



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ABITOITEPLOKKIDE VEAANALÜÜS SAGEDUSMUUNDURITES

FAILURE ANALYSIS OF AUXILIARY POWER SUPPLY CIRCUITS IN VARIABLE-FREQUENCY DRIVES

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Artur Lavrov
Üliõpilaskood: 206547EAAB
Juhendaja: Viktor Rjabtšikov, doktorant-nooremteadur
Kaasjuhendaja: Martin Sarap, doktorant-nooremteadur

Tallinn 2023

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.

“18” mai 2023

Autor: Artur Lavrov

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“18” mai 2023

Juhendaja: Viktor Rjabtšikov

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Artur Lavrov,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Toiteplokkide veaanalüüs sagedusmuundurites“, mille juhendaja on Viktor Rjabtšikov,
 - 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.

_____ 18.05.2023

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Artur Lavrov

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Toiteplokkide veaanalüüs sagedusmuundurites

Kuupäev: 18.05.2023

58 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad:

doktorant-nooremteadur Viktor Rjabtšikov,

doktorant-nooremteadur Martin Sarap

Töö konsultandid:

insener Alejandro José Rodriguez Meneses,

vanemlektor Martin Jaanus,

vanemlektor Indrek Roasto

Sisu kirjeldus:

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on luua oma uurimusega eestikeelne ülevaade abitoiteplokkide veaanalüüsist sagedusmuundurites. Töö jaguneb seejuures kaheks osaks: teoreetiline ja katseline osa.

Teoreetilises osas kirjutatakse lahti, mis on kaasaegse sagedusmuunduri osad ja tööpõhimõtte. Samuti luuakse ülevaade, mis on abitoiteplokk ja mis elektroonikakomponendid on kasutuses.

Järgnevalt peatatakse süvitsi veaanalüüsi juures. Selgitatakse lahti, mis on veaanalüüsi otstarve ja millist metoodikat seejuures kasutatakse. Elektroonika analüüsil tuuakse välja, mis vead esinevad ja millest nad tingitud on.

Töö katselises osas keskendutakse rikete tuvastamisele kindla metoodika järgi. Luuakse seejuures juhend, mille tulemusel tulevased veaanalüüsijad saaks kiiremini rikete tuvastamist sooritada.

Märksõnad: analüüs, tõrked, sagedusmuundurid, veaanalüüs, bakalaureusetöö, abitoiteplokk

ABSTRACT

<i>Author:</i> Artur Lavrov	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Failure analysis of power supply circuits in variable-frequency drives	
<i>Date:</i> 18.05.2023	58 pages (the number of thesis pages including appendices)
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisors of the thesis:</i>	
	Early-Stage Researcher/Ph.D. Student Viktor Rjabtšikov, Early-Stage Researcher/Ph.D. Student Martin Sarap
<i>Consultants:</i>	
	Engineer Alejandro José Rodríguez Meneses, Senior Lecturer Martin Jaanus, Senior Lecturer Indrek Roasto
<i>Abstract:</i>	
<p>The aim of this thesis is to create an Estonian overview of failure analysis in auxiliary power supply circuits in variable-frequency drives. The work is divided into two parts: theoretical and experimental.</p> <p>The theoretical part describes the components and the working principle of a modern frequency converter. It also gives an overview of an auxiliary power supply, and which electronic components are used.</p> <p>Next, an in-depth look at the failure analysis is given. The purpose of failure analysis and the methodology used will be explained. The analysis of electronics will identify the faults that occur and what causes them.</p> <p>The experimental part of the thesis will focus on the detection of faults using a specific methodology. A guide will be developed to help future failure analysts to perform failure analysis more quickly.</p>	
<i>Keywords:</i> analysis, troubleshooting, frequency converters, failure analysis, bachelor's thesis, auxiliary power supply circuits	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Abitoiteplokkide veaanalüüs sagedusmuundurites
Lõputöö teema inglise keeles:	Failure analysis of auxiliary power supply circuits in variable-frequency drives
Üliõpilane:	Artur Lavrov, 206547EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Doktorant-nooremteadur Viktor Rjabtšikov
Lõputöö kaasjuhendaja:	Doktorant-nooremteadur Martin Sarap
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	2023/2024 2023/2024 Sügis
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2023

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Olles läbinud õppeained elektromagnetism ja elektrimasinad ning toitemuundurid ja masinate juhtimine, tekkis tudengil suurem huvi mõlema valdkonna vastu. Töötades ühes Eestis tegutsevas tööstusettevõttes, tekkis tudengil soov lähemalt tutvuda toodete kvaliteedi tagamisega ning veaanalüüsi vastu. Ettevõtte põhiväärtuste hulka kuulub sõna „uudishimu“, millest tuleneb ka teema valik. Uudishimu alla käib antud kontekstis tahe õppida vigadest ja edulugudest. Tööstusettevõtte kvaliteedilaboris tähendab see eelkõige näha mis, kuidas ning miks toode riknes ja kuidas saaksime põhjuseid ennetada. Oma ala meistrid, kes on aastaid selle valdkonnaga tegelenud, on paljusid olukordi juba näinud, kuid noorte praktikantide jaoks on veaanalüüs uus mõiste. Siit tuleneb ka ettevõtte vajadus juhendi järgi, mis võtaks kokku, mis vead elektroonikatoodete analüüsil esinevad ja kuidas läheneda analüüsile, kasutades erinevaid meetodikaid. Selle lõputöö tulemusel saaks ettevõtte tõhusamalt noortele praktikantidele väljaõpet pakkuda.

2. Töö eesmärk

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on luua oma uurimusega eestikeelne ülevaade jõuelektroonika veaanalüüsist. Töö jaguneb seejuures kaheks osaks: teoreetiline ja katseline osa. Teoreetilises osas kirjutatakse lahti, mis on kaasaegse sagedusmuunduri osad ja tööpõhimõte. Samuti luuakse ülevaade, mis on abitoiteplokk ja mis elektroonikakomponendid on kasutuses. Järgnevalt peatatakse veaanalüüsi juures. Selgitatakse lahti, mis on veaanalüüsi otstarve ja millist metoodikat seejuures kasutatakse. Samuti põhjendatakse, miks teatud järjekorras metoodikaid kasutatakse. Elektroonika analüüsil tuuakse välja, mis vead esinevad ja millest nad tingitud on. Praktilises osas keskendutakse rikete tuvastamisele kindla metoodika järgi. Abitoiteplokkide analüüsil sooritatakse esiteks visuaalne uurimine, kus on võimalik näha näiteks põlenud komponente. Järgnevalt teostatakse staatilised mõõtmised, mille alla käiks näiteks trükkplaadil takistite mõõtmine. Mõõtmise tulemusel on võimalik varakult tuvastada lühiseid trükkplaadil. Viimase etapina pannakse toiteplokki sisaldav trükkplaat tööle, et vaadelda, kas ja kuidas trükkplaat töötaks laboritingimustes. Töö lõpetuseks võetakse kokku, mida uurimuse käigus õpiti.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Töö käigus leitakse vastused järgnevatele küsimustele: Mis vead esinevad abitoiteplokkides? Mis on vigade juurpõhjused? Mis metoodikat tuleks kasutada vigase abitoiteploki analüüsil?

4. Lähteandmed

Püstitatud eesmärkide täitmiseks saadakse komponentide kohta käivat informatsiooni üldlevinud elektroonikakirjandusest, ettevõtte konsultandilt ja ülikoolipoolsetelt juhendajatelt.

5. Uurimismeetodid

Töö teoreetiline pool keskendub eelkõige kirjanduse analüüsile. Töö praktiline pool põhineb aga katsetel. Sihtrühmale antakse ülesandeks teostada veaanalüüs lõputöö raames valminud juhendi järgi. Katse tulemusel saadakse teada, kas ja kuidas veaanalüüsi metoodikat parendati enne ja pärast juhendi kasutamist.

6. Graafiline osa

Töö juures uuritakse erinevate komponentide riknemis, mistõttu töö põhiosas näeb erinevaid komponentide riknemisi. Võimalik, et plokk skeemidena selgitatakse meetodikaid.

7. Töö struktuur

Lõputöö ülesanne

Teema põhjendus

Sissejuhatus

1. Kaasaegsed sagedusmuundurid
 - 1.1. Sagedusmuundurite tööpõhimõte
 - 1.2. Sagedusmuundurite komponendid
 - 1.3. Toiteplokkid sagedusmuundurites
 - 1.3.1. Toiteplokkide tööpõhimõte
 - 1.3.2. Toiteplokkide komponendid
2. Veaanalüüs
 - 2.1. Veaanalüüsi otstarve
 - 2.2. Veaanalüüsi meetodika
 - 2.2.1. Visuaalne uuring
 - 2.2.2. Staatiline uuring
 - 2.2.3. Pingestatud olekus katsete tegemine
3. Vead elektroonika analüüsil
 - 3.1. Mehaaniline koormus
 - 3.2. Elektriline koormus
 - 3.3. Looduslikud tegurid
4. Vigade analüüs ja vigade tuvastus
 - 4.1. Vigade tuvastus juhendi järgi

Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Enamus allikad tulevad veebimaterjalidest ja elektroonikakirjandusest. Kavas on viidata järgnevatele allikatele:

[1] P. Horowitz, W. Hill, The Art of Electronics 3rd Edition. Cambridge University Press: 2015.

[2] R. F. Pierret, Semiconductor Device Fundamentals 2nd Edition. Addison Wesley: 1996.

[3] P. Scherz, S. Monk, Practical Electronics for Inventors 4th Edition. McGraw Hill TAB: 2016.

[4] B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives 1st Edition. Prentice Hall: 2001.

9. Lõputöö konsultandid

Vanemlektor Martin Jaanus – abi komponentide vigade uurimisel ja põhimõtteskeemide koostamisel

Vanemlektor Indrek Roasto – abi lõputöö pealkirja täpsustamisel ja tagasiside küsimisel

Insener Alejandro José Rodríguez Meneses – abi lõputöö teema püstitamisel ja käsitletud teemade uurimisel

10. Töö etapid ja ajakava

Töö etapid	Tähtaeg
kirjanduse läbitöötamine	05.11.22
lähteandmete kogumine	05.11.22
teoreetilise osa kirjutamine	05.11.22
arvutuste/mõõtmiste teostamine	03.12.22
uuringu tulemuste kirjeldamine	17.12.22
järelduste kirjutamine	04.02.23
kokkuvõtte koostamine	18.02.23
töö esimene versioon valmis	11.03.23
juhendajale läbilugemiseks saatmine	12.03.23
paranduste sisseviimine	25.03.23
juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine	26.03.23
töö lõplik versioon valmis	18.05.23

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	10
Lühendite ja tähiste loetelu	11
SISSEJUHATUS	12
1 KAASAEKSED SAGEDUSMUUNDURID	14
1.1 Sagedusmuundurite tööpõhimõtte, eelised, puudused ja kasutusvaldkonnad	14
1.2 Sagedusmuundurite komponendid	16
1.3 Abitoiteplokid sagedusmuundurites	18
1.3.1 Toiteallikate tööpõhimõtte	18
1.3.2 Abitoiteplokkide komponendid	19
2 VEAD ABITOITEPLOKKIDE ANALÜÜSIL.....	21
2.1 Veatekke juurpõhjused	21
2.1.1 Mehaanilised kahjustused	21
2.1.2 Ülekuumenemine	22
2.1.3 Keskkonnategurid	23
2.1.4 Elektrilised tegurid	24
2.1.5 Tootmisprotsessidega seotud vead	25
2.1.6 Vananemisega seotud tegurid	27
2.2 Rikked komponentide tasandil	28
2.2.1 Takisti rike	29
2.2.2 Kondensaatori rike	29
2.2.3 Transformaatori rike	30
2.2.4 Transistori rike.....	31
2.2.5 Diodi rike.....	32
2.2.6 Integraallülituste rike.....	33
3 VEAANALÜÜS	34
3.1 Veaanalüüsi meetodikad	34
3.1.1 8D meetodika	34
3.1.2 Ishikawa diagramm	35
3.2 Veaanalüüsi sammud	36
3.2.1 Teabe kogumine	37
3.2.2 Visuaalne kontroll.....	37
3.2.3 Mittepurustavad katsetamise meetodid	38

3.2.4	Staatilised mõõtmised.....	39
3.2.5	Purustavad katsed.....	39
3.2.6	Aruanded veaanalüüsi kohta	40
3.2.7	Komponentide utiliseerimine.....	41
4	VEAANALÜÜSI JUHENDI KOOSTAMINE	42
4.1	Katse korraldamine	43
4.2	Katse tulemused ja ettepanekud.....	44
	KOKKUVÕTE	46
	SUMMARY.....	47
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	49
	LISAD	53

EESSÕNA

Eestis tegutseva tehnoloogiaettevõtte kaasabil valmis lõputöö teemal „Toiteplokkide veaanalüüs sagedusmuundurites“. Lõputöö teema on autori poolt valitud suurest huvist veaanalüüsi vastu. Teema sõnastamisel soovib autor tänada inseneri Alejandro José Rodríguez Meneses't, kes teda nõustas.

