



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Instituudi nimetus

# TRÜKKPLAATIDE VEAANALÜÜSI MÕÕTMISTE PROTSESSI KIIRUSE JA OHUTUSE PARENDAMINE

## IMPROVING THE SPEED AND SAFETY OF PCBA FAILURE ANALYSIS MEASUREMENT PROCESS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Siim Kristjan Salmi

Üliõpilaskood: 206254EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus, vanemlektor

Kaasjuhendaja: Indrek Jürs, insener

# 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.

“13” mai 2024

Autor: Siim Kristjan Salmi

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“13” mai 2024

Juhendaja: Martin Jaanus

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Siim Kristjan Salmi

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Trükkplaatide veaanalüüsi mõõtmiste protsessi kiiruse ja ohutuse parendamine“, mille juhendaja on Martin Jaanus,
    - 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.
- 

\_\_\_\_\_ 13.05.2024

<sup>1</sup> 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 punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## Trükkplaatide veaanalüüsi mõõtmiste protsessi kiiruse ja ohutuse parendamine

**Üliõpilane:** Siim Kristjan Salmi, 206254EAAB  
**Õppekava, peeriala:** EAAB16/17 – Mehhatroonika  
**Juhendaja(d):** Martin Jaanus, vanemlektor  
Indrek Jürs, insener

### Lõputöö teema:

Trükkplaatide veaanalüüsi mõõtmiste protsessi kiiruse ja ohutuse parendamine  
Improving the speed and safety of PCBA failure analysis measurement process

### Lõputöö põhieesmärgid:

- Mõista näitena kasutatud trükkplaadi tööpõhimõtet.
- Teostada analüüs veaanalüüsi mõõtmiste protsessi ohutuse ja ajakulu kohta.
- Leida sobiv lahendus parendamiseks veaanalüüsi mõõtmiste protsessi.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete kogumine	15.02.24
2.	Mõõtmiste teostamine	01.03.24
3.	Sobiva lahenduse leidmine	15.04.24

**Töö keel:** Eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "13" mai 2024a

**Üliõpilane:** Siim Kristjan Salmi ..... ".....".....2024a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Martin Jaanus ..... ".....".....2024a  
/allkiri/

**Kaasjuhendaja:** Indrek Jürs ..... ".....".....2024a  
/allkiri/

**Programmijuht:** Marek Tull ..... ".....".....2024a  
/allkiri/

# SISUKORD

Lühendite ja tähiste loetelu .....	6
1. SISSEJUHATUS.....	7
2. TRÜKKPLAADI VEAANALÜÜS .....	8
2.1 Kasutusel olev protsess .....	8
2.2 Analüüsitav trükkplaat.....	9
2.3 Veaanalüüsi mõõtmiste ohutus .....	12
3. MÕÕTMISTE PROTSESSI ANALÜÜS .....	14
3.1 Trükkplaadi INT-54 veaanalüüsi mõõtmised.....	14
3.1.1 Esimene juhtum.....	15
3.1.2 Teine juhtum .....	16
3.1.3 Kolmas juhtum .....	17
3.1.4 Neljas juhtum.....	18
3.2 Mõõtmisteks kuluv aeg .....	18
3.3 Tööohutuse riskianalüüs .....	20
4. ETTEVÕTTE VISIOON JA NÕUDMISED VEAANALÜÜSI PARENDAMISEKS.....	21
4.1 Tööohutuse parendamine .....	21
4.2 Veaanalüüsi mõõtmisprotsessi parendamine.....	21
4.3 Tehnilised nõudmised .....	22
4.3.1 Proovikule rakendatava jõu mõõtmised .....	22
4.4 Kriteeriumid .....	25
5. LAHENDUSED.....	26
5.1 Erinevate lahenduste kirjeldus.....	26
5.1.1 AOI meetod.....	26
5.1.2 AXI meetod .....	27
5.1.3 ICT meetod .....	27
5.1.4 FCT meetod.....	29
5.2 Lahenduste võrdlus ja kokkuvõte.....	30
5.2.1 Huntron Access 2 Prober .....	32
5.2.2 Huntron Access DH2 Prober.....	32
5.2.3 SPEA 4080 .....	33
5.2.4 Lahenduste kokkuvõte .....	34
5.2.5 Tasuvuse hinnang.....	35
KOKKUVÕTE .....	37
SUMMARY.....	39
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	41
LISA .....	43

## **Lühendite ja tähiste loetelu**

PWM – pulsilaiusmodulatsioon (ingl k Pulse-Width Modulation)

MOSFET – metal oksiid pooljuht transistor (ingl k Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

# 1. SISSEJUHATUS

Tänapäeval liigub elektrienergia tarbimine aina kasvavas joones ning seetõttu on aktuaalseks muutunud ka energia säästmine. Energiaallikate hinnad on kasvanud ning tarbijad otsivad lahendusi, mis aitaksid elektrienergiat kokku hoida. Üheks lahenduseks on tööstussüsteemidesse sagedusmuunduriga ajamite paigaldamine. Ilma sagedusmuundurita oleks elektrimootori kiirus fikseeritud ning vajaduspõhiselt selle kiirust muuta ei saa. Küll aga on sagedusmuunduriga võimalik kontrollida elektrimootori pöörlemiskiirust, sellele antavat voolu, impulsside sagedust ning ka pinget.

Selleks, et iga toodetud sagedusmuundur toimiks nii nagu vaja, testitakse iga toodet ning püütakse elimineerida vead juba arendusfaasis. Siiski tekib vigu ka juba klientidele tarnitud toodete puhul. Selleks, et mõista, mis on põhjustanud toote purunemise, analüüsitakse klientidelt tagasi saadetud tooteid. See tagab pideva arusaama toote käitumisest erinevates keskkondades ning hõlbustab toote paremaks muutmist. Vead, mis toodetel tekivad, võivad olla väga erinevad ning tihti võtavad analüüsid küllaltki kaua aega. Samal ajal võib analüüsi vajavate toodete hulk kuhjuda ning kliendid, kes soovivad veaanalüüsist tagasisidet, peavad vastuseid kaua ootama.

Veeanalüüsi käigus võtab enamasti kõige rohkem aega sagedusmuundurite sees olevate trükkplaatide analüüsimine. Trükkplaatide keeruka ja kompleksse disaini tõttu peab esmalt leidma üles ahelad, mis võivad olla vea põhjustajaks ning siis kindlad komponendid. Selleks peab otsima sobivaid testpunkte, kuhu katsetusteks juhtmeid joota, ning ühendada testpunktidesse mõõteriistad. Seejärel on vajalik luua turvaline keskkond, kus pingestatud trükkplaadilt saaks ohutult mõõtmisi võtta. Juhul kui mõõtmisi tehes viga ei tuvasta, tuleb leida uues testpunktid. Kogu see tegevuste ahel võtab palju aega ning ettevõtte töö optimeerimiseks oleks kasulik see protsess kiiremaks muuta.

Antud bakalaureuse töö eesmärgiks on leida viis, kuidas saaks sagedusmuundurites leiduvate trükkplaatide veaanalüüsiks kuluvat aega vähendada. Selleks esmalt analüüsitakse trükkplaadi elektriskeemi ning funktsiooni, et leida sobivaim mõõtmiste teostamise meetod. Leitud meetodit rakendades analüüsitakse valim vigaseid trükkplaatide. Analüüsi käigus mõõdetakse aega, mis kulub iga analüüsietapi teostamiseks. Seejärel otsitakse lahendusi, kuidas antud protsessi kiirendada ning kas leidub seadmeid, mis hõlbustaksid protsessi kulgu ja kas leiduks ka täisautomaatne viis, kuidas trükkplaatide veaanalüüsi läbi viia.

## 2. TRÜKKPLAADI VEAANALÜÜS

Trükkplaat on isoleermaterjalist plaat, millele on monteeritud kiibid, takistid, kondensaatorid ja muud elektroonika komponendid [1]. Tänapäevastele trükkplaatidele suudetakse elektroonikakomponentide väiksuse tõttu mahutada neid sinna küllaltki palju ning erinevaid ahelaid tekib sellega seoses samuti mitmeid. See tähendab ka seda, et kui trükkplaadil mingi viga tekib, on seda raskem tuvastada. Küll aga on vea tuvastamine oluline, et seda tulevikus vältida. Selleks teostatakse trükkplaatidele veaanalüüsi. Veaanalüüsi protsess võib erineda trükkplaadi tüübist ning tööpõhimõttest, kuid suuremas osas jäävad analüüsi põhimõtted siiski samaks. Antud bakalaureusetöö tehakse Eestis tegutseva tehnoloogiaettevõtte toodetud sagedusmuundurist leitava trükkplaadi INT-54 näitel.

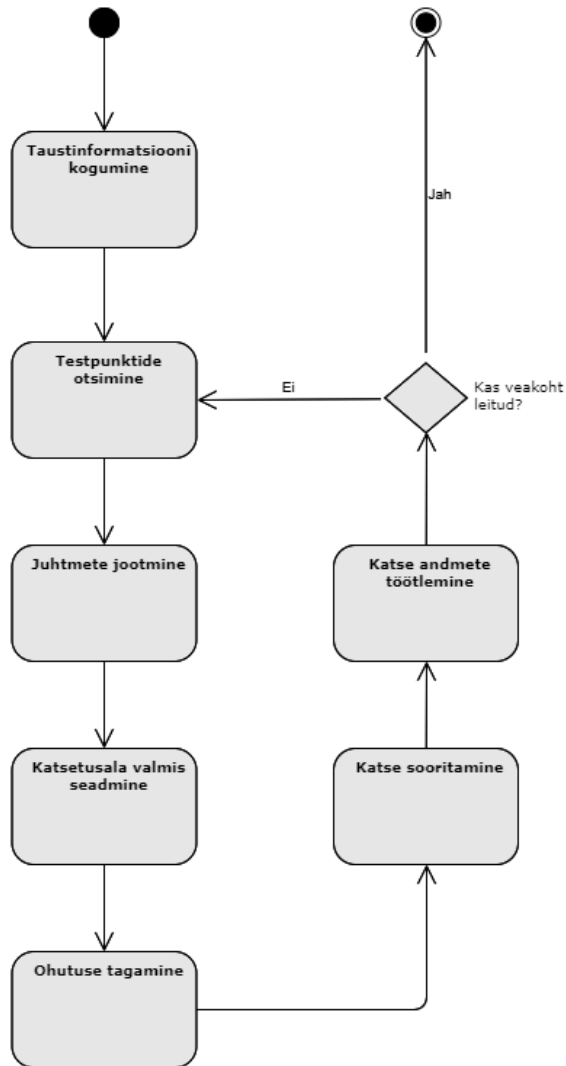
### 2.1 Kasutusel olev protsess

Trükkplaadi veaanalüüs koosneb mitmest etapist (Vt. Joonis 2.1). Peamiselt võtab aega testpunktide otsimine ning juhtmete jootmine. Komponentide väiksed mõõtmed ning tihe paigutus muudavad jootmise keeruliseks. Oht on, et jootes võivad kõrval olevad komponendid kahjustada saada või trükkplaadi pealt koguni maha tulla. Seetõttu on tihti mõistlik kasutada jootmiseks mikroskoopi. Selliseid jootmistõid tehes peab olema ettevaatlik ning selle tulemusena kulub ka palju aega.

Tavaliselt joodetakse trükkplaadile korraga ainult vajalikud juhtmed, et testida ühte kindlat piirkonda. Korraga igasse punkti juhtmete jootmine pole mõistlik, sest juhtmeid tekiks väga palju ning suur juhtmete kogus võib tekitada segadust. Seetõttu valitakse mõned punktid, mis võivad aidata vea asukohta leida. Kui aga nende punktide abil vea asukohta ei tuvasta, peab leidma uued testpunktid ning sinna uued juhtmed jootma. Kui viga osutub keskmisest tavapäratumaks, võib tulla ette palju etappide kordamisi.

Pärast testpunktidesse juhtmete jootmist sooritatakse katse trükkplaati pingestades. Mõõteseadmeteks kasutatakse tavaliselt multimeetrit või ostsiloskoopi. Katse tegemisel peab lähtuma ohutusest ning seetõttu võtab ka korraliku katseala ettevalmistamine aega. Vajalik on veenduda, et kõik ühendused on korralikult tehtud ning juhtmete otsad üksteisega kokku ei puutuks. Katseala kaetakse ka kattega, mis kaitseb katse tegijat, kui katse all olev trükkplaat peaks näiteks süttima või plahvatama. Kate tagab ka selle, et keegi pingestatud trükkplaati kogemata ei katsuks või sellele halvimal juhul peale ei kukuks.



