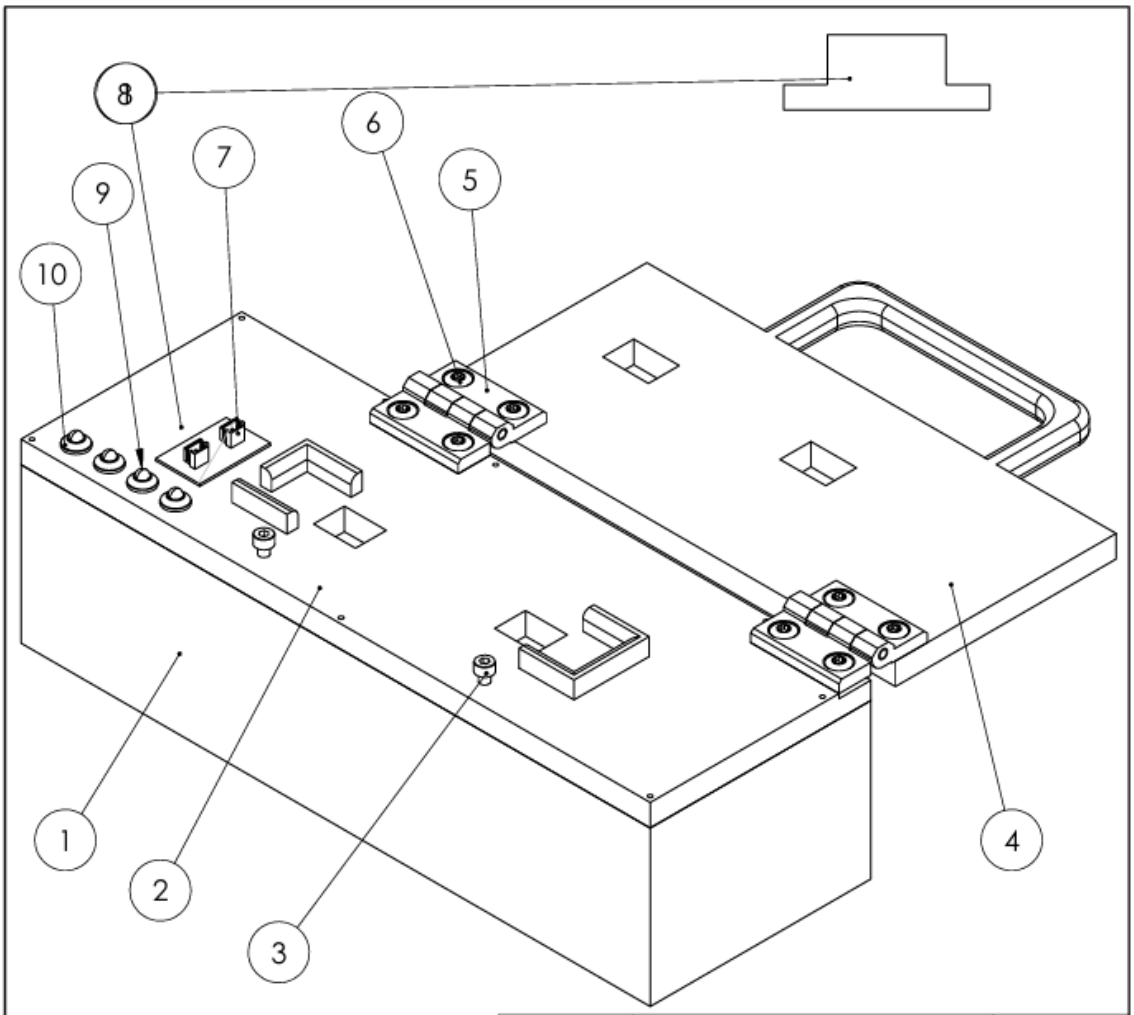
[26] TME, „Amphenol Anytek AWHSH112D00G – Relee”, [Võrguväljaanne]
https://www.tme.eu/ee/en/details/awhsh112d00g/miniature-electromagnetic-relays/amphenol-anytek/ [20.05.2025]

[27] Farnell, „Nexperia BAT721S-215 – Schottky Diood”, [Võrguväljaanne]

https://ee.farnell.com/nexperia/bat721s-215/diode-schottky-dual/dp/1081200 [20.05.2025]