Lõputöö kirjutamisel soovitakse tänada juhendajat doktorant-nooremteadur Viktor Rjabtšikov'i ja kaasjuhendajat doktorant-nooremteadur Martin Sarap'i, kelle abil lõputöö valmis.

Soovitakse tänada vanemlektorit Martin Jaanus't, kes tekitas õpingute esimesel aastal huvi elektroonika ja selle töökindluse vastu. Samuti tänatakse vanemlektorit Indrek Roasto't, kes tekitas õpingute teisel aastal huvi jõuelektroonika vastu.

Lühendite ja tähiste loetelu

8D – Kaheksa distsipliini metoodika (ingl k *Eight Disciplines Methodology*)

AC – Vahelduvvool (ingl k *Alternating Current*)

DC – Alalisvool (ingl k *Direct Current*)

ESD – Staatiline elekter (ingl k *Electrostatic Discharge*)

ESR – Kondensaatori sisetakistus (ingl k *Equivalent Series Resistance*)

FMEA – Tõrgete liigi ja mõju analüüs (ingl k *Failure Mode and Effects Analysis*)

hFE – Hübriidparameetriga edasisuunaline voolutugevus, ühine emitter (ingl k *Hybrid parameter forward current gain, common emitter*)

IGBT – Isoleeritud paisuga bipolaartransistor (ingl k *Insulated Gate Bipolar Transistor*)

PLC - Programmeeritav loogikakontroller (ingl k *Programmable Logic Controller*)

SISSEJUHATUS

Elektrienergia tootjad ja tarbijad on energeetikasektori tähtsamad lülid. Kaasaegsed tarbijad keskenduvad elektrienergia säästmisele. Lisaks pannakse rõhku seadmete kulumise vähendamisele [1]. Üks võimalik lahendus kulude vähendamiseks on sagedusmuunduriga ajamite paigaldamine olemasolevatesse tööstussüsteemidesse. See tähendab, et traditsiooniliste meetodite (mehaaniline kiirusvähendaja või fikseeritud kiirusega mootor) asemel kasutatakse seadet, millega on võimalik reguleerida elektrimootorile tarnitud voolu sagedust ja pinget.

Iga toote töökindluse saavutamiseks viiakse läbi testimine ja vigade tuvastamisel kõrvaldatakse praak juba arendustöös. Nõnda tagatakse, et kliendini jõuaks kvaliteetne lõpptoode. Paraku osad vead tekivad kliendist sõltuvatest tingimustest, mistõttu toode võib rikneda. Reklamatsiooni tulemusel saadetakse riknenud toode tootjani ning veaanalüüsijad tuvastavad mis ja kuidas riknes. Üks levinumaid meetodikaid on kaheksa distsipliini meetodika (8D – *Eight Disciplines Methodology*), mille rakendamisel saadakse vajalikud vastused küsimustele, viiakse sisse parendused ning tagatakse parem tootekvaliteet [2] [3].

Antud bakalaureusetöö eesmärk on luua eestikeelne ülevaade abitoiteplokkide veaanalüüsist sagedusmuundurites. Eesti keeles on autori teada veaanalüüsi vähe käsitletud ning olemasolevad artiklid sarnasel teemal tutvustavad protsessi elektrimasinate diagnostika [4] või tarkvara veaanalüüsi [5] seisukohast. Lisaväärtusena valmib lõputöö raames eestikeelne juhend tõrgete analüüsiks. Selle tulemusel saaksid ühe Eestis asuva tööstusettevõtte tulevased praktikandid tõhusamalt veaanalüüsi teostada. Juhendi abil on võimalik praktikandil tutvuda veaanalüüsi tööga, teha esmased mõõtmised ja oma tähelepanekud kirja panna. Seatakse hüpotees, et bakalaureusetöö raames valminud juhendit rakendades on võimalik veaanalüüsiks kulutatud tööaega vähendada.

Esimene peatükk keskendub sagedusmuunduri tööpõhimõtte uurimisele. Selgitatakse lahti, millised sagedusmuundurid on kasutuses ning kuidas nad töötavad. Tuuakse esile, mis on elektrilise seadme kasutamise eelised ja puudused. Peatükis luuakse ülevaade sagedusmuundurite põhilistest tootjatest ning seadme kasutusvaldkondadest. Seejärel tutvustatakse, mis osadest koosneb kaasaegne sagedusmuundur. Uuritakse, mis on kasutuses olevate osade tööpõhimõtted ning mis elektroonikat kohtab sagedusmuunduri konstruktsioonis. Täiendavalt uuritakse sagedusmuundurites leiduva elektroonika abitoiteplokkide.

Teine peatükk toob esile levinud vead, mis tekivad elektroonika analüüsil. Peatükis luuakse ülevaade juurpõhjustest (mehaanilised kahjustused, ülekuumenemine, keskkonnategurid, elektrilised tegurid, tootmisprotsessis esinevad vead ja vananemisega seotud tegurid), mis toovad kaasa erinevad tagajärjed. Tuuakse välja näiteid, kuidas erinevad elektroonikakomponendid riknevad ning rikete tuvastusmeetodid.

Kolmas peatükk keskendub veaanalüüsi meetodika käsitlemisele. Selgitatakse lahti kahte levinud meetodikat, mida kasutatakse veaanalüüsi teostamisel. Samuti tuuakse esile, mis on tüüpilised veaanalüüsi sammud. Sammude kirjeldamisel tehakse ülevaade, mida mõistetakse informatsiooni kogumise all, mis veatuvastusmeetmed on kasutuses (visuaalne kontroll, mitte purustavad meetodid, purustavad meetodid) ning mida tehakse peale analüüsi (aruande kirjutamine, utiliseerimine).

Neljas peatükk keskendub bakalaureusetöö raames valminud juhendite analüüsile. Selgitatakse lahti kasutatavat meetodikat ning soovitud töötulemust. Viiakse läbi katse, mille tulemusel juhendi abil saavad katse osalised sooritada veaanalüüsi. Mitme osalise võrdlemisel tuvastatakse, kas juhend parandaks töökäigu kvaliteeti ja tööks kulunud aega. Tuuakse välja esinenud probleemid ja tehakse tulemuste kokkuvõtte.

1 KAASAEGSED SAGEDUSMUUNDURID

Jõuelektroonika valdkonnas tegeletakse elektrienergia muundamise ja juhtimisega. Eesmärkideks on seatud kõrge kasuteguri saavutamine, töökindluse tagamine ja seadmete kompaktsus. Kasutuses on neli põhilist muundurit:

- alaldi, mis võimaldab pinget ja voolu alaldamist,
- vaheldi, mis võimaldab pinget ja voolu vaheldamist,
- alalispingemuundur, mis võimaldab alalispinget reguleerimist,
- vahelduvpingemuundur, mis võimaldab vahelduvpinget reguleerimist.

Laialt kasutuses olevad on vahelduvpingemuundurid. Vahelduvpingemuunduritest on kasutuses järgnevad muundurid:

- vahelduvpingeregulaatorid,
- tsüklomuundurid,
- alalisvooluvahelüliga (*DC link*) sagedusmuundurid.

Teades tööpingeid ja kasutatavaid sagedusi, on võimalik pakkuda lõppkasutajale lahenduse kulude vähendamiseks [6]. Erinevad tööstusharud käsitlevad erinevaid pingevahemikke. Kliendi soove arvestades, toodetakse järgnevaid sagedusmuundureid:

- madalpinge alalisvoolu ajamid,
- madalpinge vahelduvvoolu ajamid,
- keskpinge vahelduvvoolu ajamid.

Antud bakalaureusetöö raames keskendutakse madalpinge vahelduvvoolu ajamitest kaasaegsele alalisvooluvahelüliga sagedusmuunduritele, mis lisaks toitemuunduritele sisaldab andureid ja juhtseadet [7].

1.1 Sagedusmuundurite tööpõhimõtte, eelised, puudused ja kasutusvaldkonnad

Sagedusmuundur on seade, mida kasutatakse elektrimootori kiiruse reguleerimiseks, muutes sisendvoolu sagedust ja pinget. Sagedusmuundureid kasutatakse laialdaselt tööstus- ja ärirakendustes, kus on vaja täpset kontrolli mootori kiiruse üle.

Vahelduvvoolu sagedusmuundur muundab alaldiga siseneva vahelduvvoolu alalisvooluks ja seejärel muundab vaheldiga alalisvoolu tagasi vahelduvvooluks. Pinget ja väljundvoolu sagedust reguleerides saab sagedusmuundur juhtida mootori kiirust ja pöördemomenti [8].

Sagedusmuundurid pakuvad mitmeid eeliseid traditsiooniliste meetodite (mehaaniline kiirusvähendaja või fikseeritud kiirusega mootorid) ees, mistõttu tootest sai populaarne valik paljude tööstuslike ja kommertsrakenduste jaoks. Eelised on järgnevad:

- tippenergiavajaduse vähendamine, aidates vältida tippnõudluse ajal tekkivaid kulusid,
- mootori täpne juhtimine, mis võimaldab sujuvat liikumist ja paremat ohutust sellistes lahendustes nagu liftid ja eskalaatorid,
- seade on mitmekülgne, võimaldades leida otstarbe erinevatele mootoritele ja rakendustele,
- diagnostika, andmeside, ülekoormuskaitse, tarkvara programmeerimine ja PLC-taoline (PLC programmeeritav loogikakontroller - *Programmable Logic Controller*) funktsionaalsus võimaldavad lihtsat paigaldamist ja integreerimist olemasolevatesse süsteemidesse,
- digitaal-, analoog- ja releeväljundid tagavad lihtsa ja tõhusa suhtluse teiste seadmete ja süsteemidega,
- madal mootori käivitusvool, mis vähendab mootorite ja rihmade soojuslikku ja mehaanilist koormust käivitamise ajal,
- kõrge võimsustegur, mis aitab parandada süsteemi üldist tõhusust [9].

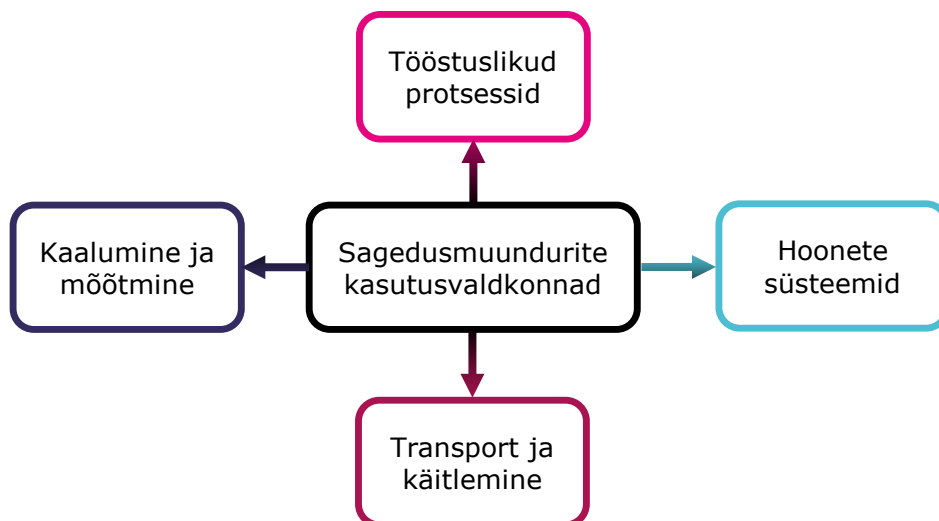
Sagedusmuundurid pakuvad palju eeliseid. Siiski on nende kasutamisega seotud ka mõned puudused:

- seadmel on kõrge esialgne hind,
- harmoonilised signaalid võivad põhjustada probleeme ühendatud seadmetega,
- seadme pikema eluea tagamiseks on vajalik regulaarne hooldus ja lisaseadmed.