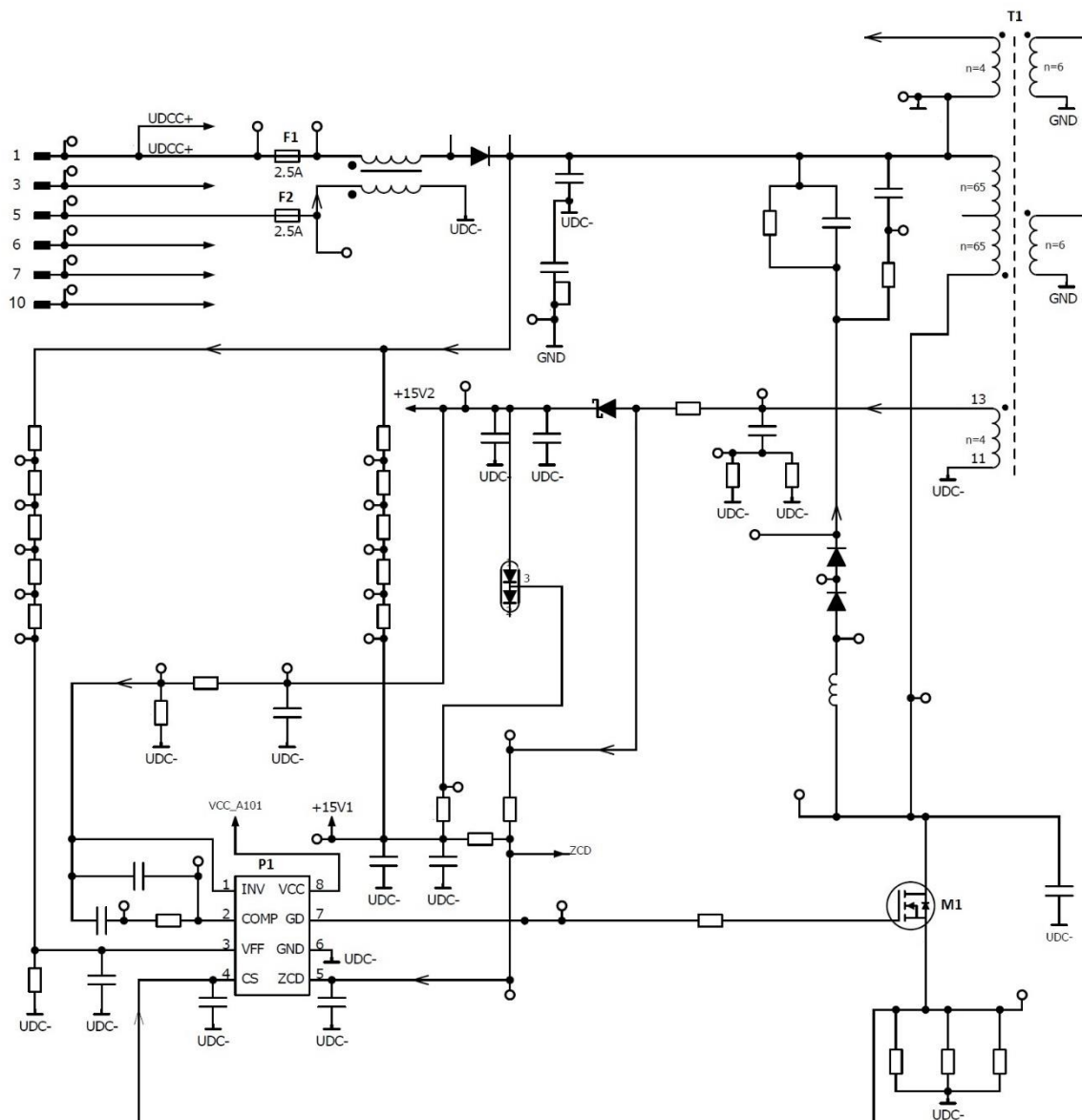


Joonis 2.1 Veaanalüüsi protsessi sammud

## 2.2 Analüüsitav trükkplaat

Antud töö näitena kasutatakse trükkplaati INT-54. Trükkplaadi INT-54 peamiseks funktsiooniks on sagedusmuunduri tööks vajalike pingete tekitamine. INT-54 kontrollib sisendpinge alaldit ning samuti vaheldit, mis tekitab soovitud kolmefaasilise pinge sagedusmuunduri väljundisse. Nimetatud trükkplaat tekitab ka madalamaid pingeid, mis on vajalikud sagedusmuunduri tööks ning see saavutatakse kasutades *Flyback* topoloogiat. *Flyback* topoloogia koosneb ühest peaahest, mis hakkab tööle 410 V alalispinge juures, ning kolme gruppi jaotatud kõrvalahelatest. Esimene grupp tekitab vajaliku pinget sagedusmuunduri kontrollplaadi ning ka jahutusventilaatorite toimimiseks. Teine grupp on oluline voolumõõtude võtmiseks ning vaheldit kontrollimiseks. Kolmanda grupi ülesandeks on kontrollida peakondensaatorite laadimisahelat. [2]

Olulisimad komponendid INT-54 trükkplaadil on peaaheas paiknev MOSFET (M1), PWM modulaator (P1) ja trafo (T1), mis tekitab kõrval ahelatesse vajalikud pinged. Samuti paikneb peaaheas kaks kaitset (F1, F2), mis rakenduvad 2,5 A voolu puhul, et kaitsta ülejäänud skeemis olevaid komponente ning vältida kogu trükkplaadi hävinemist. Joonis 2.2 on näidatud INT-54 peaaheala skeem, kus on näha kõik olulisemad komponendid. [2]



Joonis 2.2 INT-54 peaaheala elektriskeem [2]

Kui peaaheala UDCC+ ja UDC- klemmide vahele ühendatakse vähemalt 410 V suurune pinge, hakkab trükkplaat tööle. See tähendab, et PWM modulaatori sisendpinge on selle toitepinge juures saavutanud 15 V, mis on vajalik, et PWM modulaator hakkaks tööle. PWM modulaator hakkab kontrollima MOSFETi lülitamist. Peale seda, kui MOSFET lülitama hakkab tekib ka pinge Flyback trafole ning INT-54 kõrvalahelad saavad toite.

Peaahela vea korral (vool läbi MOSFETi M1 ületab ette seatud piiri) lõpetab PWM kontrolleri MOSFETi lülitamise. [2]

Normaalolekus on PWM modulaatori sisendite ja väljundite väärtused järgmised (Vt. Joonis 2.3):

- Sisend 1 INV (väljundpinge tagasiside ahel) – 2,48 V
- Väljund 2 COMP – 2,52 V
- Sisend 3 VFF (sisendpinge tagasiside ahel) – 0,97 V (sisendpinge 410 V korral)
- Sisend 4 CS (MOSFET M1 läbiva voolu tagasiside) – <2 V
- Sisend 5 ZCD (trafo demagnetiseerumise tagasiside) – 2,47 V
- 6 GND (PWM modulaatori maandus) – 0 V
- Väljund 7 GD (MOSFETi paisu tüürimissignaali) – nelinurksignaali -1,3...18,6 V
- Sisend 8 VCC (toitepinge) – 17,73 V



Joonis 2.3 PWM modulaatori sisendite ja väljundite väärtused ja signaali kujud

PWM modulaatorile eelnevaid komponente (takistid, diodid) on multimeetriga võimalik mõõta ilma trükkplaati pingestamata ning seetõttu tehakse seda ka kohe analüüsi alguses. MOSFETi ja PWM kontrolleri toimivust ei ole võimalik kinnitada ilma trükkplaati pingestamata. Trükkplaadi pingestamine >50 V pingega tähendab, et käsitsi mõõtmised trükkplaadi pinnal tulenevalt elektriohutusest on välistatud. Trükkplaadile tuleb luua püsivad ühendused signaali ja mõõteriista vahele ning trükkplaat peab olema kaetud vältimaks elektrilöögi ohtu.

Tulenevalt PWM modulaatori funktsioonist ei piisa vaid multimeetri mõõtmistest vea tuvastamiseks. Ajas muutuvate lainekujude vaatlemiseks ja erinevate signaalide võrdlemiseks on vaja kasutada ostsilloskoopi. PWM modulaatori töö analüüsiks on vaja nendele komponentidele külge joota juhtmed ning ostsilloskoobiga analüüsida signaalide olekuid. Vigase signaali tuvastamisel on tarvis kontrollide teisi komponente antud ahelas. Praktiliselt tähendab see suure hulga mõõtepunktidest juhtmete käsitsi jootmist. Tulenevalt komponentide hulgast ning väikestest mõõtmetest on jootmine keerukas ning võtab palju aega.

Trükkplaadi INT-54 elektriskeemi analüüsist selgub, et sobivaks analüüsi mõõtmiste teostamise meetodiks on trükkplaadi pingestamine, mõõtepunktidest juhtmete jootmine ning signaalide funktsionaalsuse kontroll ostsilloskoobiga.

## **2.3 Veaanalüüsi mõõtmiste ohutus**

Veeanalüüsi käigus tehtavate mõõtmiste ohutuse tagamine on suure tähtsusega, sest tihti on kasutatavad pinged küllaltki kõrged. Näitena kasutatava trükkplaadi INT-54 käivitamiseks on tarvis alalispinget 410 V, mis võib inimesele suurt ohtu kujutada [2]. Seetõttu on vaja hoolikalt läbi mõelda terve mõõtmiste käik ning rakendada vajalikke ohutusnõudeid. Selleks tehakse tervele mõõtmiste protsessile riskianalüüs, mis aitab välja tuua ja paremini mõtestada protsessi võimalikke ohukohti.

Esmalt on tarvilikud vastavad kaitsevahendid: kaitseprillid, kindad, jalanõud ja riietus. Jalanõusid ja riietust on kahte erinevat sorti: isoleerivad ja juhtivad. Juhtivaid vahendeid kasutatakse üldjuhul peenelektroonikat käsitledes, et kaitsta elektroonikat staatilise energia eest. Isoleerivad vahendid on selleks, et kaitsta inimest kõrgete pingete eest ning et ära hoida kaarleegi teket ja selle poolt põhjustatavaid vigastusi. Kindaid kasutatakse peamiselt vältimaks vigastusi, mis võivad kätele tekkida teravate või kuumade asjade käsitlemise tulemusena. Käsitletavatel seadmetel leidub palju teravaid nurki ning kuna tihti on antud seadmed üsnagi rasked, siis võivad käed kergesti kriimustatud saada. Lisaks kasutatakse analüüsi käigus jootekolbi, et vajalikesse punktidesse juhtmeid joota või komponente trükkplaadil vahetada. Jootekolb on enamasti seadistatud temperatuurile 350-450 °C ning kindad on vajalik kaitse, et vältida käele tekkivaid põletusi, juhul, kui jootekolb peaks vastu kätt minema. Samuti on oluline, et riided oleks pikad, tagamaks jalgade ja käsivarte kaitse vigastuste eest.

Trükkplaadi analüüsi protsessis on mitmeid võimalikke ohukohti. Esmalt on trükkplaatidel teravad nurgad ning läbi plaadi paigaldatavatel komponentidel on teravad jootekohad. Viimaks kasutatakse analüüside tegemisel erinevaid pingeid. Tihti ulatub alalispinge tase lausa 1000 V-ni, millega kokkupuude võib olla inimese jaoks surmav.

Ettevõttes, millega koostöös antud tööd tehakse, on ohutus väga oluline ning kõiki ohutusega seotud teemasid võetakse väga tõsiselt. Selle tulemusena on vajalik uusi lahendusi rakendades panna olulist rõhku ohutusele ning selgeks teha kõik võimalikud ohukohad, mis süsteemis võivad esineda.

### **3. MÕÕTMISTE PROTSESSI ANALÜÜS**

INT-54 veaanalüüsi mõõtmiste protsessi saab jagada mitmeks etapiks nagu on mainitud ka peatükis 2.1. Esimene etapp on taustinformatsiooni kogumine ja visuaalne kontroll, vaatamaks, kas leiab kohe mõõtmiste teostamiseks piirkonna. Kuna visuaalne kontroll väga põhjalik ei ole ning sellele kulub aega vähe, siis liigitatakse taustinformatsiooni kogumine ja visuaalne kontroll ühe etapi alla. Teiseks etapiks on testimise ala valmis seadmine ning esimese testi tegemine. Testitavaid seadmeid on erinevaid ja selle pärast ei ole iga seadme jaoks alalist testimise ala. Sellest tulenevalt seatakse enne iga testi testitavat seadet ja testi olemust arvesse võttes valmis eraldi testimise ala. Esmase testimise käigus selgitatakse välja, kas testitav seade läheb käima ning tuvastatakse ega süsteemis ei ole suuremat lühist. Kolmandas etapis analüüsitakse esimese testi tulemusi ning käitatakse vastavalt sellele. Olukorras, kus testitav seade ei toiminud testi käigus nii nagu see peaks, analüüsitakse selle seadme elektriskeeme, ning püütakse leida võimalikud testpunktid, millelt täpsemaid mõõtmisi võtta. Juhul kui eelnevate etappide käigus on leitud kindel piirkond, millel viga esineb, vaadatakse skeemidelt, mis komponendid ja ahelad asuvad antud piirkonnas. Pärast seda, kui on leitud mõõtepunktid, joodetakse mõõtepunktidesse kaablid ning ühendatakse need kas multimeetri või ostsilloskoobiga. Seejärel tehakse teste ning jälgitakse, kas mõõteseadmetelt loetavad näidud lähevad oodatud näitudega kooskõlla. Kui viga nende testpunktidega ei avastata, otsitakse uued testpunktid ning teostatakse test uuesti. Lõpuks, kui on leitud vigane koht ning selleks osutub üks komponent, vahetatakse see komponent välja ning proovitakse seade uuesti käivitada. Seadme korrektse toimise puhul, saab kindel olla, et ainus vigane koht oli antud komponent.