**LISAD**

**Lisa 1. Kontaktmooduli testri koostujoonis**

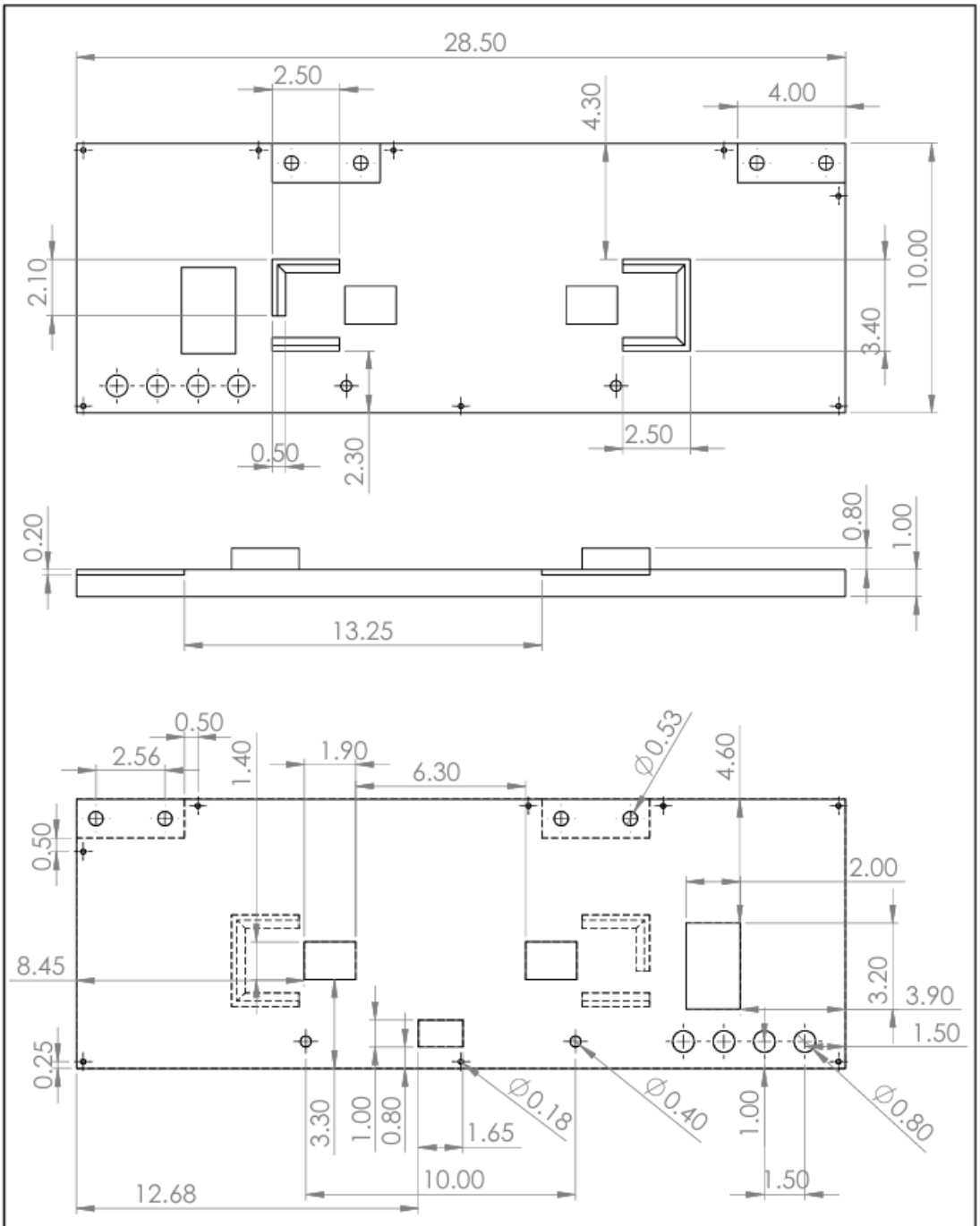



| | | |
|---|---|---|
| 10 | LED pesa | 4 |
| 9 | LED | 4 |
| 8 | Pistiku klots | 1 |
| 7 | Molex pistik | 2 |
| 6 | Bolt M5x10 | 8 |
| 5 | Hing (GN 267) | 2 |
| 4 | Testri kaas | 1 |
| 3 | ISO 4762 M4 x 16 - 16N | 2 |
| 2 | Testri alus | 1 |
| 1 | Elektoonika karp | 1 |
| JRK.NR | NIMETUS | HULK |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Materjal: - | Märkimata piirhälbed: ISO 2768-m; ISO 2768-K | Mass: - | Mõõt: 1:2 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Teostas: | A.I.RIM 20/02/2025 | Nimetus: Kontaktmooduli testri koost | | |
| Kontrollis: | | | | |
| Kinnitas: | | | | |
| TAL TECH Tallinna Tehnikaülikool<br>Mehaanika ja tööstustehnika instituut<br>Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086 | | Leht: 1 / 1 | Formaat: A4 | Tähis: 01.00.00 |

**Lisa 2. Kontaktmooduli testri alus**




| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Materjal: - | Märkimata piirhälbed: ISO 2768-m; ISO 2768-K | Mass: - | Mõõt: 1:2 |
| Teostas: A.I.RIM 18/02/2025 | Nimetus: Kontaktmooduli testri põhi | | | |
| Kontrollis: | | | | |
| Kinnitas: | | | | |
| TAL TECH Tallinna Tehnikaülikool, Mehaanika ja tööstustehnika instituut, Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086 | Leht: 1 / 1 | Formaat: A4 | Tähis: 01.00.01 | |