Neid puudusi tuleks hoolikalt kaaluda enne sagedusmuundurite kasutamist mistahes rakenduses. Probleemide kõrvaldamiseks on seetõttu vajalikud regulaarsed hooldustööd ja lisaseadmed, mis tagaks seadme pikema eluea [10].

Maailmas on palju sagedusmuundurite tootjaid, kes pakuvad erinevate omaduste ja võimalustega seadmeid. Mõned tuntumad sagedusmuundurite tootjad on ABB Ltd, Siemens AG, Aplab Ltd, Danfoss A/S ja General Electric Company. Igal tootjal on oma tugevused ja ekspertteadmised, pakkudes klientidele laias valikus võimalusi sobiva sagedusmuunduri valimiseks vastavalt nende konkreetsele rakendusele [11].

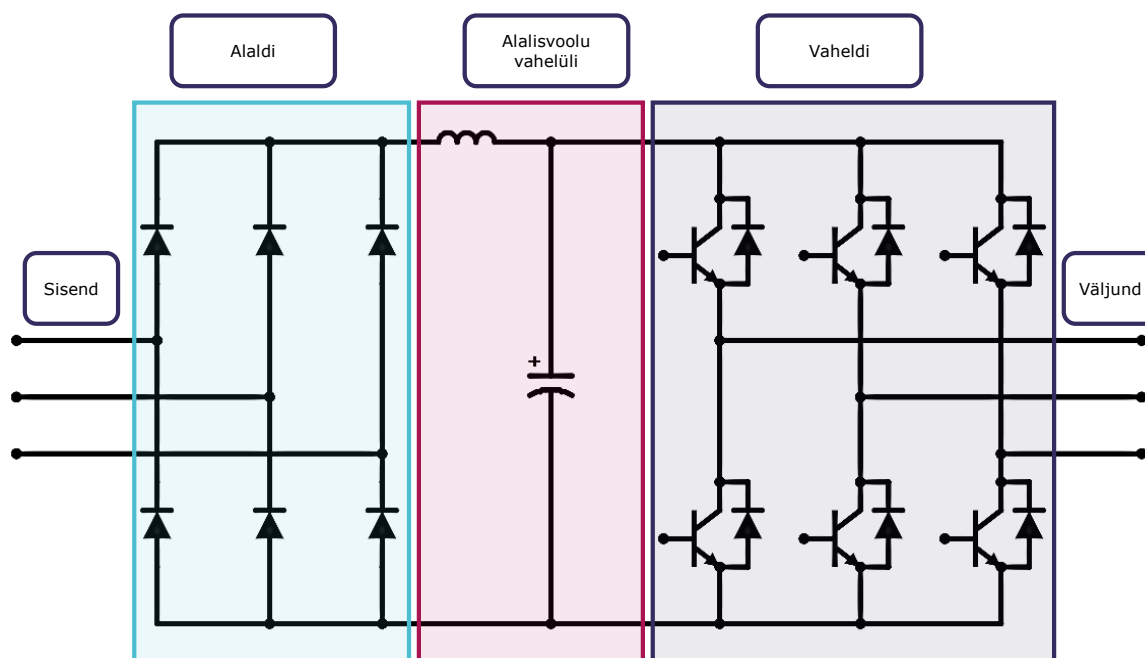
Sagedusmuundureid kasutatakse erinevates valdkondades ja rakendustes [9]. Kasutusvaldkonnad on toodud esile alljärgneval joonisel (Joonis 1.1).



Joonis 1.1 Sagedusmuunduri kasutusvaldkonnad

1.2 Sagedusmuundurite komponendid

Kaasaegsed sagedusmuundurid koosnevad erinevatest osadest. Selle hulka kuuluvad alaldi, filter, alalisvooluvahelüli, vaheldi, kasutajaliides ja jahutussüsteem. Need osad töötavad ühtse tervikuna, et tagada seadme pikaajaline töövõimekus. Sagedusmuunduri põhimõtteskeem on kujutatud joonisel (vt Joonis 1.2) [7].



Joonis 1.2 Sagedusmuunduri põhimõtteskeem

Alaldi on elektrooniline seade, mis muundab vahelduvvoolu alalisvooluks. Selle protsessi käigus kasutatakse diode, mis lasevad voolul liikuda ainult ühes suunas. On kahte tüüpi alaldeid: poolperiood- ja täisperioodalaldid. Poolperioodalaldid kasutavad ainult ühte

diodi ja annavad impulssilise alalisvooluväljundi, samas kui täisperioodalaldid kasutavad nelja diodi, et saada sujuvam alalisvooluväljund [12].

Filter on elektrooniline komponent, mida kasutatakse koostöös sagedusmuundurite süsteemidega. Filtrid on konstrueeritud elektrilise müra ja häirete vähendamiseks ning mootorite ja teiste tundlike elektroonikaseadmete kahjustuste vältimiseks. On mitmeid erinevaid filtritüüpe. Sealhulgas on joonereaktorid (*line reactor*), harmoonikutevastased filtrid (*harmonic filter*) ja sinusoidilised filtrid (*sinusoidal filter*). Iga filter on välja arendatud erinevate eelistega konkreetsete rakenduste jaoks [13]. Abitoiteallikate jaoks on kaks peamist filtritüüpi: C-filtrid ja LC-filtrid (C-filtrid on kahest lihtsam versioon).

Alalisvooluvahelüli on elektriajamite osa, mis ühendab alaldi ja vaheldi. See toimib vahendajana alaldi ja vaheldi vahel, kus alaldi muundab vahelduvvoolu alalisvooluks ning vaheldi muundab alalisvoolu tagasi vahelduvvooluks mootori kontrollimiseks. Alalisvooluvahelüli salvestab ja jaotab alalisvoolutoite kogu ajamisüsteemi ulatuses. Seetõttu reguleeritakse pinget ja voolu, et tagada tõhus ja usaldusväärne toimimine [14].

Vaheldi on elektrooniline seade, mis muundab alalisvoolu elektrienergia vahelduvvoolu elektrienergiaks. Nad mängivad ka olulist rolli pinge ja sageduse reguleerimisel, et tagada stabiilne ja usaldusväärne elektrienergia varustus. Vaheldina kasutatakse IGBT (IGBT isoleeritud paisuga bipolaartransistor – *Insulated Gate Bipolar Transistor*) silda, mis toimib pingekontrollitud lülitina, mis lubab või keelab voolu liikumist selle kollektori ja emitteri vahel [15].

Kasutajaliides on elektrooniline komponent, mida kasutatakse erinevate süsteemide käsitlemiseks ja jälgimiseks. Sagedusmuunduri kasutajaliides on loodud elektrimootori kiiruse reguleerimiseks, kontrollides toitepinge sagedust ja pingeid. See ühendab erinevaid komponente ühte liidesesse: sisend- ja väljundseadmed, kuvarid ja juhtimislülid. See võimaldab operaatoril süsteemi hõlpsalt jälgida ja reguleerida. Kasutajaliidestel võib olla erinevad hinnangud, mis määravad nende sobivuse erinevateks rakendusteks ja keskkondadeks [16] [17].

Jahutussüsteem on sagedusmuunduri kriitiline komponent, mis aitab säilitada seadme ja selle komponentide nõuetekohast töötemperatuuri. Sagedusmuundurid tekitavad töö ajal märkimisväärse hulga soojust tänu jõuelektroonikale, mis muundab ja reguleerib elektrienergiat. Ilma piisava jahutuseta võib sagedusmuundur üle kuumeneda, mis võib põhjustada seadme häireid või koguni rikkeid. Jahutussüsteem koosneb tavaliselt ühest või mitmest ventilaatorist, mis teostavad õhuringluse läbi jahutusradiaatorite või muude

jahutuselementide. Mõned sagedusmuundurid sisaldavad ka vedelikjahutust, mistõttu jahutusvedeliku ringlusel saavutatakse optimaalne töötemperatuur [18] [19].

Lisaks põhiahelale võimaldavad sagedusmuundurite tootjad erinevaid kasutajaliideseid. Levinumad on järgmised kasutajaliideseid [20]:

- klahvipaneeliga on võimalik ajami seadmeid konfigurereida ja juhtida. Klahvipaneeli abil saab sisestada parameetreid nagu kiiruse sihtväärtused, kiirendus- ja aeglustusajad ning veakoodid;
- kuvari abil on võimalik kasutajale olulist teavet kuvada nagu mootori kiirus, vool ja pinge. Mõnel sagedusmuunduri tüübil on ka graafiline kuvar, mis näitab reaajas lainevorme või trendiandmeid;
- kaugjuhtimist saab teostada sagedusmuunduriga ühendatud kaugjuhtimispuldi või tarkvaraliidese kaudu. See võib kasulikuks osutuda rakenduste jaoks, kus sagedusmuundur on paigaldatud raskesti ligipääsetavatesse kohtadesse;
- sideportide olemasolul on võimalik teostada sagedusmuunduriga andmevahetust. Kasutuses on Ethernet, Modbus või CAN-siin. Need pordid võimaldavad tekitada andmevahetust teiste seadmete või süsteemidega nagu näiteks PLC või SCADA (*Supervisory Control and data acquisition*) süsteemidega.

Kasutajaliideste olemasolu on oluliseks teguriks ajami valikul. Eri rakenduste korral mõjutavad kasutajaliideseid kasutusmugavust ning võimet jälgida sagedusmuunduri tööd ja tulevasi tõrkeid.

1.3 Abitoiteplokid sagedusmuundurites

Sagedusmuundurid koosnevad erinevatest osadest. Lisaks alaldile, alalisvoolu vahelülile ja vaheldile on laialt kasutuses kasutajaliideseid. Sagedusmuunduri komponentide toiteks on aga vajalikud toiteallikad ja abitoiteplokid, et saavutada komponentide funktsioone.

1.3.1 Toiteallikate tööpõhimõte

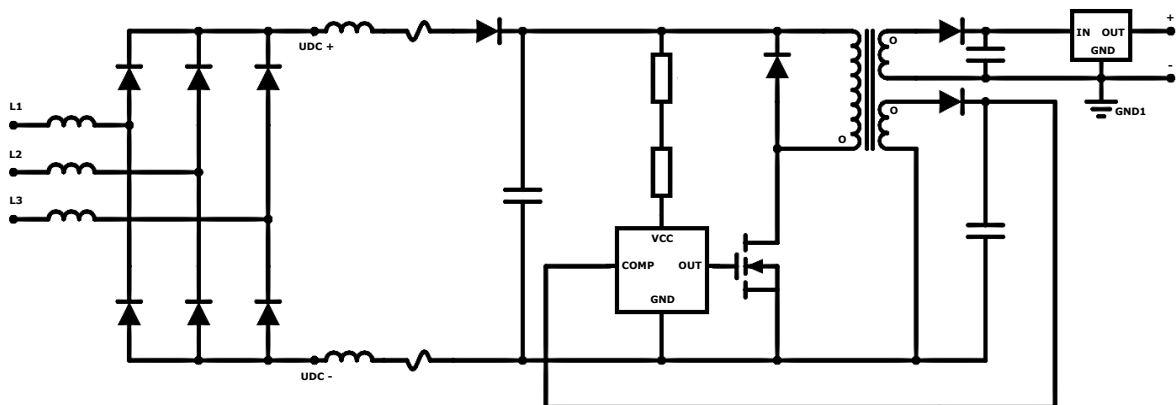
Toiteallikate põhieesmärk on sisendpinge vastuvõtmine ning selle stabiilne ja reguleeritud alalispingeks muundamine, mistõttu elektroonikaseadmed saavad vajaliku voolu. On palju erinevaid tüüpe toiteallikaid, millest igaühel on oma eelised ja puudused sõltuvalt konkreetsest rakendusest.