Etapid:

- 1. etapp – visuaalne kontroll ning staatilised mõõtmised
- 2. etapp – esmane test
- 3. etapp – skeemide analüüs
- 4. etapp – mõõtepunktidesse juhtmete jootmine ning mõõtmiste teostamine

#### **3.1 Trükkplaadi INT-54 veaanalüüsi mõõtmised**

INT-54 puhul on olulisemateks komponentideks, mida kontrollida PWM modulaator, peamine MOSFET ning kaitsmed. Kaitsmete lahti sulamine on indikaatoriks, et kuskil esineb lühis. Võimalik on ka see, et tegemist on vigase kaitsmega ning seetõttu vahetatakse see kohe välja ning testitakse, kas INT-54 hakkab tööle. Kõikide INT-54 katsete käigus kasutatakse voolu piirajaga toiteallikat. Algselt seadistatakse läbi lastav

vool piisavalt madalaks, et liigne vool koheselt midagi muud katki ei teeks, kuid samas piisavalt kõrgeks, et oleks kohe aru saadav, kui kuskil esineb lühis. Enamasti seadistatakse voolu piiraja algselt umbkaudu 0,2 A peale.

Näitamaks, kui palju võtab keskmiselt aega veaanalüüsi mõõtmiste protsess, ning võrdlemaks mõõtmistele kuluvat aega teiste veaanalüüsi etappidega, võeti neli erinevat juhtumit INT-54 trükkplaatide seast. Kõik plaadid olid saabunud klientidelt tagasisidega, et need ei tööta ning neile tehti korralik analüüs, mida oleks võimalik hiljem kliendile näidata. Veaanalüüsi protsess jagati nelja etappi ning iga etapi teostamise ajal mõõdeti aega, kui kaua selle etapi läbimiseks läheb. Tulemused on näidatud Tabel 3.1.

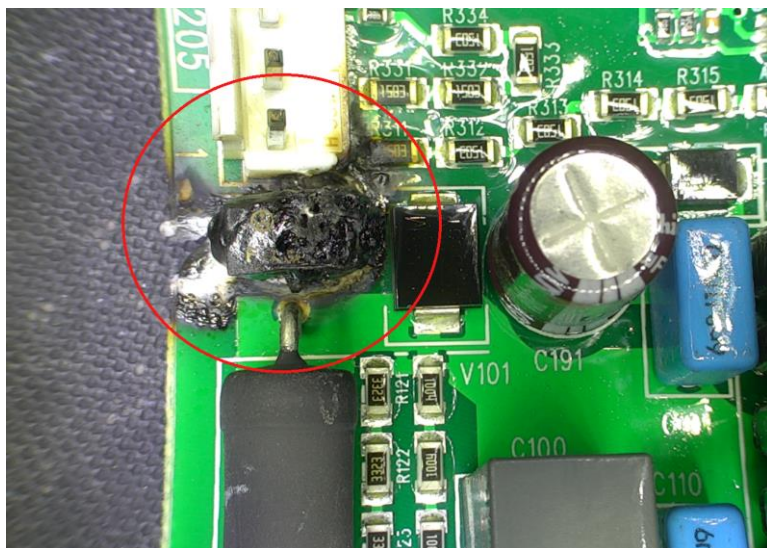
### **3.1.1 Esimene juhtum**

Esimese juhtumi puhul oli visuaalselt kohe märgata, et üks kaitse oli praktiliselt plaadilt maha sulanud ning kaitsme ümbert oli plaadil tugevaid põlemisjälgi (Vt. Joonis 3.1). Seetõttu oli kohe aru saada, mis piirkond trükkplaadilt viga on saanud ning selle peale palju aega ei kulunud. Järgmiseks mõõdeti kaitsme lähedal olevaid komponente multimeetriga hindamaks, kas ka kõrval olevad komponendid on kahjustada saanud või on võimalik plaati käivitada. Leiti, et kõrval olevad komponendid on korras ning kuna kaitse oli läbi põlenud, asendati see ära ning toiteallikal seadistati voolupiirang 0,2 A peale, mille abil tagati ohutus.

Seejärel tehti esmane test nägemaks, kas plaat käivitub. Selleks, et katset teha, pidi valmis seadma sobiva rakise ning seejuures järgima hoolikalt ohutusnõudeid. Esmase testi käigus tehti kindlaks, et trükkplaat käima ei lähe ning liiguti edasi järgmise etapi juurde, milleks oli skeemide analüüs. Selle etapi käigus uuriti plaadi elektriskeeme, et näha, millised rajad põlenud koha juurest läbi võiksid minna ning, millised komponendid neil asetsevad. Otsiti sobivad mõõtepunktid, kust katse käigus mõõtmisi võtta, et näha, kas vajalikesse kohtadesse jõuavad vajalikud pinged. Esmalt seati üles mõõtepunktid, mille abil saab näha, kas PWM modulaatori tööle hakkamiseks vajalik pinge 15 V jõuab modulaatorini või ei ning kas peamine MOSFET hakkab tööle. Selle katse alguses vahetult pärast INT-54 pingestamist, nähti sähvatust põlenud kaitsme lähedal. Koheselt võeti toide tagant ära ning kontrolliti, kas teine kaitse on korras. Teine kaitse oli korras ning otsustati edaspidiseks mõõtmiseks kasutada mitte suuremat kui 30 V toidet.

Kuna sähvatus viitas kaarleegile, toideti trükkplaati pingega 30 V ning sätiti voolu piiraja 100 mA peale. Lülitamise hetkest alates jälgiti trükkplaati termokaameraga, et mõista, kas kuskil võib tekkida lühis. Nähti, et plaadil põlenud koha kõrval olev ala läheb väga kuumaks ning antud kohast hakkas ka suitsu tulema peale mille märkamist võeti koheselt toide maha. Edasi vaadati INT-54 skeemi, kus on võimalik näha komponentide paigutust ning ka trükkplaadi sees olevate kihtide paigutust. Skeemi uurides pandi

tähele, et kohas, kus suitsu nähti on erinevates kihtides alalispinge positiivne ja ka negatiivne potentsiaal ning sellest järeldati, et kihid on omavahel lühises.



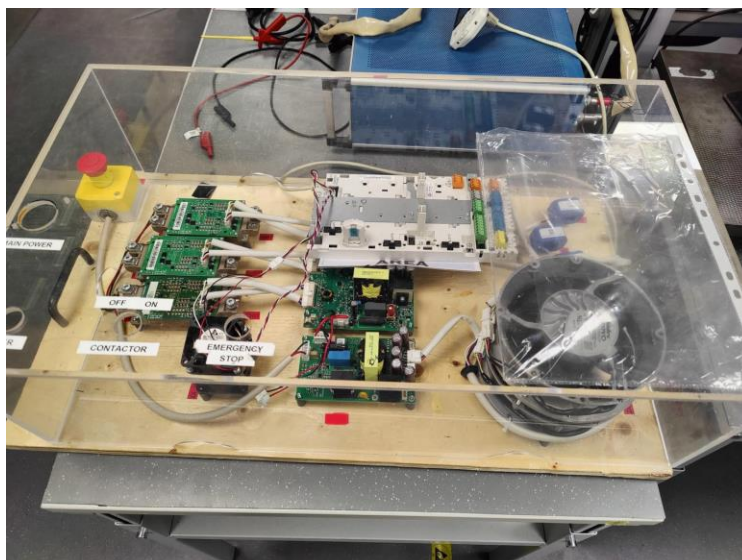
Joonis 3.1 Põlenud kaitse

### 3.1.2 Teine juhtum

Teise INT-54 analüüs võttis uuritavatest juhtumitest kõige vähem aega, sest selgus, et tegemist oli töökorras trükkplaadiga, kuid isegi selle analüüsiks kulus kokku 110 minutit, millest 75% kulus mõõtmistele. Mõõtmistele kulunud aeg on näha Tabel 3.1.

Visuaalse kontrolli põhjal ei olnud võimalik viga tuvastada ning seetõttu mõõdeti kohe plaadi kaitsmed üle. Selgus, et üks kaitsmetest oli läbi põlenud ning seega vahetati see välja ja prooviti esmase testi käigus vaadata, kas plaat läheb käima. Plaat läks käima ning seejärel mõõdeti olulisemad punktid üle ning vaadati, kas kõik tulemused on korras. Kuna kõik tulemused olid vastavuses töötava trükkplaadi tulemustega leiti, et plaat on ideaalses töökorras ning ilmselt oli üks kaitsmetest defektiga komponent. Joonis 3.2 on näidatud INT-54 funktsionaalseks testimiseks kasutatav rakis.





Joonis 3.2 INT-54 funktsionaaltesti rakis

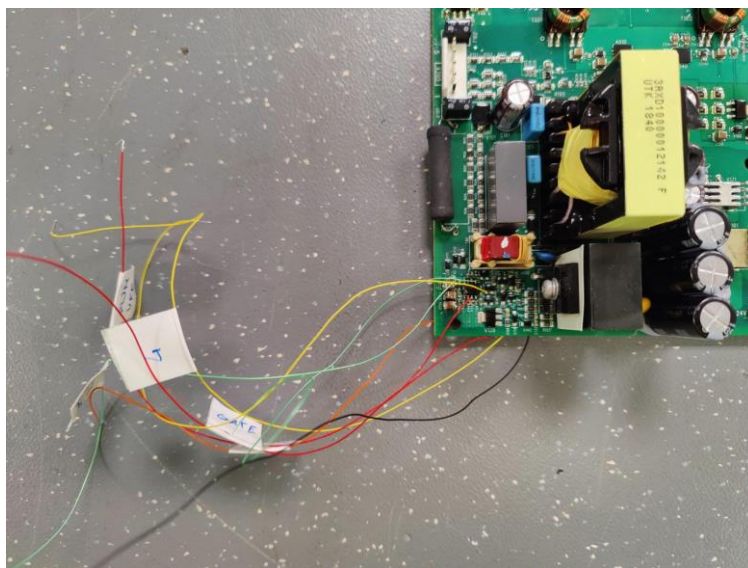
### 3.1.3 Kolmas juhtum

Kolmanda juhtumi puhul ei avastatud samuti visuaalseid vigu ning ka kaitsmed olid korras. Sooritati esmane test ning selgus, et plaat käima ei läinud. Otsiti sobivad mõõtepunktid, kust näha, kas MOSFET lülitab. Punktidesse joodeti juhtmed, mille otsa ostsilloskoobi proovikud panna ning prooviti taaskord plaati käima panna. Ostsilloskoobi pealt oli näha, et MOSFET ei lülita, millest järeldati, et MOSFETi tööd juhtib PWM modulaator ei tööta.

Seejärel joodeti testpunktide juhtmed PWM sisenditele ja väljunditele, et näha, kas sisendid on õiged ja kas ka mõnes väljundis on midagi näha. Antud PWM regulaator on ST Microelectronics L6565D ning selle andmelehest on näha, et sisse lülitamiseks on vajalik toita regulaatorit pingega 12,5-14,5 V [3]. Nagu peatükis 2.2 on mainitud, peaks hakkama INT-54 tööle, kui toitepinge jõuab 410 V-ni, kuid antud juhul saab PWM endale vajaliku toite tööle hakkamiseks alles siis, kui INT-54 toide on 580 V. Katse käigus nähtigi, et trükkplaat hakkab tööle pingega 580-600 V, mis ei ole normaalne talitlus.

PWM asub INT-54 trükkplaadi peaaheles ning seetõttu hakati uurima peaaheles olevaid komponente. Multimeetriga mõõtmiste tulemused ei näidanud ühegi komponendi konkreetset viga ning seetõttu otsiti veel võimalikke mõõtepunkte peaaheles, et mõista, miks PWM regulaatori käivitamiseks vajalik pinge alles 580 V juures piisav on. Mõõtmiste käigus avastati, et ahelas on kolm filtreerivat kondensaatorit, mis lekivad maha. Peale nende kondensaatorite vahetamist toimis INT-54 nii nagu peaks. Joonis 3.3 on näha, kui palju juhtmeid on korraga ühes plaadi piirkonnas, ning mille jootmine võtab komponentide tiheda paigutuse tõttu aega. Antud analüüsi peale kulus palju aega, sest viga ei olnud võimalik koheselt visuaalselt tuvastada ja kondensaatorite lekkimist on keeruline tuvastada. Multimeetriga kondensaatorite mahtuvust trükkplaadil mõõta on

keeruline, sest ahelates on ka teisi mahtuvuslikke komponente ning mõõtmiste tulemused ei pruugi olla täpsed.



Joonis 3.3 PWM regulaatori ja MOSFETi töö hindamiseks joodetud mõõtepunktide juhtmekogu

### 3.1.4 Neljas juhtum

Visuaalse kontrolli käigus võimalikke veakohti ei tuvastatud, kuid üks kaitsetest oli läbi põlenud. Antud kaitse vahetati ning tehti esmane test. Esmase testi käigus INT-54 tööle ei läinud ning seetõttu joodeti MOSFETi lülitamise mõõtmiseks vajalikud juhtmed mõõtepunktidesse. Mõõtmiste käigus nähti, et MOSFET ei lülita ning järgmiseks mõõdeti PWM regulaatori sisendeid ja väljundeid. PWM regulaatorile tehtud mõõtmistest tuvastati, et sisendpinged on korras, kuid väljundisse ei ilmu vajalikku pingekuju, et MOSFET lülitama hakkaks. Tulemustest järeldati, et PWM regulaator ise võib olla vigane ning seetõttu vahetati see välja.

Peale PWM regulaatori vahetust prooviti, kas trükkplaat hakkab tööle, kuid endiselt esines mingi viga, sest trükkplaadil ei olnud väljundit. Vahel võivad komponendid jootmise käigus kuumast kahjustada saada ja seetõttu mõõdeti taas, kas PWM on korras. PWM oli korras, kuid MOSFET endiselt ei lülitanud, seega vahetati MOSFET samuti välja. Pärast MOSFETi vahetust hakkas INT-54 trükkplaat tööle ning ka kõik kõrvalahelad töötasid korralikult.

## 3.2 Mõõtmisteks kuluv aeg

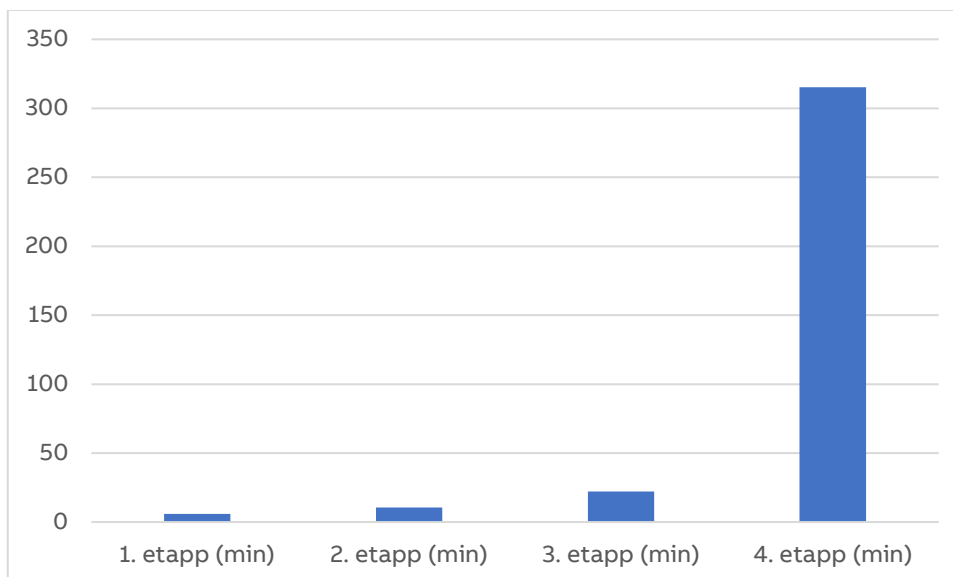
Tabel 3.1 on näha kõikidele antud töö jaoks tehtud analüüsidele kulunud aeg etappidesse jaotatuna ning keskmistest aegadest on koostatud graafik (Vt. Joonis 3.4) visualiseerimaks tulemusi. Graafikul on suurepäraselt näha, kui palju võtab keskmiselt rohkem aega 4. etapi teostamine, mis ongi nimelt mõõtmiste teostamine. Sellest võib

järeldada, et kui mõõtmiste etapile kulutatavat aega vähendada, saaks suurendada oluliselt tehtavate analüüside arvu ning ettevõtte efektiivsus tõuseks. Hetkel kulub mõõtmiste teostamiseks pool päeva, kuid vastava lahenduse puhul saaks seda aega vähendada vähemalt poole võrra.

Mõõtmiste teostamise aja hulka arvatakse ka mõõtepunktidesse juhtmete jootmine, mis on tihtipeale ajakulukas protsess, sest komponendid on väikesed ja väga tihedalt üksteise lähedale paigutatud. Juhul kui mõõtmisi oleks võimalik teostada ilma juhtmete jootmiseta, saaks mõõtmiste etapile kuluvat aega vähendada.

Tabel 3.1 Veeanalüüsiks kulunud aeg etappides

Juhtumi nr.	1. etapp (min)	2. etapp (min)	3. etapp (min)	4. etapp (min)
1	9	21	15	118
2	6	5	17	82
3	4	6	30	780
4	5	10	27	281
Keskmine (min)	6	10,5	22,25	315,25



Joonis 3.4 Keskmine etappide ajakulu

### 3.3 Tööohutuse riskianalüüs

Selleks, et katsete teostamise ajal viga ei saadaks, on tarvilik teostada kogu protsessile riskianalüüs. Riskianalüüsi eesmärgiks on tuvastada ning anda hinnang kõigile töökeskkonnas leiduvatele ohtudele [4]. Riskianalüüsis tuuakse välja võimalikud riskiolukorrad, mis võivad protsessi teostamise ajal tekkida. Selle abil teadvustatakse võimalikke riske ning seetõttu aitab see neid ära hoida. Ideaalne protsess on aga protsess, kus riskid on olematud ning selleks, et riske eemaldada on tarvilik teha riskianalüüs. Riskianalüüsi põhjal näeb ettevõtte, milliseid riskikohti peaks kindlasti parandama ja selle abil saab selgitada, milline süsteem kõige paremini ettevõttele sobiks.

Riskianalüüs teostatakse viies etapis:

1. Info kogumine keskkonna ja protsessi kohta.
2. Keskkonna ohutegurite tuvastamine.
3. Ohuteguritega seotud riskide hindamine, kus hinnatakse tagajärge, raskusastet ning juhtumise tõenäosust.
4. Riski kõrvaldamiseks ja vähendamiseks vajalike sammude kavandamine.
5. Dokumenteerimine. [4]

Antud bakalaureuse töö raames koostati riskianalüüs trükkplaatide veaanalüüsi protsessi kohta. Riskianalüüsi tulemuste põhjal on näha, et kõige suuremat ohtu kujutab kõrgepinge toiteallikaga testide läbi viimine. Teste tehakse laua peal pleksiklaasist katte all. Ohtu kujutab põhiliselt asjaolu, et ei saa veendunud olla, et testitavad seadmed peale kaane eemaldamist ei ole enam pingestatud. Samuti kujutab mõõdukat ohtu jootmise protsess, sest kasutatakse väga kuumi seadmeid, mis võivad kasutajale vigastusi tekitada. Seetõttu oleks hea kui leitav lahendus oleks võimaline vähendada kõrgepinge toiteallikaga tehtavate katsete ohutust ning eemaldada vajadus niivõrd palju kasutada jootmist. Riskianalüüs on nähtaval lisas.

## **4. ETTEVÕTTE VISIOON JA NÕUDMISED VEAANALÜÜSI PARENDAMISEKS**

### **4.1 Tööohutuse parendamine**

Tööohutus on töökorralduslike abinõude ja tehnikavahendite süsteem sellise töökeskkonna saavutamiseks, mis võimaldab töötajal teha tööd oma tervist ohtu seadmata [5]. Tööohutus on antud ettevõttes olulisel kohal. Ettevõtte hoolib oma töötajate heaolust ning soovib, et töökeskkond oleks kõigile ohutu. Esmalt püütakse tagada ohutust inimeste koolitamisega, et tekitada teadlikkust võimalike riskide suhtes ning õpetada inimesi teatud olukordades võimalikult ohutult käituma. Muidugi ei saa toetuda ainult inimeste teadlikkusele ning loota, et kui kõike tehakse nii nagu ette on öeldud, siis probleeme ei esine. Alati võib juhtuda, et inimesel läheb meelest mõni oluline tegevus ning ka selle peale tuleb mõelda. Ohtliku olukorra tekkimises ei pruugigi tegelikult süüdi olla inimene. Võib juhtuda, et kasutatavad vahendid lähevad järsku katki ning ohuolukord tekib selle tõttu.

Praegune mõõtmiste protsess ei ole kõige ohutum, sest küllaltki kõrge pinge all olevad testitavad trükkplaadid pannakse laua, mis on kaetud isoleermaterjaliga, peale ning kaetakse pleksiklaasist kastiga. See aga ei ole ideaalne lahendus, sest katet saab eemaldada ka sel ajal, kui testseade on pingestatud. Ettevõtte arvates oleks hea, kui testseadmele saaks ligi alles siis, kui süsteemis pinget enam ei esine. See tähendab, et ideaalne süsteem võiks olla kamber, mis lukustub automaatselt, kui toiteallikas sisse lülitatakse.

### **4.2 Veaanalüüsi mõõtmisprotsessi parendamine**

Nii nagu eelnevalt ka mainitud, on praegu kasutusel olev mõõtmisprotsess küllaltki aeganõudev. Seetõttu muutub kogu analüüsiprotsess aeglaseks ja analüüsi ootavate toodete arv kuhjub. Analüüsi ootavate toodete hulgas on tihti tooteid, mille kohta soovib klient ka ise analüüsi tulemust saada ning seetõttu ei ole hea, kui analüüsid viibivad. Klient võib vahel toodete kuhjumise tõttu analüüsi tulemusi oodata mitu kuud ning see võib kaasa tuua kliendi pahameele. Viivituste vältimiseks, oleks vaja leida lahendus, mis aitaks analüüsi kiiremini sooritada. Põhjusel, et mõõtmisprotsess on analüüsi kõige aega nõudvam osa, leidis ettevõtte, et see võiks olla etapp, mille ajakulu peaks vähendama. Esmalt võiks leida viisi, kuidas teostada mõõtmisi nii, et testpunktidesse ei peaks juhtmeid käsitsi jootma.

Lisaks oleks vajalik ka mõõtmisprotsessi ohutuse parendamine. Praegune protsess võib muutuda hajameelsusest tulenevate vigade tõttu ohtlikuks ning oleks hea, kui saaks inimesest tingitud eksimuste tõenäosuse võimalikult väikseks muuta. See tähendaks süsteemi, mida ei saa enne pingestada, kui kõik pingestatavad osad ei ole kaitstud, kas kattega või mõnel muul viisil.

## 4.3 Tehnilised nõudmised

Süsteem peaks suutma tuvastada lühiseid, lahtiseid ahelaid ning seda võimalikult suure täpsusega ja suutma kontrollida kõiki trükkplaadil olevaid ahelaid võimalikult lühikese aja jooksul. Hetkel kasutusel oleva meetodiga, nagu on näha Tabel 3.1, kulub mõõtmistele keskmiselt 315,25 minutit. Leitav lahendus peaks võimaldama veakohta leida vähemalt poole kiiremini. INT-54 plaat on varustatud kontrollpunktidega, mida saab kasutada mõõtmiste teostamiseks. Trükkplaadid on aga kaetud, mistõttu peab arvestama, et proovikud peavad suutma katet läbistada ning seejuures usaldusväärset ja täpselt mõõtma.

### 4.3.1 Proovikule rakendatava jõu mõõtmised

Selleks, et hinnata, kui suure jõuga peab suutma proovik kaetud plaadile suruda, tehti katse. Katse teostamiseks kasutati multimeetrit, kaalu, terava otsaga proovikut ning statiivi, kuhu proovik kinnitati. Kuna kaal väljastas tulemused grammides, arvutati grammid ümber Newtoniteks. Enne katse teostamist joodeti üks juhe trükkplaadile (Vt. Joonis 4.1). Seejärel kinnitati plaat kahe puidust liistu külge, mis hoiaksid plaati stabiilselt kaalu peal (Vt. Joonis 4.2). Trükkplaat asetati kaalule, mille taha asetati statiiv koos proovikuga. Multimeeter ühendati plaadile joodetud juhtmega ning statiivil oleva proovikuga (Vt. Joonis 4.3). Viimaks lülitati multimeeter takistuse mõõtmise režiimile ning hakati vaikselt proovikut rulliku abil trükkplaadile suruma (Vt. Joonis 4.4). Jälgiti, millal multimeetri näit on stabiilne ning võeti kaalu näit. Teadvustati, et säärane mõõtmisviis ei ole väga täpne ning pigem otsiti umbkaudset jõudu, mida peaks kindlasti proovikule rakendama. Katse tulemused on näha Tabel 4.1.