Kasutuses olevad toiteallikad on võimalik leida sagedusmuunduri erinevates süsteemides [21]. Toiteallikate spetsiifilised kasutusviisid sagedusmuundurites võivad erineda tootjast, muunduri mudelist ja rakendusest. Nende hulka kuuluvad järgnevad:

- alalisvooluvahelüli on sagedusmuunduri üks peamisi toiteahelaid. See annab kõrge alalispinge, mis on vajalik muunduri osa toitmiseks. Alalisvooluvahelüli kondensaatoripank on tavaliselt suurim ja kriitilisim komponent ajamisüsteemis;
- eel-laadimisahelat kasutatakse alalisvooluvahelüli kondensaatoripanga järkjärguliseks laadimiseks enne muunduri sisselülitamist. See ahel aitab vältida kõrgeid käivitusvoolusid ja kaitseb muunduri komponente kahjustuste eest;
- juhtimisahel annab madala pingega alalisvoolutoite, mis on vajalik juhtimisloogika ja väravaajamiahelate (*gate drive circuit*) käitamiseks muunduri osas;
- abitoiteplokk annab toite erinevatele abikomponentidele muunduris nagu näiteks ventilaatorid, kommunikatsioonimoodulid ja sisend-/väljundmoodulid;
- regenereerivates muundurites annab regenereerimisahel tee mootori poolt aeglustamisel tekitatud üleliigse energia tagasisöötmiseks toitevõrku.

1.3.2 Abitoiteplokkide komponendid

Abitoiteplokk (Joonis 1.3) koosneb neljast põhikomponendist. Lisaks eelnevalt lahti selgitatud alaldile ja filtrile koosneb ahel transformaatorest ja reguleerimisahelast.



Joonis 1.3 Abitoiteploki põhimõtteskeem [22]

Transformaatorit kasutatakse vahelduvpingega töötamiseks. See muudab pinget ja tagab isolatsiooni primaar- ja sekundaarahela vahel. Transformaator edastab elektrilise energia esmase ja sekundaarse mähise vahel, muutmata läbivat sagedust. Transformaatori esmane mähis ühendatakse vahelduvpingeallikaga. Samal ajal sekundaarne mähis on ühendatud koormusega. Mähised pole füüsiliselt ühendatud, kuid vastavalt Faraday seadusele tekib sekundaarses mähises indutseeritud pinge [23].

Pingeregulaator aitab tagada, et alalisvoolu väljundpinge oleks pidevalt stabiilne. Olenemata sisendpinge muutumisest võimaldatakse koormusel õigesti toimida. Kõige

tavalisemad regulaatoritüübid on jadaühenduses pingeregulaator (*series voltage regulator*) ja šuntregulaator (*shunt voltage regulator*) [24].

Abitoiteplokid koosnevad erinevatest komponentidest. Passiivsed ja aktiivsed komponendid on kaks laialt levinud elektroonikakomponentide kategooriat, mida kasutatakse elektrialhelates. Aktiivsed komponendid saavad ahelasse energiat tuua ja neil on võime signaale võimendada. Passiivsed komponendid ei saa aga ahelasse energiat tuua ega signaale võimendada. Passiivseid komponente kasutatakse elektrivoolu piiramiseks, elektrilaengu salvestamiseks, pinge jaotamiseks ja filtrite tegemisel.

Passiivsete komponentide hulka kuuluvad:

- takistid,
- kondensaatorid,
- induktiivpoolid.

Aktiivsete komponentide hulka kuuluvad:

- transistorid,
- dioodid,
- operatsioonvõimendid,
- integraallülitused.

Nii passiivsed kui ka aktiivsed komponendid mängivad elektroonikahelates olulist rolli ja neid kasutatakse kombinatsioonis keerukate ahelate ehitamiseks [23].

2 VEAD ABITOITEPLOKKIDE ANALÜÜSIL

Abitoiteploki rikkeid võivad põhjustada vigased komponendid või kehv konstruktsioon, mille tagajärjeks on mitmesugused probleemid nagu näiteks ülekuumenemine. Kasutajapoolne viga võib samuti põhjustada tõrkeid nagu näiteks vale kasutamine või paigaldamine, mistõttu võib esineda juhuslikku kahjustust.

Mõned levinumad juurpõhjused [25] on järgmised:

- mehaanilised kahjustused,
- ülekuumenemine,
- keskkonnategurid,
- elektrilised tegurid,
- tootmisprotsessis,
- vananemisega seotud tegurid.

Juurpõhjuste tagajärjel võivad esineda järgnevad rikked:

- takisti rike,
- kondensaatori rike,
- transformaatori rike,
- transistori rike,
- dioodi rike,
- integraallülituste rike.

Abitoiteallika rikete vältimiseks on oluline kasutada kvaliteetseid komponente, tagada nõuetekohane jahutus, vältida toiteallika ülekoormamist ning jälgida projekteerimisel ja kasutamisel parimaid tavasid. Regulaarne hooldus aitab samuti tuvastada ja ennetada võimalikke probleeme enne tagajärgede tekkimist.

2.1 Veatekke juurpõhjused

Veatekke juurpõhjus viitab põhitegurile, mis otseselt või kaudselt viib konkreetse probleemi või rikke tekkimiseni. See on veaanalüüsi seoste kõige sügavam kiht, millega tegelemine võib tulevikus ära hoida sarnaste rikete kordumist. Juurpõhjuste tuvastamine hõlmab erinevate kaasaaitavate tegurite uurimist ja analüüsimist. Juurpõhjuse mõistmisel selgub, mis käivitas rikke tekkimiseni viinud sündmuste ahela.

2.1.1 Mehaanilised kahjustused

Mehaanilised kahjustused on üks levinumaid probleeme abitoiteplokkide puhul. Nad tekivad siis, kui toiteallikas on füüsilise koormuse või löögi all. Mehaanilised kahjustused võivad tekkida toote transportimisel, paigaldamisel või regulaarsel kasutamisel. Kui

toode saab mehaanilisi kahjustusi, võib see põhjustada mitmeid probleeme. Kahjustused tulevad esile komponentide sisestruktuuride rikkemisel või jootekohtade deformeerumisel. nagu komponentide rikkeid, pingetõuse ja ebastabiilset väljundit.

Mehaanilised kahjustused võivad tekkida mitmel viisil:

- abitoiteploki kukkumine,
- liigse vibratsiooni all olemine,
- liigse füüsilise koormusega (painutamine, purustamine) kokkupuutumine.

Mehaaniliste kahjustuste vältimiseks on oluline ettevaatlikult käsitleda abitoiteploki transportimise, paigaldamise ja korrapärase kasutamise ajal. Samuti on oluline tagada, et abitoiteplokk oleks nõuetekohaselt paigaldatud ja kinnitatud, et vältida liigset füüsilist koormust või vibratsiooni [26].

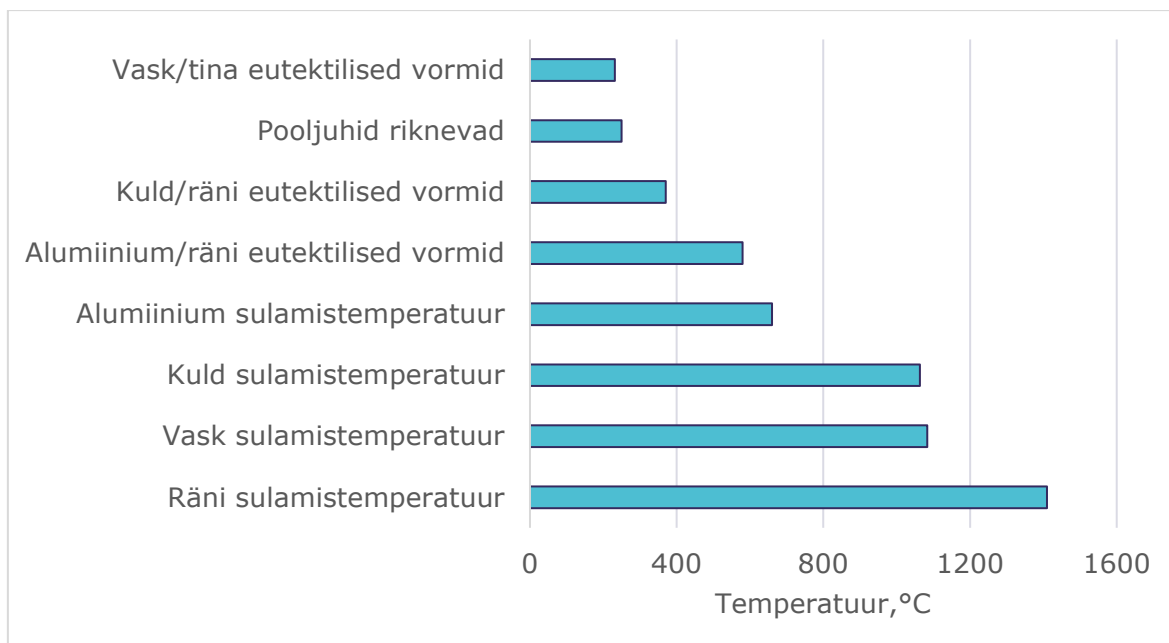
2.1.2 Ülekuumenemine

Ülekuumenemine on üks juurpõhjusi, mis võib põhjustada mitmesuguseid probleeme nagu näiteks pingelangusi või -tõusud, väljalülitusi ja isegi tulekahjusid.

Toiteallikate ülekuumenemist võivad põhjustada mitmed tegurid [27]:

- ebapiisav jahutussüsteem (ventilaatorid, radiaatorid);
- kõrge välistemperatuur, mis ei ole arvestatud rakenduse temperatuurivahemiku jaoks;
- toiteallika ülekoormamine, mis põhjustab komponentide ülekuumenemist ja rikkeid. Ülekoormus võib tekkida, kui abitoiteplokk annab koormusele liiga palju voolu või pinget;
- kui mõni komponent läheb katki, võib see põhjustada teiste komponentide intensiivsemat tööd ja suuremat kuumust, mis viib ülekuumenemiseni ja võib põhjustada mitmeid rikkeid.

Komponentide või ka trükkplaadi ülekuumenemisel tõuseb kasutuses olevate metallide temperatuur kuni rikete tekkimiseni. Joonis 2.1 peal on näha, et alates teatud vahemikust võivad komponendid lõpetada oma töötamise, moodustada struktuurilisi ühendeid erinevate metallide vahel ja ka ära sulada.



Joonis 2.1 Metallide riknemisega seotud temperatuurid [28]

Toiteallika ülekuumenemise vältimiseks on oluline tagada, et abitoiteplokk oleks korralikult jahutatud. Rakenduse temperatuurivahemikku arvestades, saab tagada, et ei esineks seadme ülekoormamist. Hoolduse tulemusel võib selguda, et mõnel juhul võib osutuda vajalikuks abitoiteploki väljavahetamine või uuendamine, et vältida ülekuumenemist ja tagada usaldusväärne töö.

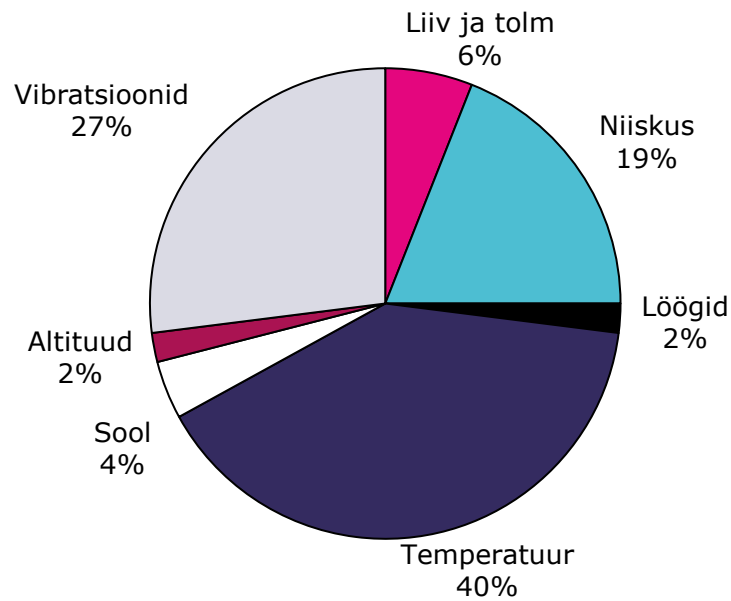
2.1.3 Keskkonnategurid

Keskkonnategurid võivad samuti kaasa aidata rikke tekkele. Nende tegurite hulka kuuluvad kokkupuude niiskuse, äärmuslike temperatuuride, tolmu või muude saasteainetega. Kui toode puutub kokku keskkonnakoormusega, võib see põhjustada mitmeid probleeme nagu näiteks korrosiooni ja komponentide rikkeid.