Teisendamaks mõõtetulemused grammidest Newtoniteks kasutati valemit:

$$F = mg = \frac{m}{1000} \cdot g \quad (4.1)$$

kus

F – raskusjõud (N)

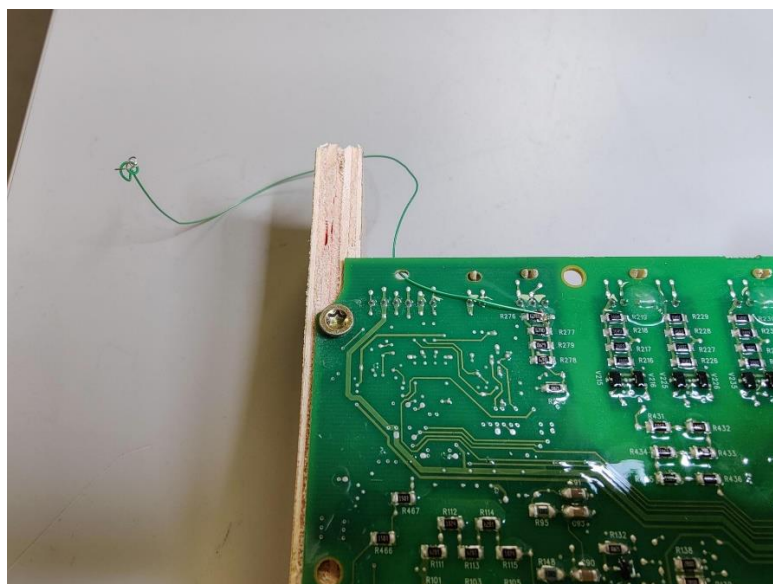
m – raskusjõud (kg)

g – gravitatsioonikonstant ( $m/s^2$ )

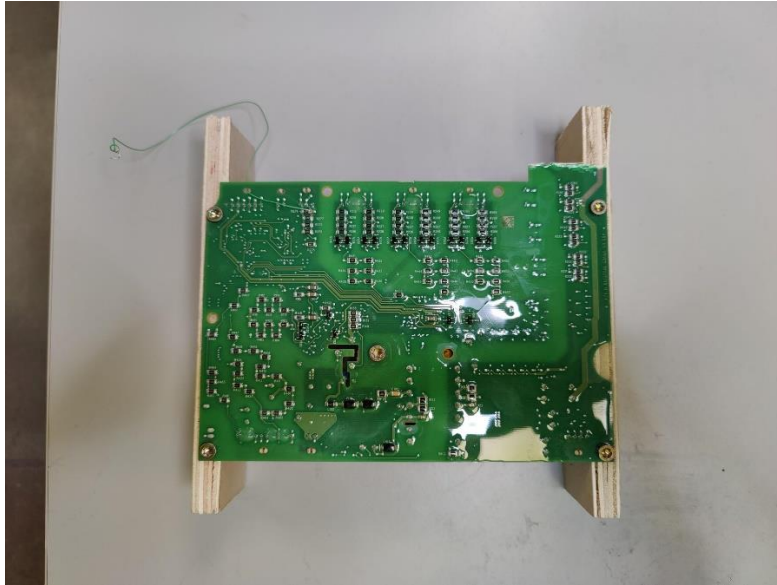
Mõõtmised teostati maapinna ligidal, mistõttu saab gravitatsioonikonstandiks võtta 9.81  $m/s^2$ . Arvutuste tulemused on näha Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Proovikule rakendatava jõu mõõtmiste tulemused ning teisendused

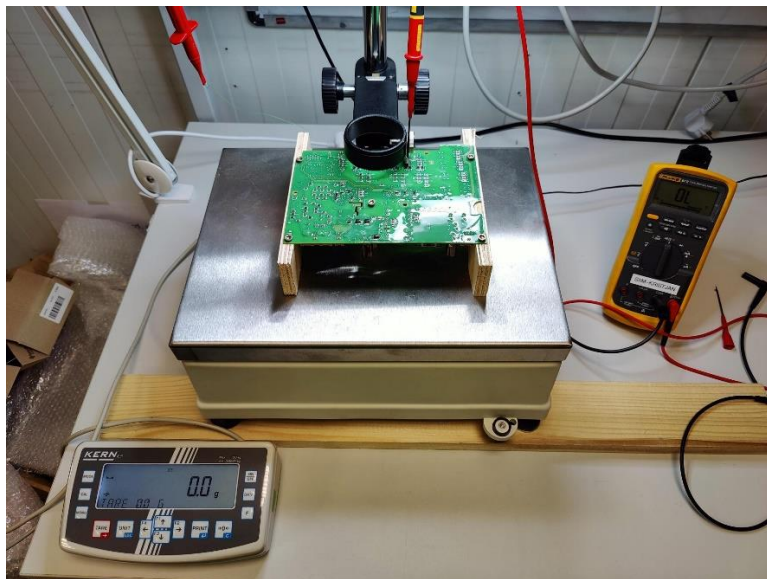
Mõõtetulemus (g)	Arvutuste tulemused (N)
1158	11,36
1217	11,94
1286	12,62
1101	10,80
1118	10,97
877	8,60
987	9,68
895	8,78
1267	12,43
1257	12,33



Joonis 4.1 Trükkplaadile joodetud mõõtejühe

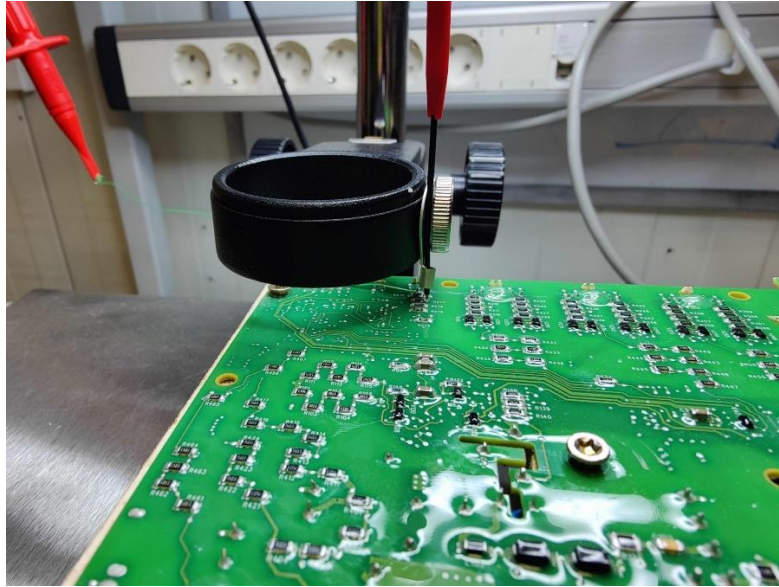


*Joonis 4.2 Trükkplaat toetavatel liistudel*



*Joonis 4.3 Proovikule rakendatava jõu mõõtmise installatsioon*





*Joonis 4.4 Proovik trükkplaadile surutuna*

## **4.4 Kriteeriumid**

Ettevõtte sooviks, et leitav süsteem oleks võimalikult universaalne. Antud ettevõtte toodetes on mitmeid erinevaid trükkplaate, mille tööpõhimõtted ja parameetrid erinevad. Kuna ettevõtte soovib lahendust veaanalüüsi tarbeks kasutada, siis on vaja tihti testida mitmesuguseid trükkplaate ning seda tehakse vaheldumisi. Seetõttu olekski vajalik, et süsteem ei oleks ainult ühe trükkplaadi testimiseks loodud, vaid saaks vajadusel ka erinevaid trükkplaate analüüsida.

Süsteem plaanitakse paigaldada veaanalüüsi laborisse, mis ei ole väga ruumikas. Kuna laboris on palju kasutatavaid seadmeid ja süsteeme on olemas olev ruum piiratud ning sel põhjusel sooviks ettevõtte leida lahenduse, mis ei võtaks väga palju ruumi. Ideaalis sooviks ettevõtte näha lahendust, mille saaks asetada töölaua peale, kuid kui see ei osutu võimalikuks, on variant leida lahendus ka töölaua suuruses.

## 5. LAHENDUSED

Probleemile otsiti lahendusi juba olemas olevate meetodite seast. Ettevõtte poolt antud kriteeriumite hulgas oli ka süsteemi turvalisus ja seetõttu leiti, et parim oleks lahendus, mis on mõne teise antud valdkonnas tegutseva ettevõtte toodanguks, sest nende töökindlus ja ohutus on juba eelnevalt testitud. Trükkplaate testitakse igas tehases, kus neid toodetakse ning seetõttu on testimiseks loodud süsteemid ja seadmed internetist leitavad. Antud bakalaureuse töö käigus otsiti ettevõtte ette antud parameetreid ja kriteeriumeid arvesse võttes sobivamad lahendused ja seadmed.

### 5.1 Erinevate lahenduste kirjeldus

Peamisteks trükkplaatide testimise meetoditeks on AOI, AXI, ICT ja FCT meetodid [6]. Need meetodid on turul laialdaselt kasutatud ning enamasti kasutatakse mitut meetodit korraga, sest iga meetod keskendub erinevate vigade otsimisele. Need meetodid on välja töötatud kiireks ja lihtsaks trükkplaatide analüüsiks. Küll aga on iga trükkplaat erineva ehituse ja funktsiooniga, mis tähendab, et need meetodid ei ole universaalsed, vaid neid tuleb kohandada vastavalt testitavale trükkplaadile.

#### 5.1.1 AOI meetod

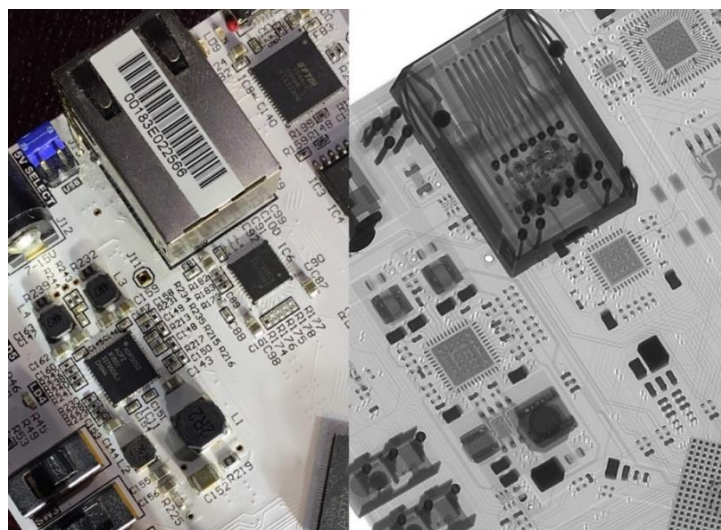
AOI ehk *Automated Optical Inspection* meetod on automatiseeritud visuaalse kontrolli meetod. AOI süsteemis on vähemalt üks kaamera, mis on võimeline kas filmima või pildistama analüüsitava trükkplaati. Süsteemi on varem sisestatud näidis trükkplaat, mis on ideaalne eksemplar ning see võetakse eeskujuks. Süsteem tuvastab videolt või piltidelt erinevusi näidise suhtes ning väljastab need kasutajale. Antud meetod tuvastab plaatidelt visuaalseid vigu ehk peamiselt trükkplaadi pinnal olevaid ebatasasusi, kriime ning plekke. Samuti saab AOI meetodit kasutades tuvastada valesid või puudu olevaid komponente ning jootevigu. [6]

Kuigi AOI suudab tuvastada palju enamesinevaid vigu trükkplaatidel ei suuda see teha otseseid mõõtmisi. AOI on peamiselt visuaalsete vigade tuvastamiseks ning seetõttu on seda hea kasutada koos testimis meetodiga, mis suudab teostada ka mõõtmisi. Veel üks kitsaskoht AOI puhul on see, et selle efektiivsus sõltub kaamera nägemisulatusest ning tihti võivad madalamad komponendid trükkplaatidel jääda kõrgemate komponentide varju. [6]

### 5.1.2 AXI meetod

AXI ehk *X-ray Inspection* meetod kasutab trükkplaadil olevate vigade tuvastamiseks röntgen kiiri [6]. AXI meetodi puhul tehakse trükkplaadist röntgen pildid ning analüüsitakse tulemusi. Kuna röntgen kiired ei peegeldu trükkplaadi pinnalt tagasi, vaid läbivad seda, saab AXI meetodi abil tuvastada vigu, mida palja silmaga ei näe [6]. Pildidel on näha heledamaid ja tumedamaid kohti ning heledamates kohtades on röntgen kiirte läbivus suurem kui tumedates. See tähendab, et tihedamad materjalid paistavad pildil tumedamad (Vt. Joonis 5.1). Kuna trükkplaatides on tihti erinevaid kihte ning plaadi seesmistes kihtides on samuti elektri ahelad, saab AXI meetodit kasutades näha, ega seesmistes kihtides olevad ahelad katkestatud pole. Samuti suudab AXI meetod tuvastada komponentide sisemisi vigu ning jootmise defekte.

AXI meetodi abil on võimalik analüüsida tiheda komponendipaigutusega trükkplaate ning hüveks on ka see, et analüüsida saab ka plaadi sisu [6]. Küll aga suurema plaadi puhul võib vigade otsimine võtta palju aega, sest pildile jääb palju informatsiooni. Seda meetodit on hea kasutada juhul, kui on tarvis näha kindlat trükkplaadi piirkonda.