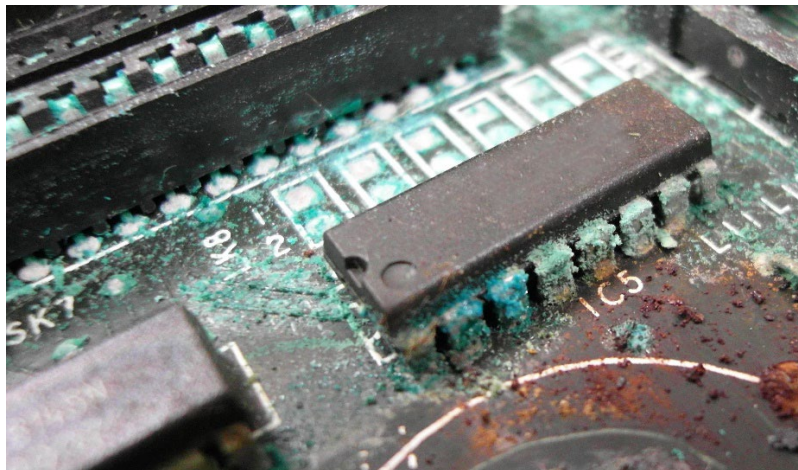
Keskkonnateguritest põhjustatud vead võivad tekkida mitmel viisil:

- kui abitoiteplokk puutub kokku niiskusega, võib see põhjustada sisemiste komponentide korrosiooni;
- kui toode puutub kokku tolmu või muude saasteainetega, võivad tekkida lühised ja muud ebasoodsad lisaühendused erinevate komponentidega.

Keskkonnateguritest põhjustatud vigade vältimiseks on oluline tagada, et abitoiteplokk oleks nõuetekohaselt kaitstud niiskuse, äärmuslike temperatuuride ning tolmu või muude saasteainete eest. Joonis 2.2 kajastab, mis tõenäosusega keskkonnategurid esinevad ning Joonis 2.3 peal on näha korrosiooni tagajärge trükkplaadil.



Joonis 2.2 Keskonnateguritest sõltuvate rikete tõenäosus [28]



Joonis 2.3 Korrosioon komponendil [29]

2.1.4 Elektrilised tegurid

Elektrilised rikked abitoiteplokkides võivad olla erinevatel põhjustel ja põhjustada olulisi probleeme, nagu talitlushäired, ebastabiilne väljund või täielik rike. Tõhusa veaanalüüsi läbiviimiseks on väga oluline elektriliste rikete mõistmine. Mõned levinumad elektrilised rikked abitoiteplokkides on järgmised [25] [28]:

- abitoiteplokkidel võib esineda liigpinget või alapinget vigase sisendpinge reguleerimise või väliste tegurite (elektrivõrgu võnkumised) tõttu. Liigpinge võib pingestada komponente, põhjustada isolatsiooni purunemist või ületada tundlike seadmete nimipinget. Alapinge võib põhjustada ebapiisavat võimsust, mis mõjutab toiteallika ja ühendatud seadmete tööd;
- kõrgsageduslikud võnkumised pinget lainekujul võivad tekkida valgulöögi, suure võimsusega koormuste lülitamise või elektrivõrgu rikete tõttu. Need tegurid

võivad koormata komponente, põhjustada isolatsiooni purunemist ja tundlike seadmete otsekohest või kumulatiivset kahjustust;

- lühisvoolud on tingitud kas komponentide sisemistest vigadest või välistest juhtmestikuprobleemidest. Need võivad põhjustada liigset voolu, ülekuumenemist ja seadme kahjustusi. Liigvoolutingimused võivad koormata komponente üle nende nimipiiride, põhjustades komponentide rikkeid või käivitades kaitsemehhanismid nagu kaitsmed või sulavkaitsmed;
- ESD (staatiline elekter – *Electrostatic Discharge*) võib tekkida, kui laetud objektilt voolab äkiliselt staatiline elekter maasse või madalama potentsiaaliga objektile, kahjustades tundlikumaid elektroonikakomponente;
- abitoiteplokid võivad tekitada väljundpinget või väljundvoolu uurides elektrilist müra. Liigne müratase võib häirida ühendatud seadmete tööd, põhjustades süsteemi talitlushäireid või ebastabiilsust.

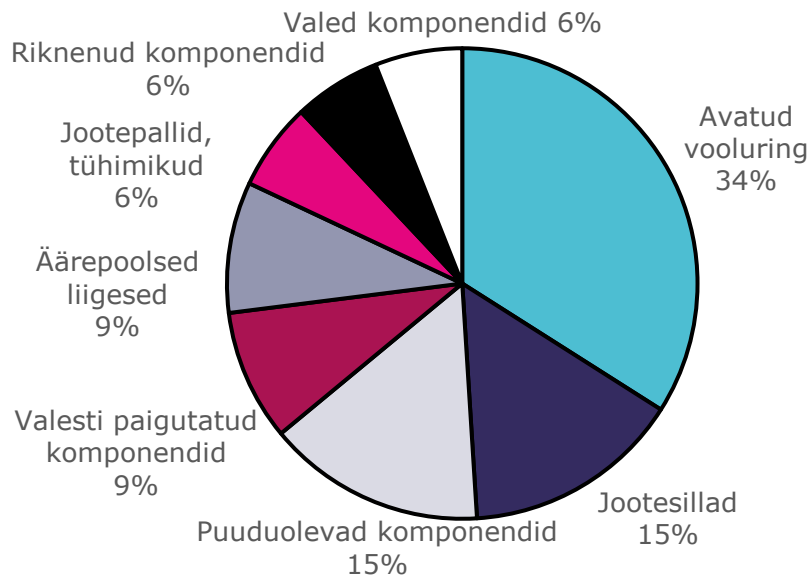
Elektriliste teguritega seotud rikete analüüsimisel on oluline võtta arvesse abitoiteploki sisendeid ja väljundeid, teha elektrilisi mõõtmisi ja kontrollida vooluahelat elektrilise kahjustuse tunnuste suhtes.

Elektriliste rikete vähendamiseks võib võtta mitmeid meetmeid kasutusele [30]:

- pingeregulaatorite ja liigpingepiirikute rakendamine liigpinge vältimiseks;
- nõuetekohase juhtmestiku ja maandamise tagamine, et vältida lühiseid ja ülevoolu olukordi;
- ESD-kaitsemeetmete nagu maandusrihmade või kaitseahelate rakendamine, et vältida elektrostaatilisest laengust tulenevaid kahjustusi;
- filtreerimis- ja lahtisidestustehnikate kasutamine, et vähendada abitoiteploki müra ja lainetust.

2.1.5 Tootmisprotsessidega seotud vead

Tootmisprotsessi vead võivad tekkida abitoiteplokkide tootmis-, montaaži- või testimisfaasis ning mõjutada oluliselt lõpptoote kvaliteeti ja töökindlust. Need vead võivad tuleneda inimlikest eksimustest, seadmete rikestest või ebapiisavatest kvaliteedikontrollimeetmetest. Mõned levinumad tootmisprotsessi vead abitoiteplokkide puhul on kujutatud Joonis 2.4 peal. Seejuures on esitatud protsentuaalselt iga valdkonna tõenäosus, et üks või teine viga tekiks.



Joonis 2.4 Avastatud tootmisvigade esinemise tõenäosus tootmisprotsesside käigus [28]

Tootmisprotsessi vigadega tegelemiseks rakendatakse mitmeid meetmeid [28] [31]:

- rakendatakse põhjalikke kvaliteedikontrolli meetmeid kogu tootmisprotsessi jooksul (saabuvate komponentide kontroll, protsessisisene kontroll ja lõpptoote testimine);
- tagatakse piisav koolitus monteerijatele, rõhutades õigeid jootmistehnikaid, komponentide käsitlemist ja protseduure. Säilitatakse selge dokumentatsioon ja tööjuhised, et tagada järjepidev ja täpne koosteprotsess;
- kasutatakse automatiseeritud koosteseadmeid ja testimissüsteeme, et vähendada inimese poolt tekkinud vigu ning parandada tootmisprotsesside järjepidevust ja usaldusväärsust;
- luuakse tugevad suhted usaldusväärsete komponentide tarnijatega ja rakendatakse tarnijate kvaliteedi tagamise programme (kvaliteetsete komponentide hankimine);
- tootmisprotsesside korrapärane läbivaatamine ja analüüsimine, parandamist vajavate valdkondade kindlakstegemine ning parendusmeetmete rakendamine, et kõrvaldada protsessivead ja parandada toote kvaliteeti.

Tugevate tootmisprotsesside rakendamise, rangete kvaliteedikontrollimeetmete järgimise ja tootmisprotsesside pideva täiustamise abil saab tootmisprotsesside tõrkeid abitoiteplokkides oluliselt vähendada, mille tulemuseks on usaldusväärsemad ja kvaliteetsemad tooted.

2.1.6 Vananemisega seotud tegurid

Toiteallikate vananemisega seotud rikked [32] viitavad komponentide ja materjalide lagunemisele ja halvenemisele aja jooksul, mis võib viia jõudluse halvenemiseni või täieliku rikke tekkimiseni. Vananemine on loomulik nähtus, mida mõjutavad sellised tegurid nagu töötingimused, keskkonnategurid ja komponentide omadused. Järgnevalt on esitatud mõned peamised tegurid [28], mis on seotud vananemisega seotud rikutega:

- erinevad komponendid võivad aja jooksul laguneda. Näiteks elektrolüütcondensaatorite eluiga on piiratud elektrolüüdi kuivamise või lekkimise tõttu, mille tulemuseks on vähenenud mahtuvus või avatud voluringid. Muude komponentide, näiteks takistite, diodide ja transistoride elektrilised omadused võivad samuti muutuda, mis võib põhjustada kõrvalekaldeid nende algarvmetritest;
- toiteallikates kasutatavad isolatsioonimaterjalid võivad aja jooksul keskkonnategurite, temperatuuritsüklite või elektrilise koormuse tõttu halveneda. See võib põhjustada isolatsiooni purunemist, mis suurendab lühise, kaarleegi või komponentide kahjustamise ohtu;
- abitoiteplokkide töötamise käigus toimuvad korduvad termotsüklid võivad põhjustada jootmisühenduste halvenemist, mille tulemuseks on praod või purunemised. Selle tulemusel võib tekkida katkendlikke ühendusi, elektrikatkestusi või isegi täielikku rikkeid;
- aja jooksul võivad toiteallikas olevad metallkomponendid ja kontaktid oksüdeeruda või korrodeeruda, eriti kõrge niiskusega keskkonnas või kokkupuutes korrodeerivate ainetega. Oksüdeerumine ja korrosioon võivad suurendada takistust või kahjustada elektrijuhtivust;
- mehaanilised komponendid nagu lülitid, pistikud või jahutusventilaatorid võivad korrapärase kasutamise või keskkonnateguritega kokkupuutumise tõttu kuluda. Selle tulemuseks võib olla halvenenud jõudlus, suurenenud kontakttakistus või mehaanilised rikked.

Rikete ennetamiseks teostatakse regulaarset hooldust ja seadme testimist. Aeg-ajalt on tarvis välja vahetada üksikuid komponente, et tagada töökindlus. Seejuures peavad seadme projekteerijad arvestama keskkonnatingimustega, mis kliendi töötingimustes aset leiavad. Selle tulemusel tagatakse seadme pikem eluiga.

2.2 Rikked komponentide tasandil

Abitoiteplokkide veaanalüüsi läbiviimisel on oluline kindlaks teha, kas rikke põhjuseks oli komponentide rike. Seda saab teha visuaalse kontrolli, elektriliste katsete ning abitoiteploki kasutamise ajaloo analüüsi abil. Kui rikke põhjuseks on tuvastatud üksikkomponendi rike, on oluline rakendada meetmeid, et vältida sarnaseid rikkeid tulevikus. See võib hõlmata komponendi ajakohastamist vastupidavama mudeli vastu, ventilatsiooni ja jahutuse parandamist või liigpingekaitse rakendamist. Tabel 2.1 kajastab levinumate komponentide riknemisi ja nende esinemise tõenäosust.

Tabel 2.1 Rikke tüübid ja nende esinemise tõenäosused [28]

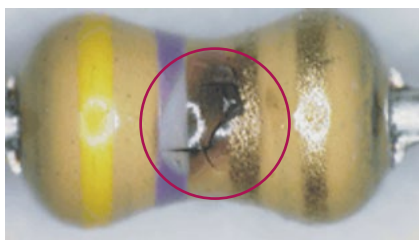
Komponent	Rikke tüüp	Protsentuaalne veamäär	Kiirendav tegur
Takisti	Korrosioon	30-50% triiv	Niiskus, temperatuur
	Takistuskihi defektid	15-25% triiv	Niiskus, temperatuur
	Riknenud ühenduskohad	10-20% avatud vooluring	Põrutused, vibratsioon
Kondensaator	Riknenud ühenduskohad	10-30% avatud vooluring	Temperatuur, vibratsioon
	Korrosioon	25-45% triiv	Niiskus, temperatuur
	Mehaaniline rike	20-40% lühiühendus	Põrutused, vibratsioon
Transformaator	Isolatsioon	40-80% lühiühendus	Niiskus, temperatuur
Transistor	Otsikute defektid	10-30% triiv	Põrutused, vibratsioon
	Saastumine	10-50% lagunemine	Niiskus, temperatuur
	Korrosioon	15-25% triiv	Niiskus, temperatuur
Diod	Korrosioon	20-40% aeg-ajalt	Niiskus, temperatuur
	Riknenud ühenduskohad	15-35% avatud vooluring	Põrutused, vibratsioon
	Otsikute defektid	15-35% triiv	Põrutused, vibratsioon
Integraallülitused	Pealispinna kõrvalekalded	35-70% lagunemine	Niiskus, temperatuur
	Riknenud ühenduskohad	10-20% avatud vooluring	Vibratsioon
	Tihendite defektid	10-30% lagunemine	Põrutused, vibratsioon

2.2.1 Takisti rike

Takistid on tavalised komponendid toiteallikates ja neid kasutatakse voolu ja pinge piiramiseks. Takisti rikked võivad tekkida mitmel põhjusel nagu ülekuumenemise, elektrilise pinge, mehaanilise koormuse ja tootmisvea tõttu [28].

Elektronikas on mitmeid viise, kuidas tuvastada takistite rikkeid, sealhulgas:

- otsitakse märke füüsilistest kahjustustest nagu värvimuutused, praod või põlemisjäljed. Vaadates Joonis 2.5, näeb takistit koos sarnaste kahjustustega;
- kasutades multimeetrit, mõõdetakse takisti takistust ja võrreldakse seda oodatava väärtusega;
- voltmeetriga on võimalik mõõta pingelangu. Kui pingelang on oodatust oluliselt väiksem, võib takisti olla vigane;
- takistit läbiva voolu mõõtmisel võrreldakse seda oodatava väärtusega;
- soojuskaamerat kasutades tuvastatakse, et kuumad kohad takistil ja võrreldakse oodatava väärtusega.



Joonis 2.5 Põlemisjäljega takisti koos mõraga [33]

Oluline on märkida, et mõnel juhul ei pruugi takisti rike olla kohe ilmne ühegi nimetatud meetodi abil, seega on alati hea mõtte kontrollida ka teisi vooluahela komponente.

2.2.2 Kondensaatori rike

Kondensaatorite rikked on üks võimalikest riketest ja need võivad tekkida mitmel põhjusel. Kondensaatoreid kasutatakse toiteallikates elektrienergia salvestamiseks ja vabastamiseks ning nende rike võib põhjustada mitmeid probleeme nagu pingetõusud, müra ja ebastabiilne väljund. Kondensaatori rikked võivad tekkida mitmel põhjusel nagu ülekuumenemise, liigpinge, mehaanilise koormuse ja vananemise tõttu [28].

Elektronikas on mitmeid viise kondensaatorite rikete avastamiseks, sealhulgas:

- otsitakse märke füüsilistest kahjustustest nagu näiteks muljumistest, pragudest või lekkivast elektrolüüdist. Vaadates Joonis 2.6, näeb takistit paremal, kus kuppel on nähtavalt paisunud, teavitades võimalikust rikkest;
- ESR-meetri abil mõõdetakse kondensaatori ESR (Kondensaatori sisetakistus - *Equivalent Series Resistance*) ja võrreldakse seda eeldatava väärtusega;

- kasutades mõõteseadet, mõõdetakse kondensaatori mahtuvust ja võrreldakse seda eeldatava väärtusega;
- ühendades voltmeeter kondensaatori külge, mõõdetakse pinge selle kohal. Teades takistust, arvutatakse lekkevoolud määratud ajavahemiku jooksul ja võrreldakse oodatud tulemusega.

Lisaks sellele on mõnede kondensaatorite nagu näiteks elektrolüüt-kondensaatorite, eluiga piiratud ja need võivad ebaõnnestuda isegi siis, kui nad näivad olevat heas korras.



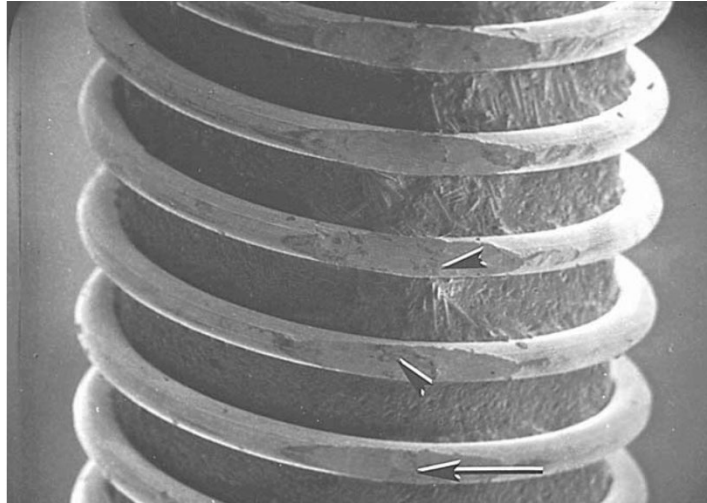
Joonis 2.6 Paisunud kondensaator [34]

2.2.3 Transformaatori rike

Transformaatorid on abitoiteplokkide kriitiline komponent, kuna need vastutavad sisendpinge muundamise eest soovitud väljundpingeks. Transformaatorite rikkeid võivad põhjustada mitmesugused põhjused. Sealhulgas on ülekuumenemine, elektriline pinge, mehaaniline pinge ja tootmisvead [28].

Elektronikas on mitmeid viise, kuidas tuvastada trafo rikkeid [28], sealhulgas:

- otsitakse märke füüsilistest kahjustustest nagu praod, põlenud või sulanud isolatsioon või kahjustatud mähised. Vaadates Joonis 2.7 on näha kahjustada saanud mähist;
- multimeetri abil mõõdetakse transformaatori iga mähise takistus. Kui pidevus puudub või kui takistus erineb oluliselt eeldatavast väärtusest, võib transformaator olla vigane;
- ühendades voltmeeter transformaatori külge, mõõdetakse pinget ja voolu. Kui pinge või vool erineb oluliselt oodatavast väärtusest, võib transformaator olla vigane;
- kasutades termograafiat tuvastatakse transformaatori kuumad kohad, mis võivad viidata selle ülekuumenemisele ja võimalikule rikkele.



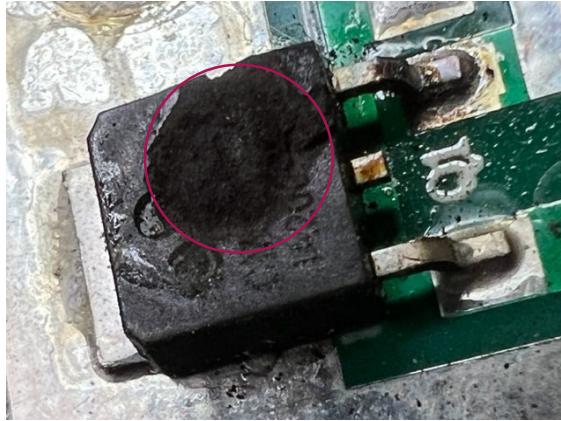
Joonis 2.7 Mähise riknemine kujutatud skaneeriva elektronmikroskoobiga [28]

2.2.4 Transistori rike

Transistorid on pooljuhtseadmed, mida kasutatakse tavaliselt toiteallikates elektrisignaalide lülitamiseks või võimendamiseks. Transistori rikked võivad tekkida ülekuumenemise, elektrilise pinge, mehaanilise koormuse ja tootmisvea tõttu.

Elektronikas on mitmeid viise transistoride rikete avastamiseks, sealhulgas:

- otsitakse märke füüsilistest kahjustustest nagu praod või põletusjäljed. Joonisel 2.8 on kujutatud on näha purunenud transistori riknenud kaitsekorpusega;
- mõõdetakse transistori pinget ja voolu, kasutades multimeetrit või ostsilloskoopi. Kui pinge erineb oluliselt oodatavast väärtusest, võib transistor olla vigane;
- h_{FE} (Hübriidparameetriga edasisuunaline voolutugevus, ühine emitter – *Hybrid parameter forward current gain, common emitter*) on bipolaartransistori võimenduse mõõtmine. Mõõtes transistori testeriga või multimeetril oleva transistori testimise funktsiooniga, saadakse transistori h_{FE} ja võrreldakse seda oodatava väärtusega [35];
- kasutades dioditestrit või diodide testimise funktsiooniga multimeetrit, mõõdetakse pingelangu ja võrreldakse oodatavate tulemustega.



Joonis 2.8 Purunenud transistor [36]

Lisaks eelnevalt mainitule on mõnedel transistoride tüüpidel erinevad rikete esinemisviisid ja võivad nõuda erinevaid katsemeetodeid.

2.2.5 Diodi rike

Diodid on pooljuhtseadmed, mida kasutatakse tavaliselt toiteallikates vahelduvpinge aldamiseks ja alalpinge tekitamiseks. Samuti kasutatakse diodi kaitsefunktsioonina. Diodide rikked võivad tekkida ülekuumenemise, elektrilise pinge, mehaanilise koormuse ja tootmisvigade tõttu.

Elektronikas on mitmeid viise diodide rikete avastamiseks, sealhulgas:

- otsitakse märke füüsilistest kahjustustest nagu praod või põletusjäljed. Joonis 2.9 kujutab praoga diodi;
- kasutades multimeetrit või ostsilloskoopi mõõdetakse pingelangu ja võrreldakse oodatud tulemusega;
- kasutades multimeetrit, kontrollitakse diodi volupidevust nii päri- kui ka tagasivoolu puhul. Tulemused võrreldakse oodatud tulemustega;
- kasutades multimeetrit, mõõdetakse diodi takistust mõlemas suunas;
- kasutades termograafiat tuvastatakse diodi kuumad kohad, mis võivad viidata selle ülekuumenemisele ja võimalikule rikke tekkimisele.



Joonis 2.9 Purunenud diod [37]

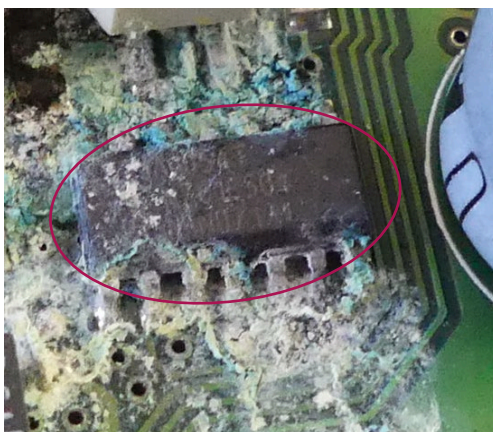
Lisaks sellele on teatud tüüpi diodidel nagu näiteks Zeneri diodidel erinevad omadused ja need võivad nõuda erinevaid katsemeetodeid.

2.2.6 Integraallülituste rike

Integraallülitusi kasutatakse tavaliselt toiteallikates pinge ja voolu reguleerimiseks. Integraallülituste rikkeid võib põhjustada ülekuumenemine, elektriline pinge, mehaaniline koormus ja tootmisvead.