Joonis 5.1 Trükkplaadi röntgen pilt võrrelduna silmaga nähtavaga [7]

### 5.1.3 ICT meetod

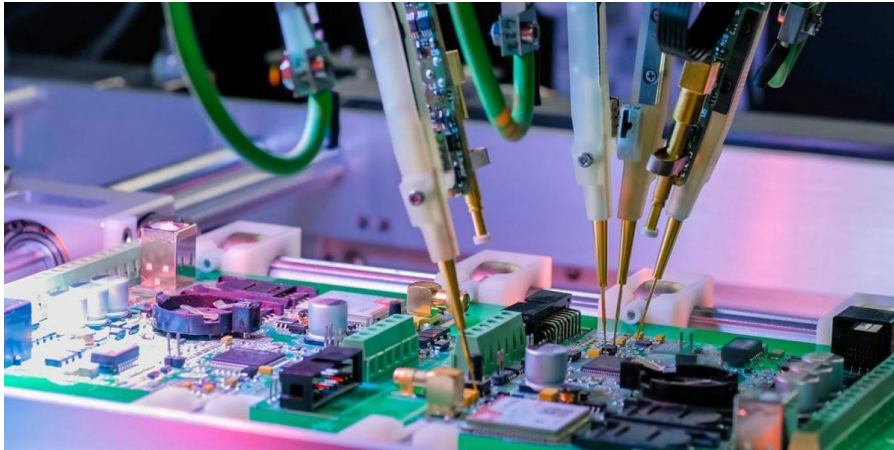
ICT ehk *In-circuit Testing* meetod on konkreetne mõõtmise meetod. See meetod mõõdab trükkplaadi igat ahelat ning komponenti ja suudab tuvastada katkiseid komponente mõõtes nende takistust, pingelangu ning ka mahtuvust. Samuti tuvastab see trükkplaadil lühiseid ja avatud ahelaid. Mõõtmiste teostamiseks antud meetodi puhul on kaks süsteemi: [6]

- *Flying probe* – mõõtmisi teostatakse vähemalt kahe x-, y- ja z-teljel liikuva proovikuga. Süsteemile antakse sisendiks trükkplaadi fail, kuhu on märgitud

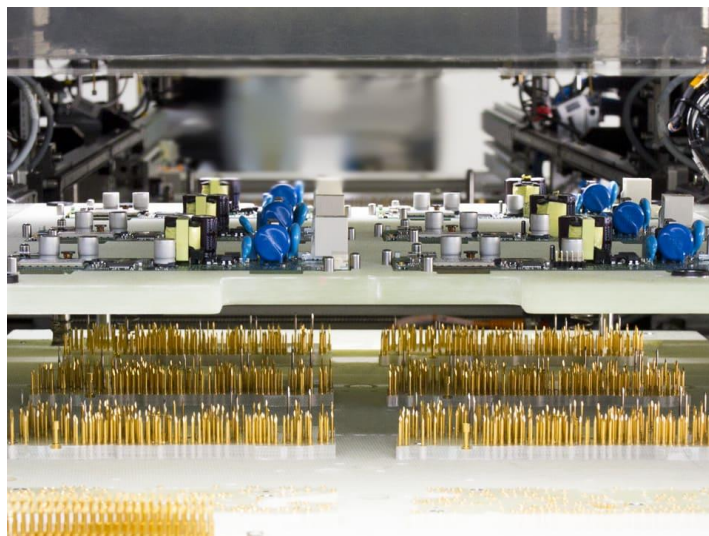
vajalikud testpunktid ning täpsed trükkplaadi mõõdud. Selle abil leiab süsteem koordinaadid ning teostab mõõtmised automaatselt (Vt. Joonis 5.2). [6]

- *Bed-of-nails* – mõõtmiste teostamiseks on loodud konkreetne alus, kuhu on paigutatud proovikud. Trükkplaat asetatakse proovikute peale ning surutakse kaanega kindlalt kinni. Seejärel toestatakse mõõtmised vastavalt peale laetud tarkvarale erinevaid individuaalseid proovikuid aktiveerides. Antud süsteemis võib olla sadu või tuhandeid individuaalseid proovikuid (Vt. Joonis 5.3). [6]

ICT test viiakse läbi trükkplaadile toidet andmata, mis tähendab, et eeldatakse, et kui trükkplaat on õigesti disainitud ning kui kõik mõõtmised on korras, on ka trükkplaat töökorras ning täidab oma funktsiooni. *Bed-of-nails* süsteemis on palju kalleid proovikuid, mis ajapikku kuluvad ja sellest tulenevalt on selle süsteemi ülal pidamine kallis. Samuti ei teosta antud meetod teste terminalidest, mistõttu terminalidest tulenevad vead võivad jääda märkamatuks. [6]



Joonis 5.2 Flying probe tester [8]



Joonis 5.3 Bed-of-nails tester [9]

### 5.1.4 FCT meetod

FCT ehk *Funktional Testing* ehk funktsionaaltesti meetod testib trükkplaadi kogu funktsionaalsust. See ühendub trükkplaadi sisenditesse ja väljunditesse, et matkida keskkonda, milles plaat on mõeldud töötama. Näiteks, kui trükkplaat on mõeldud vaheldi töö kontrollimiseks, siis matkib FCT tester väljundis olevat vaheldid, et mõista, kas trükkplaat toimib õigesti. FCT testrid on tihti sama unikaalsed kui trükkplaadid ise, sest need peab tegema täpselt trükkplaadi funktsiooni ja parameetrite järgi. Funktsionaalne testimine on keeruline süsteem, sest tuleb täpselt paika panna, milliseid osi trükkplaadilt testida, milliseid sisendeid ja väljundeid kasutatakse ning millist signaali peab igasse sisendisse andma ja millist signaali tuleks oodata igast väljundist. Paika sätitavate parameetrite rohkuse tõttu, võib säärase süsteemi üles seadmine ajakulukaks kujuneda. [6]

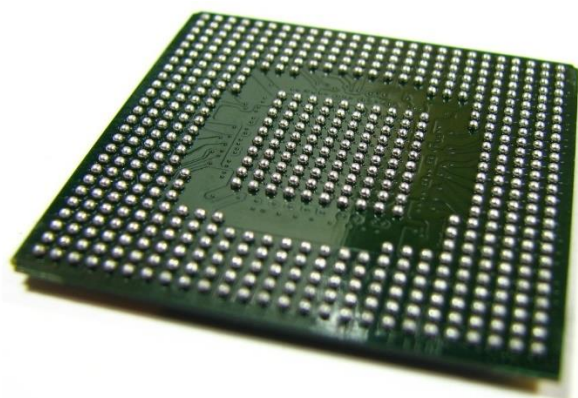
Põhimõtteliselt on FCT test väga hea testimise meetod plaatide puhul, mille funktsionaalsuses ei olda kindlad. Testimise käigus ka pingestatakse trükkplaat ning sellest tulenevalt on võimalik näha, kui palju plaat energiat tarbib ja samuti suudab süsteem kindlaks teha probleeme, mis on seotud analoog- ja digitaalalahelatega. Küll aga, nagu eelpool mainitud, võib FCT testri üles seadmine võtta palju aega ning kulutada ressursse, sest tegemist on täppistööga. Antud meetod ei suuda konkreetseid veakohti tuvastada, vaid ainult teha kindlaks, millises ahelas tõenäoliselt vigane koht asetseb. FCT tester koosneb tavaliselt kapist, kus on toiteallikad, mõõteseadmed ning trükkplaadi testimise alus (Vt. Joonis 5.4). [6]



Joonis 5.4 FCT tester [10]

## 5.2 Lahenduste võrdlus ja kokkuvõte

Peatükis 5.1 kirjeldatud lahenduste visualiseerimiseks loodi Tabel 5.1. Tabelis on võrreldud meetodite võimekusi tuvastada trükkplaatidel levinud defekte. Tabel tekitab ülevaate, millised meetodid oleks ettevõtte soovidele vastavalt kõige sobivamad. Tabelis ei ole võrdlusesse lisatud FCT meetodit, sest see ei analüüsi üksikuid punkte trükkplaadil ning ei tuvasta konkreetseid veakohti. FCT meetodi põhimõte erineb ülejäänud meetoditest niivõrd palju, et võrdlevasse tabelisse ei oleks seda sobilik lisada. Tabeli lõpus leiab võrdluse BGA-ga seotud defektide kohta. BGA ehk *Ball Grid Array* tehnoloogia on laialdaselt kasutusel olev meetod kinnitamaks tiheda ühenduspunktide paigutusega mikroelektronikat trükkplaatidele [11]. Selle meetodi käigus kasutatakse jootevallide maatriksit, mille abil kinnitatakse komponendid trükkplaadile (Vt. Joonis 5.5) [11]. Kui komponent on paigutatud trükkplaadile, siis peale vaadates seda maatriksit näha ei ole.



Joonis 5.5 Ball Grid Array [12]

Tabel 5.1 Analüüsi meetodite võrdlus [6]

Defekti tüüp	AXI	AOI	ICT
<b>Jootmise defektid:</b>			
Avatud ahelad	Jah	Jah	Jah
Jootesillad	Jah	Jah	Jah
Ebapiisav joode	Jah	Jah	Ei
Jootte tühimikud	Jah	Ei	Ei
Liigne joode	Jah	Jah	Ei
Jootte kvaliteet	Jah	Ei	Ei
<b>Komponendi defektid:</b>			
Tõstetud komponendid	Jah	Jah	Jah
Puuduvad komponendid	Jah	Jah	Jah
Paigaldusvead	Jah	Jah	Jah
Vale väärtus	Ei	Ei	Jah
Vigane komponent	Jah/Ei	Ei	Jah

<b>BGA defektid:</b>			
BGA lühised	Jah	Ei	Jah
BGA avatud ühendused	Jah	Ei	Jah

Tabel 5.1 on näha, et kõige enam nimetatud vigu suudab tuvastada kasutades AXI meetodit, kuid selle meetodiga ei ole võimalik konkreetseid mõõtmisi teostada. ICT meetodi puhul aga on võimalik komponente ka üksikhaaval mõõta ning seeläbi tuvastada ka üksikkomponendi väärtuste defekte. AOI meetod on tabelist tulenevalt kõige vähem võimekam ning see ei suuda rahuldada ettevõtte vajadusi mistõttu see meetod ka välistatakse.

FCT on põhimõttelt hea meetod, sest selle abil näeb, kas trükkplaat töötab realses rakenduses nii nagu see peaks, kuid kuna enamasti saabuvad veaanalüüsi siiski vigased trükkplaadid, siis ei ole see meetod kõige sobivam. Trükkplaadid, mida veaanalüüsi käigus analüüsitakse on tihti juba pikalt kasutusel olnud, mis tähendab, et funktsionaalsust nende puhul otseselt testimata ei pea, vaid olulisem on leida täpne vea tekkimise põhjus ja koht. FCT süsteemi üles seadmine võib võtta palju ressursi, kuid konkreetset veakohta selle abil tuvastada on siiski raske, mistõttu välistatakse ka see meetod.

AXI meetod on suurepärase meetod tuvastamiseks palju defekte, mida palja silmaga ei näeks. Seetõttu on tegemist suurepärase tööriistaga, kuid sellest saadud informatsiooni töötlemine on samuti ajakulukas tegevus ning antud juhul on eesmärgiks võimalikult kiire lahenduse leidmine. AXI meetodit oleks hea kasutada integreeritult süsteemis, kus on kasutusel ka teine analüüsi meetod milleks oleks näiteks ICT meetod. ICT tuvastaks sellisel juhul mõõtmiste teostamise abil veakoha ning seejärel saaks AXI meetodiga teha põhjalikuma analüüsi, et välja selgitada, mis täpselt oli vea tekke põhjuseks. Antud töö eesmärgiks aga on leida lahendus, mis suudaks mõõtmiste protsessi piisavalt kiiresti läbi viia ning seetõttu hetkel välistatakse ka AXI meetod. Küll aga saaks AXI meetodi analüüsi hiljem analüüsi süsteemi lisada, et analüüsid oleksid usaldusväärsemad ja täpsemad.

Välja vaadatud meetoditest on ette seatud eesmärkide ja parameetrite järgi kõige sobivam ICT meetod. Seetõttu valiti välja mitmeid seadmeid, mis kasutavad ICT meetodit ning mis võiksid soovitud rakendusse sobida. Nende seadmete parameetritest koostati võrdlus ning võrdluse põhjal otsustati, milline seade sobiks kõige paremini.

Seadmete otsimise käigus leiti vaid üks seade, mis teostab mõõtmisi proovikute abiga ning mida saaks paigaldada ka laua peale. Laua peale mahtuvaid ICT süsteemi

kasutavaid seadmeid on veel, kuid need on kas *bed-of-nails* tehnoloogiat kasutavad või siis läbi terminali ühenduvad. Antud juhul on vajalik universaalsus ning üksikute komponentide testimise võimekus ning seetõttu mainitud süsteeme arvesse ei võeta. *Bed-of-nails* süsteem luuakse iga trükkplaadi jaoks eraldi ning kuna soovitavas rakenduses testitaks mitmeid erinevaid trükkplaate, siis selline lahendus ei sobiks. Kõige universaalsem lahendus oleks *Flying probe* süsteem, sest see võimaldab iga trükkplaadi testimise jaoks eraldi sobiva programmi kirjutada. Seetõttu valitakse lahendused *Flying probe* meetodit kasutavate seadmete hulgast.

### 5.2.1 Huntron Access 2 Prober

Huntron Access 2 Prober (Vt. Joonis 5.6) on ühe proovikuga ning kasutab *Flying probe* meetodit. See on mõeldud testimaks keskmisi või suuri trükkplaate, kuid seade ise on laua peale pandav. See tähendab, et seade ei võta liigselt ruumi ning selle seadme integreerimine praegusesse laborisse ei oleks keeruline. Küll aga ühe prooviku tõttu võib mõõtmine osutada keeruliseks, sest see tähendab, et mitmeid komponente, mis ei ole ühendatud otse maaga, pole võimalik mõõta. Sellisel juhul mõõdetaks kogu ahelat korraga ning antud seadme mõõtmistele lisaks peaks tegema siiski ka käsitsi üksikute komponentide mõõtmisi. Ohutuse poolest pole tegemist kõige ohutuma lahendusega, sest ala, kus mõõtmised teostatakse, ei ole millegagi kaetud. [13]



Huntron Access 2 Prober

Joonis 5.6 Huntron Access 2 Prober [13]

### 5.2.2 Huntron Access DH2 Prober

Huntron Access DH2 Prober (Vt. Joonis 5.7) on kahe proovikuga *Flying probe* süsteem. Selle puhul ei ole aga tegemist laua peale asetatava seadmega, vaid sellel seadmel on oma kapp, kuhu see paigaldatud on. Küll aga on selle seadme puhul ohutus paremini tagatud kui Access 2 seadme puhul, sest kapp, milles seade on, on suletav ning mõõtmiste ajal on pingestatud osad kaetud. See süsteem on loodud testimaks nii



väikseid kui ka suuremaid trükkplaate. Antud seadme kahe prooviku tõttu on võimalik mõõtmisi teostada kõigile komponentidele ning süsteem on ka täpsem, kui Huntron Access 2. [14]



Joonis 5.7 Huntron Access DH2 Prober [14]

### **5.2.3 SPEA 4080**

SPEA 4080 (Vt. Joonis 5.8) on sarnasel eelnevatele seadmetele *Flying probe* süsteem. SPEA 4080 seade on varustatud kaheksa proovikuga, millest neli teostavad mõõtmisi plaadi peal ning ülejäänud neli plaadi all. SPEA sõnul on tegemist väga kiire ja universaalse süsteemiga, sest seadet on võimalik lihtsasti programmeerida Leonardo 4 tarkvara abil. See seade ei ole küll laua peale paigaldatav, vaid on eraldi seisev kapp, kuid see lahendus tagab parima ohutuse. [15]



Joonis 5.8 SPEA 4080 [15]

#### 5.2.4 Lahenduste kokkuvõte

Eelnevalt mainitud seadmed valiti turuanalüüsi käigus pidades kinni ettevõtte nõudmistest. Ükski leitud lahendus ei kata täielikult nõudmisi ning seetõttu koostati valik. Kõikide valikus olevate seadmete kohta saadi hinnapakkumine ning ettevõtete poolne kinnitus, et seadmed suudavad proovikutele rakendada Tabel 4.1 kajastatud jõu.