Integraallülitused on keerulised komponendid, mis sisaldavad mitmeid transistore, diode ja muid elektroonilisi komponente, mistõttu on rikkeid raske tuvastada. Siiski on olemas mõned üldised meetodid [28], mida saab kasutada:

- otsitakse märke füüsilistest kahjustustest nagu praod või põletusjäljed. Joonis 2.10 kajastab veekahjustust integraallülituses;
- kasutades multimeetrit või ostsilloskoopi, mõõdetakse integraallülituse sisend- ja väljundsignaalid. Kui väljundsignaal erineb oluliselt oodatavast väärtusest või kui sisendsignaali ei töödelda korralikult, võib integraallülitus olla vigane;
- testitakse integraallülitust sisaldava vooluahela funktsionaalsust. Kui vooluahel ei toimi ootuspäraselt või kui väljund puudub, võib integraallülitus olla vigane;
- Kasutades termograafiat tuvastatakse kõik kuumad kohad integraallülitusel, mis võivad viidata selle ülekuumenemisele ja võimalikule rikke tekkimisele;
- kui on olemas varu integraallülitus, asendatakse arvatavasti vigane varuga ja jälgitakse, kas vooluahel toimib ootuspäraselt.



Joonis 2.10 Veekahjustus integreeritud ahelale [38]

Lisaks sellele on teatud tüüpi integraallülitused nagu näiteks mikroprotsessorid või mälukiibid, erinevate omadustega, mis võivad nõuda erinevaid katsemeetodeid.

3 VEAANALÜÜS

Elektronika veaanalüüs on protsess, mille käigus uuritakse ja tuvastatakse elektronikaseadmete või -süsteemide rikete põhjuseid. Rike võib olla seadme täielik rike või jõudluse halvenemine, mis muudab seadme kasutuskõlbmatuks.

Veaanalüüsi eesmärk on tuvastada rikke juurpõhjus kasutades sobivat metoodikat. Seeläbi saaks rakendada parandusmeetmeid sarnaste rikete vältimiseks tulevikus. See võib hõlmata seadme konstruktsiooni parandamist, tootmisprotsessi muutmist või paremate kvaliteedikontrollimeetmete rakendamist [28].

3.1 Veaanalüüsi metoodikad

Elektronika veaanalüüsi metoodika valimine on oluline, et pakkuda struktureeritud ja süstemaatilist lähenemist rikke juurpõhjuste väljaselgitamiseks. Hästi määratletud metoodika aitab tagada, et kõiki võimalikke rikke põhjuseid võetakse arvesse. Selle tulemusel saavutatakse põhjalikum arusaam uuritavast juurpõhjustest.

Lisaks aitab määratletud metoodika tagada, et veaanalüüs viiakse läbi järjepidevalt ja tõhusalt. See on oluline, kui töötatakse keerukate seadmete või süsteemidega, millel võib olla mitu veamoodust või mis nõuavad spetsiaalset katsetamist ja analüüsi.

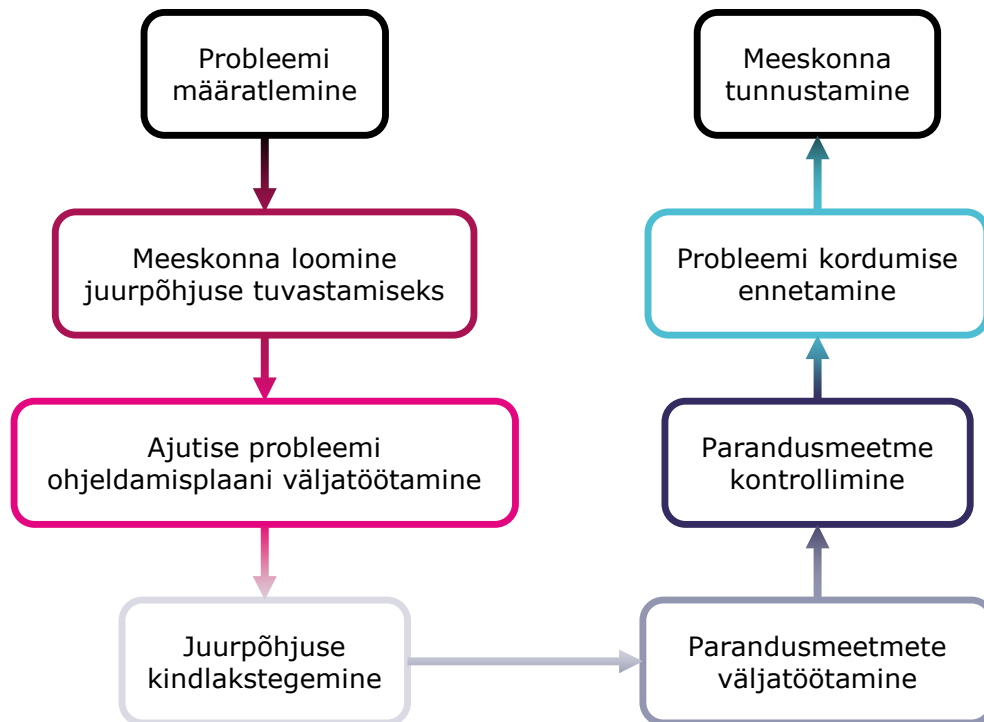
Järgnevalt võib metoodika kasutamine luua raamistiku veaanalüüsi meeskonna liikmete vaheliseks suhtlemiseks ja koostööks. Ühist metoodikat järgides saavad meeskonnaliikmed lihtsamalt jagada teavet ja teadmisi, mis võib viia tõhusama ja tulemuslikuma analüüsiprotsessini.

Mõned elektronika veaanalüüsis kasutatavad üldkasutatavad meetodid on 8D-metoodika, mis hõlmab kaheksa sammu probleemi algpõhjuste tuvastamiseks ja lahendamiseks. Samuti kasutatakse Ishikawa- või kalaluudiagrammi, mis aitab tuvastada võimalikke rikke põhjuseid, liigitades need sellistesse kategooriatesse nagu inimesed, seadmed, protsessid, materjalid, väliskeskkond ja juhtimine.

3.1.1 8D metoodika

8D metoodika on probleemide lahendamise meetod, mida kasutatakse paljudes tööstusharudes, sealhulgas elektronikatööstuses, et tuvastada ja lahendada probleemi või rikke juurpõhjus. 8D tähistab 8 distsipliini, mis on metoodika sammudeks [39].

8D metoodika hõlmab samme, mis on kujutatud Joonis 3.1 peal.



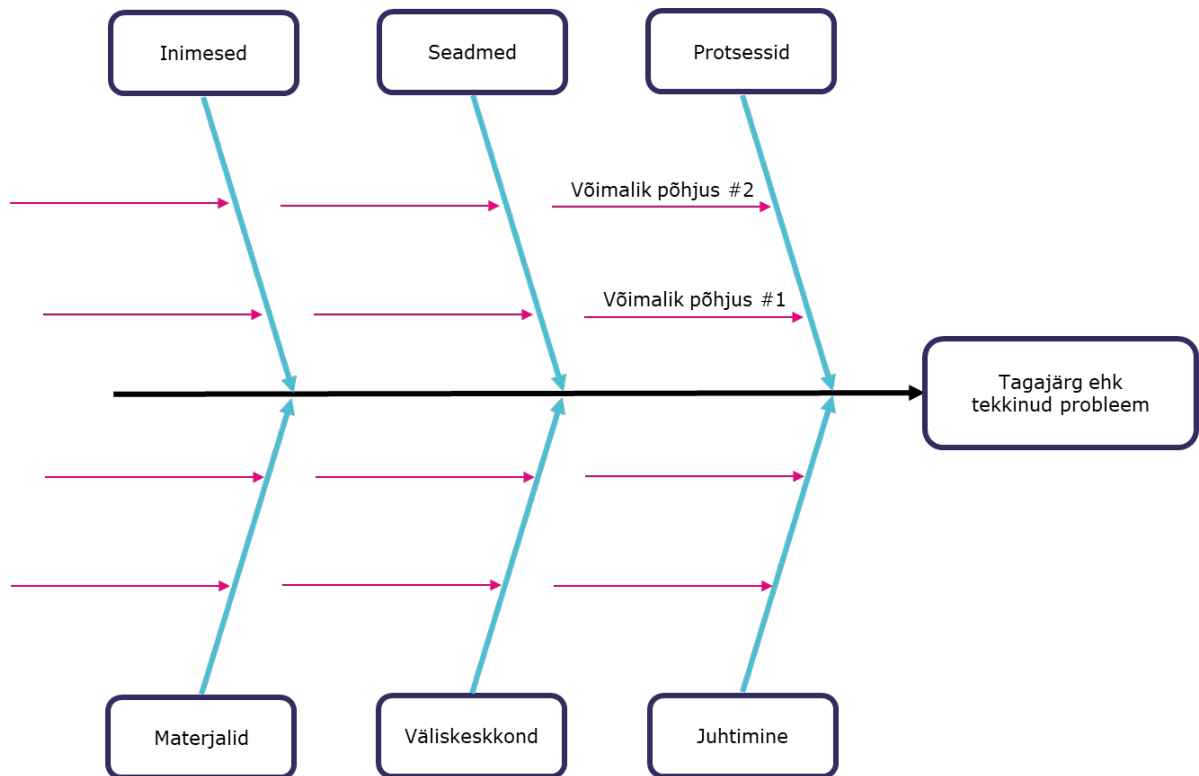
Joonis 3.1 8D-metoodika sammud [39]

8D-metoodika on struktureeritud ja süstemaatiline lähenemine probleemide lahendamisele, mis aitab tagada kõikide võimalike rikete põhjuste arvesse võtmist. Metoodika samme järgides saab kindlaks teha probleemi juurpõhjuse ning töötada välja parandusmeetmed, et vältida probleemi kordumist.

3.1.2 Ishikawa diagramm

Ishikawa- või kalaluudiagramm on visuaalne vahend, mida kasutatakse veaanalüüsis probleemi või rikke võimalike põhjuste tuvastamiseks. See on nime saanud oma looja Kaoru Ishikawa järgi ja seda tuntakse oma kuju tõttu ka põhjus-tagajärg diagrammina või kalaluudiagrammina.

Kalaluu diagrammi [40] kasutatakse probleemi võimalike põhjuste tuvastamiseks, organiseerides need kategooriatesse. Diagrammil on horisontaalne joon, mis kujutab probleemi või riket. Lisaks on diagrammil mitu nurga all olevat joont, mis kujutavad võimalike põhjuste kategooriaid. Kategooriad võivad sõltuvalt analüüsitavast probleemist erineda, kuid elektroonikas kasutatakse tavaliselt järgmisi kategooriaid: inimesed, protsessid, seadmed, materjalid, juhtimine ja keskkond. Diagramm on kujutatud Joonis 3.2 peal.



Joonis 3.2 Ishikawa diagramm [40]

Kalaluu diagrammi kasutav meeskond teeb ajurünnaku võimalike rikke põhjuste kohta. Seejärel määratakse kindlaks kategooriad ja meeskond töötab koos, et tuvastada võimalikud põhjused igas kategoorias. Põhjused kirjutatakse nurgelistele joontele. Seejuures spetsiifilisemad põhjused on horisontaaljoonele lähemal ja laiemad põhjused kaugemal.

Kui kõik võimalikud põhjused on tuvastatud ja diagrammil loetletud, saab meeskond analüüsida põhjuseid ja tuvastada rikke kõige tõenäolisemad algpõhjused. See aitab meeskonnal välja töötada parandusmeetmed, et kõrvaldada algpõhjus ja vältida rikke kordumist tulevikus.

Kalaluudiagramm on kasulik vahend veaanalüüsis, sest see aitab korrastada võimalikke põhjuseid kategooriatesse. See aitab tagada, et kõiki võimalikke põhjuseid võetakse arvesse. Samuti soodustab see meeskonnaliikmete vahelist koostööd ja suhtlemist ning võib aidata tuvastada võimalikke põhjuseid, mida muidu ei oleks võinud arvesse võtta.

3.2 Veaanalüüsi sammud

Veaanalüüsi protsess hõlmab tavaliselt mitmeid etappe: visuaalset kontrolli, mittepurustavat katsetamist ja purustavat katsetamist. Visuaalne kontroll hõlmab seadme kontrollimist nähtavate kahjustuste või defektide leidmiseks. Varjatud defektide

tuvastamiseks võib juurpõhjuse tuvastada röntgenikiirguse, termograafia ja elektrikatsetuste abil.