Huntron Access 2 Prober on väike ning seda on võimalik asetada töölaua peale, kuid sellel on vaid üks proovik ning ka ohutus ei ole täielikult tagatud. Juhul, kui otsustaks kasutusse võtta just Huntron Access 2 Prober seadme, oleks tarvilik luua sellele ohutu keskkond. Näiteks asetada see seade kinni käivasse kappi, mis oleks testimise ajal suletud, või katta testimise ajaks seade pleksiklaasist kattega.

Huntron Access DH2 Prober oleks parem lahendus kui Access 2 prober, sest sellel on kaks proovikut ning see asetseb suletavas kapis. Küll aga on antud seade suurem ning selle integreerimine laborisse vajaks suuremat tähelepanu ning ruumi planeerimist.

Mainitud lahendustest kõige võimekam on SPEA 4080, millel on kaheksa proovikut ning lihtne programmeerimise tarkvara. Kaheksa proovikuga on võimalik mõõtmised kiirelt teostada ning kuna seade on võimeline mõõtma samaaegselt nii trükkplaadi pealt kui ka alt, siis ei pea trükkplaati vahepeal seadmes ümber keerama. Küll aga on SPEA 4080 samuti suurem seade, mida laua peale asetada poleks võimalik ning mille integreerimine laborisse vajaks ruumi planeerimist.

## 5.2.5 Tasuvuse hinnang

Selleks, et oleks võimalik hinnata seadme võimalikku kasulikkust, teostati tasuvusarvutused. Arvestades, et INT-54 trükkplaadil on 517 testpunkti ning 136 testpunkti puhul on mõõtmiste teostamise aeg 3,58 min, arvestatakse, et ligikaudne aeg, mis kuluks INT-54 mõõtmiste teostamiseks oleks  $\frac{517}{136} \cdot 3,58 = 13,61$  min [2] [16]. Selle ajaga suudab seade mõõta kõiki ühendusi, mis trükkplaadil on seega ei pea mõõtmisi teostama mitmeid kordi. Seega Tabel 3.1 välja toodud mõõtmistele kuluva keskmise ajaga (315,25 min) võrreldes oleks *Flying probe* seadet kasutades aja sääst ligikaudu 23 kordne.

Statistikaameti andmete põhjal oli 2023. aasta neljandas kvartalis arvutite, elektroonika- ja optikaseadmete tootmise tegevusalal keskmine töötaja brutokuupalk 1866€ [17]. See aga ei kajasta täielikult tööandjale rakenduvat kulu sest lisaks sellele peab tööandja tasuma ka sotsiaalmaksu (33%) ning tööandja töötuskindlustusmaksu (0,8%). See tähendab, et tööandja kulu on töötaja 1866€ kuupalga puhul 2496,71€. Nende andmete põhjal arvutati, kui suur on keskmine veaanalüüsianalüüsi mõõtmiste etapi kulu ettevõttele:

$$K = \frac{TK}{n_t} \cdot t_m \quad (5.1)$$

kus

$K$  – rahaline kulu mõõtmiste etapi peale (€)

$TK$  – tööandja kulu ühe töötaja kohta kuus (€)

$n_t$  – töötundide arv kuus (h)

$t_m$  – keskmine mõõtmiste etapile kuluv aeg (h)

Arvutati välja rahaline kulu ettevõttele ilma seadmeta ( $K_1$ ) ning juhul kui mõõtmisi teostataks seadme abil ( $K_2$ ) kasutades valemit 5.1:

$$K_1 = \frac{2496,71}{160} \cdot \frac{315,25}{60} = 81,90 \text{ (€)}$$

$$K_2 = \frac{2496,71}{160} \cdot \frac{13,61}{60} = 3,54 \text{ (€)}$$

Sejärel leiti rahaline sääst ( $S$ ), kui mõõtmiste teostamiseks kasutataks seadet:

$$S = K_1 - K_2 = 81,90 - 3,54 = 78,36 \text{ (€)}$$

Ettevõtte kogemuse põhjal arvestatakse, et sääraseid mõõtmisi teostataks nädalas keskmiselt 3 korda ning sellest tulenevalt leiti, et nädalas säästetaks 235,08€ ning aastas 12 224,16€. Tabel 5.2 on näidatud, kui kaua läheb iga seadme puhul aega, et

selle ost ära tasuks. Seadmete hinnad saadi neid toodetavatelt ettevõtetelt hinnapakumist küsides. Tasuvuse aeg arvutati valemiga:

$$tasuvuse\ aeg = \frac{hind}{sääst\ aastas} \quad (5.2)$$

Tabel 5.2 Seadmete hinnad ning tasuvuse aeg iga seadme kohta

<b>Seade</b>	<b>Huntron Access 2</b>	<b>Huntron Access DH2</b>	<b>SPEA 4080</b>
<b>Hind (€)</b>	57 000	130 000	410 000
<b>Tasuvuse aeg (aasta)</b>	4,66	10,63	33,54

## KOKKUVÕTE

Töö põhiliseks eesmärgiks oli leida sobiv lahendus ühe Eestis tegutseva elektroonikaettevõtte veaanalüüsi mõõtmiste protsessi kiirendamiseks ning seejuures selle ohutumaks muutmiseks. Eesmärk oli ka analüüsida, kui palju kulub keskmiselt aega hetkel kasutusel oleva meetodi puhul veaanalüüsi mõõtmistele ning millised ohukohad hetkel kasutusel olevas süsteemis on kõige märgilisemad ning mida peaks ärandama.

Töö esimene peatükk selgitab lahti praegu kasutusel oleva veaanalüüsi protsessi ning antud protsessi ohutuse olulisuse. Samuti kirjeldatakse esimeses peatükis töö käigus näitena kasutatava trükkplaadi funktsioone ja põhimõtteid.

Teises peatükis on kirjeldatud tehtud katseid, et välja selgitada keskmine veaanalüüsile kuluv aeg igas etapis, et visualiseerida, kui palju rohkem kulub aega mõõtmiste etapile võrreldes teste etappidega. Koostati ka riskianalüüs protsessis kasutatavate tööpinkide kohta, et tuvastada suuremad ohuallikad, mida saaks uudse lahendusega vältida.

Töö kolmas peatükk keskendub ettevõtte poolsetele nõudmistele ning ettevõtte visioonile, kuidas mõõtmiste protsessi saaks parendada.

Töö neljandas peatükis kirjeldatakse esmalt, millised lahendused oleks võimalikud ning seejärel tehakse lahendusi võrreldes valik, milline neist oleks kõige sobilikum antud kontekstis. Seejärel valiti ka välja valitud lahenduse meetodit kasutatavad konkreetset seadmed, mida ettevõtte saaks endale muretseda.

Töö tulemuseks on peatükis 5.2 leitud seadmed. Need seadmed valiti välja pika analüüsi teel, kuid kuna ettevõtte nõudmistega ideaalselt kooskõlas olevat lahendust ei leitud, koostati valik kolme erineva seadme vahel.

Töö eesmärk saavutati ning ettevõttele leiti võimalikud lahendused, et veaanalüüsi protsessi mingil määral automatiseerida ning seda kiiremaks muuta. Samuti suudeti antud lahendustega suurendada protsessi ohutust, sest selle lahenduse puhul ei ole tarvis enam mõõtmiste teostamiseks mõõtepunktidesse juhtmeid joota. Samuti on kahe leitud seadme puhul ohutum trükkplaadi pingestatult testimine, sest trükkplaat asetatakse seadme kappi, mis testimise ajaks suletakse. Üks seade on siiski ilma suletava kapita, sest seda on võimalik paigutada laua peale, mis oli ettevõtte üks soovidest. Seetõttu lisati ka see seade võimalike lahenduste hulka, et ettevõtte saaks otsustada, millised parameetrid nende jaoks olulisemad.

Antud töö koostamine andis bakalaureuse töö sooritajale hea kogemuse, kuidas ettevõttele ettevõtte ette antud parameetrite ja nõudmiste ning kirjanduse ja katseanalüüsides põhjal leida sobivaim lahendus, mis suudaks teha suuremas osas, mida

nõutud. Töö tegemise käigus nähti, et ideaalseid lahendusi on keeruline leida ning seetõttu on tarvis teha valikuid, mis parajasti kõige olulisem on.

## **SUMMARY**

The main aim of the thesis was to find a solution for an industrial company operating in Estonia, to make failure analysis' measurements process of PCBA boards faster and safer. Additional aim was to analyse how much time does the currently used measurements method take and what are the main hazards in the measurements process.

The first chapter is focusing on explaining the currently used failure analysis process and how important safety is in this process. In this chapter also the functionality of the used PCBA board is explained.

In the second chapter the made analysis' which were done to measure and compare the times of different stages of failure analysis to see how much more time does the measurements process take compared to the other stages. Risk assessment was made to figure out what are the main hazards that the new method should eliminate during the measurements process.

The third chapter is focusing on company's needs and criteria to the new measurements process method.

In the fourth chapter it is firstly explained what methods could be used and what are their differences. Based on the comparison it was decided what method should be used and lastly also different devices were chosen that could fit the criteria.

The main outcome of the thesis are the devices that were chosen based on the analysis. These devices can be seen in chapter 5.2. Ideal solution that would perfectly fit the needs and criteria of the company could not be found. Because of that a selection of devices were presented for the company.

The objective of the thesis was achieved and a new potential method for measurements was found and also some specific devices for the company for them to choose. The new solution makes the process faster and safer. How much safer depends on the specific device that would be chosen, but need of soldering is reduced with all of those devices. Two of the found devices reduce electrical risk as well because these devices are placed in the cabinet which is closed while the test is running. One device does not come with a closable cabinet, but it is smaller than the other two and can be fitted on a desk. A selection of devices was made so the company could decide what parameters are more important for them.

Making of this thesis gave the writer a good overview and experience how to analyse and find a solution for a company based on the needs and criteria given by the company.

Solution was found through analysis of literature and experiments, and it was discovered that often the perfect solution cannot be found and compromises must be made.



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] EKI, „[EKSS] Eesti keele seletav sõnaraamat,“ Eesti Keele Instituut, 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eki.ee/dict/ekss/index.cgi?Q=tr%C3%BCkkplaat&F=M>. [Kasutatud 08. 12. 2023].
- [2] „INT-54 Technical Specification,“ 2014.
- [3] STMicroelectronics, „Quasi-resonant SMPS controller,“ 2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/389/16565-1849257.pdf>. [Kasutatud 16. 04. 2024].
- [4] Tööinspeksioon, „Tööelu,“ Tööinspeksioon, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tooelu.ee/et/79/riskianaluus#mis-on-riskianaluus>. [Kasutatud 17. 04. 2024].
- [5] eesti.ee, „Töötervishoid ja tööohutus,“ 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eesti.ee/et/tervis-ja-tervisekaitse/toeotervishoid/toeotervishoid-ja-toeoeohutus>. [Kasutatud 02. 02. 2024].
- [6] C. D. C. Houdek, „Inspection and testing methods for PCBs: An overview,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/62e3c6284ddd8f7896c21906/t/643ea484dd7ee32ad15a78b7/1681826950765/CD%26A+White+Paper+%23401.pdf>. [Kasutatud 22. 04. 2024].
- [7] J. Johnson, "What's the PCB x-ray inspection?," CKAB, 23. 02. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ckab.com/whats-the-pcb-x-ray-inspection/>. [Kasutatud 22. 04. 2024].
- [8] M. Sufyan, "Flying Probe Test: A Extensive Guide to the Technology and Applications," Wevolver, 28. 09. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wevolver.com/article/flying-probe-test-an-extensive-guide-to-the-technology-and-applications>. [Kasutatud 22. 04. 2024].
- [9] SPEA, "SPEA In-Circuit Testers," 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.spea.com/en/product-category/in-circuit-tester/>. [Kasutatud 22. 04. 2024].
- [10] Unites Systems, "CMT-Tester," 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://unites-systems.com/product/cmt-tester-32-41>. [Kasutatud 27. 04. 2024].
- [11] K. S. F. Z. J. S. Z. W. R. Ji, "Study on the Ball Grid Array Connection Failure Effects on Near Magnetic Field Radiation," *2023 IEEE 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC)*, p. 1, 20. 10. 2023.

- [12] Multi Circuit Boards, "BGA - Ball Grid Array," Multi Circuit Boards, 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.multi-circuit-boards.eu/en/pcb-design-aid/bga-pcb-design-for-ball-grid-array.html>. [Kasutatud 27. 04. 2024].
- [13] Huntron, „Huntron Access 2 Prober,” 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://huntron.com/products/access2.htm>. [Kasutatud 04. 05. 2024].
- [14] Huntron, "Huntron Access DH2 Prober," 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://huntron.com/products/accessdh2.htm>. [Kasutatud 04. 05. 2024].
- [15] SPEA, „SPEA 4080 Flying Probe Tester,” 2023. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.spea.com/en/products/4080-flying-probe-tester/?\\_gl=1\\*1ksyycs\\*\\_up\\*MQ..\\*\\_ga\\*NDE3NTE0MjczLjE3MTQ4MjE2NjA.\\*\\_ga\\_34QZJ1G7Z2\\*MTcxNDgyMTY2MC4xLjEuMTcxNDgyMjA3OS4wLjAuMA...](https://www.spea.com/en/products/4080-flying-probe-tester/?_gl=1*1ksyycs*_up*MQ..*_ga*NDE3NTE0MjczLjE3MTQ4MjE2NjA.*_ga_34QZJ1G7Z2*MTcxNDgyMTY2MC4xLjEuMTcxNDgyMjA3OS4wLjAuMA...) [Kasutatud 04. 05. 2024].
- [16] Huntron, „Manual versus Automated PCB Testing,” 05. 02. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://huntron.com/news/manual-versus-automated-pcb-testing/>. [Kasutatud 10. 05. 2024].
- [17] Statistikaamet, „PA113: Keskmine brutokuupalk ja mediaan tegevusala järgi,” 2023. [Võrgumaterjal]. Available: [https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus\\_\\_palk-ja-toojeukulu\\_\\_palk\\_\\_luhiajastatistika/PA113/table/tableViewLayout2](https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__palk-ja-toojeukulu__palk__luhiajastatistika/PA113/table/tableViewLayout2). [Kasutatud 10. 05. 2024].

# LISA

Risk	Riskirühma kuuluvad isikud
T – Tõenäosus	TÖ – Töötajad
MÕ – Mõju	TV – Töövõtjad
RT – Riskitase	TÜ – teised üldsuse liikmed, kliendid ja töötajad

Riskitase	
<b>Väga kõrge (VK)</b>	Talumatu – Tegevus ei tohi jätkuda enne, kui riskide nõuetekohaseks kontrollimiseks on kehtestatud kontrollimeetmed.
<b>Kõrge (K)</b>	See on tegevus, millega kaasnevad kõrged riskid, mida tuleb kontrollida. Tegevus võib jätkuda jääkriskitasemega, mida hinnatakse "kõrgeks", kui rakendatakse asjakohaseid ametlikke meetmeid riski vähendamiseks ja kontrollimiseks (nt meetodite kirjeldused, töölooba, erialane koolitus jne).
<b>Keskmine (KE)</b>	Töö võib jätkuda, kui kindlaksmääratud kontrollid on paigas. Neid tegevusi peab toetama ohutu töö süsteem, meetodi kirjeldus, ohutu töö juhised või samaväärsed dokumendid.
<b>Madal (M)</b>	Töö võib jätkuda, kui kindlaksmääratud kontrollid on paigas.
<b>Väga madal (VM)</b>	

Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk T x MÕ = RT		
			TÖ	TV	ÜL	T	MÕ	RT
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Testrakise valmiseseadmine	Ebaergonoomiline/ vale tõsteliigutus. Lihaspinge/ nikastus	X			2	1	M
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Testrakise valmiseseadmine	Komistamine seadme lauale asetamise või oma kohale tagasi viimise käigus; seadmele kahjustuste või kriimude tekkimine	X			3	1	M
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Mõõteseadmete, proovikute, psu jms ühendamine	Riulilt võivad kukkuda seadmed, tööriistad või muud juhuslikud objektid; Seadmete kahjustumine	X			2	1	M

Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk $T \times M\ddot{O} = RT$		
			TÖ	TV	ÜL	T	M $\ddot{O}$	RT
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Läbivalt	Pea vastu riulit löömine; Peakahjustus	X			2	1	M
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Mõne toiteallika sisselülitamine enne kaane peale panemist (kaitse on kaane all ja seda ei ole võimalik pärast kaane peale panemist sisse lülitada)	Testitav seade on vigane ja mõni elektrooniline component plahvatab trükkplaadil ja midagi lendab kasutaja poole; Silmakahjustus, näokahjustus	X			1	3	KE
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Läbivalt	Töötaja puudutab pärast toite sisselülitamist kogemata pingestatud osasid.	X			1	3	KE
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Toiteallika sisselülitamine (testitava seadme peamine toiteallikas)	Toiteallika väljund ei ole välja lülitatud ja see annab testitavale seadmele liiga palju pinget/ voolu; Kahjustatud varustus.	X			1	2	M
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Testi läbiviimine	Toiteallika väljund ei ole välja lülitatud ja see annab testitavale seadmele liiga palju pinget/ voolu ning kaitsekate ei ole sisselülitatud; Kahjustatud seadmed; Miski lendab komponendi rikke tõttu silma	X			1	3	KE
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Testi läbiviimine	Traadi isolatsioon on purunenud pleksiklaasist kaane muljumise tõttu ja inimene saab elektrilöögi; Põlenud nahk; Surm	X			2	3	K

Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk $T \times M\ddot{O} = RT$		
			TÖ	TV	ÜL	T	M $\ddot{O}$	RT
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Testi läbiviimine	Kaane puudumine ja pinge all olevate osade puudutamine; Elektrilöök; Põlenud nahk; Surm	X			2	4	K
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Testi läbiviimine	Elektrooniline komponent plahvatab ilma kaaneta; Midagi lendab silma; Silma-/ näokahjustus	X			1	3	M
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Testi läbiviimine	Pöörlevate osade puudutamine (elektrimootor); Sõrme löikamine	X			1	2	VM
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Testi läbiviimine	Isik, kes kasutas viimasena testrakist, unustab kõrgepinge sisse ja järgmine kasutaja saab elektrilöögi; Elektrilöök, põlenud nahk, surm	X			2	4	K
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Kaane eemaldamine	Võimalus puudutada pinge all olevaid osi, kui toiteallikas on kogemata sisse lülitatud ja isik haarab pleksiklaasi väljalõigetest kinni; Elektrilöök, põlenud nahk, surm	X			2	4	K
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Pinge puudumise kontrollimine pingetestriga	Unustati pingetestri korrasolekut kontrollida, see on katki, tester ei näita pinge olemasolu. Isik puudutab pinge all olevaid osi; Elektrilöök, põlenud nahk, surm	X			2	4	K
Testimine kõrgepinge toiteallika abil	Katkise komponendi asendamine	Mehaanilised ohud	X			1	2	M

Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk $T \times M\tilde{O} = RT$		
			TÖ	TV	ÜL	T	M $\tilde{O}$	RT
Kuni 50 v vahelduva väljundpingega seadmete testimine	Eemaldada kasutatud osad tööalalt	Mitteergonoomiline/ vale tösteliigutus. Lihaspinge/ nikastus.	X			1	2	M
Kuni 50 v vahelduva väljundpingega seadmete testimine	Kasutatavate seadmete seisukorra kontrollimine . Vajalik kontrollida lühiste puudumist.	Vigane varustus võib selle tagajärjel põhjustada lühise ja/ või kahjustada tervist, põhjustades põletushaavu jne.	X			2	2	KE
		Võimalus end teravate otstega/ kruvikeerajaga/ käsitööriistadega torgata.						
Madalpingeosade või -seadmete testimine	Osade ja seadmete paigutamine ohutu tööala loomiseks	Metallosade teravad servad.	X			3	1	M
		Tolm või osakesed objektidel.	X			2	1	M
		Kaal (rasked osad). Osad võivad kukkuda ja haiget teha (kaal).	X			2	1	M
		Laual olevad jooteseadmed võivad olla kuumad ja põhjustada põletusi.	X			1	2	M
		Ülemisel riulil olevad osad võivad testrakisele kukkuda.	X			1	2	M
Madalpingeosade või -seadmete testimine	Enda kaitsmiseks katta seade kaanega	Kriimud või väiksemad kahjustused kätel.	X			1	1	VM
		Kaabli isolatsiooni kahjustumine kaanega.	X			1	1	VM
Madalpingeosade või -seadmete testimine	Testimise tsükkel	Kehaosade asetamine töötavasse mehhanismi (pöörlev ventilaator).	X			1	2	M
		Lühis võib põhjustada ohtlikku suitsu ja tulekahju.	X			1	2	M
		Keha asend võib testimistsükli järelevalve ajal olla ebamugav.	X			3	1	M

Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk $T \times M\ddot{O} = RT$		
			TÖ	TV	ÜL	T	M $\ddot{O}$	RT
		Testrakise või testitava seadme poolt tekitatud müra.	X			3	1	M
Madalpingeosade või -seadmete testimine	Kaane eemaldamine	Testrakise osade kahjustamine kaanega.	X			1	1	VM
		Kriimustused või väiksemad kahjustused kätel.	X			1	1	VM
Madalpingeosade või -seadmete testimine	Testimise lõpetamine	Osad võivad olla endiselt kuumad, pöörlevad või kondensaatorid võivad olla endiselt laetud.	X			3	2	KE

Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk $T \times M\ddot{O} = RT$		
			TÖ	TV	ÜL	T	M $\ddot{O}$	RT
Ettevalmistus	Jooteseadmete ettevalmistamine	Jootetsiku vahetamise ajal võib raud olla eelnevast kasutamisest endiselt väga kuum. Kasutaja võib saada kätele põletusvigastusi.	X			2	1	M
Ettevalmistus	Tööala ettevalmistamine	Lauapinna tööks ettevalmistamisel on võimalik, et jootesulamite ja jootevedeliku või puhastusvahendite jäägid võivad sattuda silma või katmata kehaosadele.	X			2	1	M
Ettevalmistus	Trükkplaadi ettevalmistamine jootmiseks	Pihustatud alkoholipõhised puhastusvahendid võivad sattuda õhu kaudu hingamisteedesse.	x			3	1	KE

Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk $T \times M\ddot{O} = RT$		
			TÖ	TV	ÜL	T	MÖ	RT
Jootmine	Juhtmete jootmine/ lahti jootmine	Juhtmete jootmise ajal on võimalik saada vigastusi juhtmeotste ootamatu liikumise tagajärjel, millel võib olla sulanud joode. Kasutaja võib saada põletusvigastusi sõrmedele, peopesadele ja katmata kehaosadele.	X			2	1	KE
Jootmine	Kondensaatorite jootmine/ lahti jootmine	Võib juhtuda, et kondensaator on endiselt laetud, mis võib jootmise ajal põhjustada sädemeid või elektrilööki. Kasutaja võib saada põletusi sõrmedele, peopesadele või katmata kehaosadele.	X			2	1	M
Jootmine	Kaetud trükkplaatidelt komponentide lahti jootmine	Jootes trükkplaate, mis on kaetud konformse kattega, on võimalik silmade või hingamisteede ärritumine sulanud ja aurustunud kattematerjali tõttu.	X			3	1	KE
Jootmine	Mikroskoobi all komponentide jootmine/ lahti jootmine	Jootmise ja lahti jootmise käigus on võimalik saada vigastusi kuumalt jootetsikult silmade väsimisest tingitud koordinatsiooni kadumise tõttu.	X			2	1	M



Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk $T \times M\ddot{O} = RT$		
			TÖ	TV	ÜL	T	M $\ddot{O}$	RT
Jootmine	Komponentide jootmine/ lahti jootmine kuumaõhupüstoli abil	Kuumaõhupüstoliga jootmisel ja lahti jootmisel on võimalik saada vigastusi püstoli kuumadelt osadelt või väljuvalt kuumalt õhult. On võimalik sisse hingata aurustunud konformset katet. Komponentid võivad üle kuumeneda ja plahvatada. Kasutaja võib saada põletusi sõrmedele, peopesadele või katmata kehaosadele.	X			1	2	M
Jootmine	Trükkplaatide ja komponentide kandmine pärast jootmise/ lahti jootmise protsessi	Komponentid ja trükkplaadid võivad pärast jootmist/ lahti jootmist püsida mõnda aega kuumadena. On võimalik saada vigastusi kuumasid komponente või trükkplaate kätte võttes.	X			3	1	KE
Jootmine	Jootmine/ lahti jootmine	Jootmise/ lahti jootmise käigus on võimalik, et pikemate juustega või habemega kasutaja juuksed/ habe võivad sattuda kuuma raudotsiku vastu.	X			1	1	VM
Hooldamine	Rauast jootmisotsiku ja pumba puhastamine räubust	Puhastamise käigus on võimalik saada põletushaavu kuumalt räubust või jooteseadmelt. Kasutaja võib saada põletusi sõrmedele või peopesadele.	X			2	1	M

Ülesanne	Samm	Ohud (põhjus ja tõenäoline tagajärg)	Riskirühma kuuluvad isikud			Risk $T \times M\ddot{O} = RT$		
			TÖ	TV	ÜL	T	MÖ	RT
Hooldamine	Pumbaotsiku vahetamine	Otsiku vahetamise ajal on võimalik saada pumba kuumadelt osadelt ja eemaldatud otsikult vigastusi. Kasutaja võib saada põletusi ja vigastusi sõrmedele, peopesadele, näole ja katmata kehaosadele.	X			2	1	M