Kui mittepurustavate katsemeetodite abil ei ole võimalik tuvastada rikke põhjust, võib osutuda vajalikuks purustavate katsete tegemine. Purustava katsetamise käigus võetakse seade lahti ja uuritakse komponente kahjustuste või rikke tunnuste leidmiseks. Veaanalüüs lõppeb aruande kirjutamisega ja analüüsitud toodete utiliseerimisega.

3.2.1 Teabe kogumine

Teabe kogumine [41] on oluline samm elektroonika veaanalüüsi protsessis. See hõlmab andmete ja teabe kogumist seadme või süsteemi kohta, et mõista asjaolusid ja tingimusi, milles rike tekkis. Teabe kogumine võib hõlmata mitmeid meetodeid. Sealhulgas viiakse läbi intervjuud asjaosalistega ning vaadatakse läbi olukorra kohta käivaid dokumente.

Intervjuud asjaomaste töötajate nagu näiteks seadme tootja, projekteerija või kasutajaga võivad anda olulist teavet rikke tekkimise asjaolude kohta. Näiteks võivad nad anda teavet kasutustingimuste, hoolduse ajaloost või mistahes muudatustest, mis tehti seadmes enne rikke tekkimist.

Dokumentide läbivaatamine võib anda väärtuslikku teavet seadme või süsteemi kohta nagu näiteks projekteerimisnõuded, tootmisprotsessid ja kvaliteedikontrollimeetmed. See teave võib aidata tuvastada võimalikke probleeme seadme projekteerimise või tootmisega, mis võisid kaasa aidata rikke tekkimisele.

3.2.2 Visuaalne kontroll

Visuaalne kontroll [42] on teine oluline samm elektroonika rikete analüüsimisel. See hõlmab seadme või süsteemi hoolikat uurimist, et otsida märke kahjustustest, defektidest või kõrvalekalletest.

Visuaalse kontrolli käigus kasutab uurija erinevaid vahendeid, näiteks mikroskoopi, luupi või digikaamerat, et seadet lähemalt uurida. Ta otsib nähtavaid pragusid, kriimustusi, mõlke või muid füüsilise kahjustuse märke. Samuti otsitakse kõrvalekaldeid pinna viimistluses või jootekohtades.

Lisaks füüsiliste kahjustuste otsimisele kontrollib uurija ka elektriliste komponentidega seotud probleeme. See võib hõlmata ülekuumenemise või põletusjälgede kontrollimist, mis võivad viidata elektrikatkestusele. Samuti on võimalik kontrollida, kas juhtmed on

lahti või kahjustatud, kas on vigaseid pistikuid või muid elektrilisi probleeme, mis võivad põhjustada seadme rikkeid.

Visuaalne kontroll võib hõlmata ka rikutud seadme võrdlemist sarnase töötava seadmega. See võib aidata tuvastada erinevusi või kõrvalekaldeid, mis võisid rikke tekkimisele kaasa aidata.

3.2.3 Mittepurustavad katsetamise meetodid

Mittepurustava katsetamise meetodid [42] on tehnika, mida kasutatakse elektroonika rikete analüüsimisel, et tuvastada defekte või kõrvalekaldeid ilma seadet või süsteemi kahjustamata. Mõned üldised mittepurustavad meetodid, mida kasutatakse elektroonika rikete analüüsimisel on röntgenkontroll, termograafia ja elektrilised katsed:

- röntgenkontroll on elektroonikaseadmete veaanalüüsis sageli kasutatav mittepurustava katsetamise meetod. See hõlmab röntgenikiirguse läbimist seadmest või süsteemist ja sisekomponentide pildistamist. See võib paljastada kõik varjatud defektid nagu praod, tühimikud või paigutusvead, mis ei pruugi visuaalse kontrolli käigus olla nähtavad;
- termograafia on teine meetod, mida kasutatakse rikete analüüsimisel. See hõlmab infrapunakaamera kasutamist seadme või süsteemi pildistamiseks, et tuvastada temperatuuri kõrvalekaldeid. Seeläbi tuvastatakse kõik komponendid, mis on ülekuumenenud või tekitavad liigset soojust, mis võib põhjustada rikkeid;
- elektrikatsetused on samuti oluline meetod, mida kasutatakse elektroonikarikete analüüsimisel. See hõlmab seadme või süsteemi katsetamist elektriliste näitajate nagu näiteks pinge, voolu ja takistuse suhtes. See aitab tuvastada mistahes elektrilisi probleeme nagu lühised, avatud voluringid, vigased komponendid või valed ühendused;
- muud elektroonikarikete analüüsimisel kasutatavad katsemeetodid on akustiline mikroskoopia, mille puhul kasutatakse defektide avastamiseks helilained ja värvainete sissetungimise kontrolli. Seadme pinnale kantakse vedelat värvainet, et avastada võimalikud praod või muud defektid.

Mittepurustava katsetamise meetodid on olulised vahendid elektroonikavigade analüüsimisel, kuna need aitavad tuvastada defekte või kõrvalekaldeid ilma seadet või süsteemi kahjustamata. Siiski on oluline kasutada sobivat meetodit, mis põhineb konkreetsel rikke viisil ja analüüsitava seadme tüübil.

3.2.4 Staatilised mõõtmised

Staatilised mõõtmised on üks tüüpilisemaid meetodeid [43], mis kuulub samuti mittepurustava katsetamise meetodi hulka. Staatilisi mõõtmisi teostatakse elektroonika rikete analüüsimisel, et hinnata elektroonikakomponentide ja -seadmete toimivust ja seisukorda. Staatilised mõõtmised hõlmavad komponendi või seadme elektriliste omaduste mõõtmist, kui seade ei tööta. Need mõõtmised võivad anda väärtuslikku teavet komponendi töövõime ja võimalike defektide või probleemide kohta.

Elektroonika rikkeanalüüsis kasutatavad staatilised mõõtmised on järgmised:

- takistuse mõõtmine,
- mahtuvuse mõõtmine;
- induktiivsuse mõõtmine;
- pinge mõõtmine;
- voolu mõõtmine.

Staatilised mõõtmised viiakse tavaliselt läbi spetsiaalsete seadmetega nagu multimeetrid, LCR-meetrid või ostsilloskoobid. Neid mõõtmisi saab teha kiiresti ja mittepurustavalt, võimaldades komponentide ja seadmete kiiret hindamist. Analüüsises staatiliste mõõtmiste tulemusi, saavad veaanalüüsi eksperdid tuvastada võimalikud probleemid ja määrata kindlaks asjakohased meetmed nagu näiteks täiendavad katsed või komponentide väljavahetamine.

3.2.5 Purustavad katsed

Purustavaid katseid kasutatakse elektroonika veaanalüüsis, kui mittepurustavad katsemeetodid ei ole piisavad rikke algpõhjuse kindlakstegemiseks. Purustava katsetamise [28] käigus võetakse seade või süsteem füüsiliselt lahti ja uuritakse sisemisi komponente.

Purustava katsetamise eesmärk on tuvastada rikke põhjustanud defekti asukoht ja olemus. Seda teavet saab kasutada seadme konstruktsiooni või tootmisprotsessi parandamiseks, et vältida sarnaseid tõrkeid tulevikus.

Elektroonikaseadmete rikete analüüsimisel kasutatavad destruktiivsed katsemeetodid hõlmavad muuhulgas [44] ristlõikeid, dekapseldamist ja mikroproovimist:

- ristlõige tähendab, et seadmest või süsteemist lõigatakse väike osa ja uuritakse seda mikroskoobi all. See võib paljastada seadme sisemise struktuuri ja võimalikud defektid;

- dekapseldamine hõlmab integraallülituse välise pakendi või katte eemaldamist, et paljastada sisemised komponendid. See võib paljastada kõik defektid kiibis või juhtmete sidemetes;
- mikroproovimine hõlmab peenikese nõela kasutamist seadme sisemiste komponentide sondeerimiseks, et tuvastada võimalikud elektrilised probleemid või defektid.

Oluline on märkida, et destruktiivne testimine võib kahjustada seadet või süsteemi, muutes selle kasutuskõlbmatuks. Seetõttu kasutatakse destruktiivset katsetamist tavaliselt ainult siis, kui rikke maksumus ületab seadme või süsteemi väljavahetamise kulud.

3.2.6 Aruanded veaanalüüsi kohta

Veeanalüüsi aruande [45] kirjutamine on oluline osa veaanalüüsi protsessist elektroonikas. Aruanne peaks sisaldama selget ja kokkuvõtlikku kirjeldust rikke kohta, tehtud katsete või analüüside tulemusi ning soovitusi parandusmeetmete võtmiseks. Aruanne tuleks kirjutada nii, et see oleks arusaadav nii tehnilistele kui ka mittetehnilistele sidusrühmadele.

Järgnevalt on esitatud mõned põhikomponendid, mis peaksid sisalduma rikkeanalüüsi aruandes:

- esitatakse lühikokkuvõtte veast, sealhulgas selle algpõhjus, kõik tehtud katsed või analüüsid ja soovitusid parandusmeetmete võtmiseks;
- antakse lühiülevaade komponendist või süsteemist, mis ei toiminud, sealhulgas kõik asjakohased spetsifikatsioonid või projekteerimisandmed;
- kirjeldatakse rikke üksikasju, sealhulgas kõiki sümptomeid, veateateid või muid märke rikke kohta;
- kirjeldatakse testimist ja analüüsi, mis viidi läbi rikke algpõhjuse tuvastamiseks. See võib hõlmata visuaalset kontrolli, mittepurustavaid ja purustavaid katseid ning teostatud simulatsioone või modelleerimist;
- kirjeldatakse protsessi, mida kasutati rikke algpõhjuse tuvastamiseks, sealhulgas kasutatud meetodikat ja vahendeid;
- esitatakse kokkuvõtte järeldustest ja soovitusid parandusmeetmete võtmiseks. See võib sisaldada soovitusi rikutud komponendi või süsteemi ümberkujundamiseks või asendamiseks ning soovitusi protsessi parandamiseks, et vältida sarnaseid rikkeid tulevikus;
- lisad sisaldavad kõiki täiendavaid tõendavaid dokumente nagu näiteks katseprotokolle, fotosid või andmelehti.

Rikkeanalüüsi aruande kirjutamisel on oluline kasutada selget ja lühikest keelt ning korraldada aruanne loogiliselt ja kergesti jälgitavaks. Aruande peaksid läbi vaatama tehnilised ja mittetehnilised sidusrühmad, et tagada selle arusaadavus ja kõigi asjakohaste küsimuste käsitlemine. Hästi kirjutatud veaanalüüsi aruanne võib aidata sidusrühmadel mõista rikke algpõhjust ja võtta asjakohaseid parandusmeetmeid, et vältida sarnaseid rikkeid tulevikus.

3.2.7 Komponentide utiliseerimine

Elektroonika rikkeanalüüsi puhul on mõnikord vaja analüüsitud komponente või seadmeid vanametalliks visata või kõrvaldada [46]. Seda tehakse tavaliselt siis, kui leitakse, et komponendid või seadmed on defektsed või ei ole enam kasutatavad ning neid ei saa parandada ega taaskasutada.

On mitmeid põhjusi, miks analüüsitud elektroonika läheb utiliseerimisse:

- mõnel juhul võivad komponendid või seadmed olla nii tõsiselt kahjustatud, et neid ei saa parandada ega uuesti kasutada. Põhjuseks võivad olla füüsilised kahjustused nagu purunenud komponendid või sisemised kahjustused (lühis või läbipõlenud komponendid);
- mõnel juhul võivad komponendid või seadmed olla vananenud või kasutusest välja võetud, mistõttu neid on raske parandada või taaskasutada. Selle põhjuseks võivad olla muutused tehnoloogias, tööstusstandardites või regulatiivsetes nõuetes;
- mõnel juhul võivad komponendid või seadmed kujutada endast ohutusriski, kui neid kasutatakse või taaskasutatakse. Põhjuseks võib olla ohtlike materjalide, näiteks plii/kaadmium olemasolu, elektrilöögi- või tulekahjuoht.

Kui analüüsitud elektroonika tuleb utiliseerida, on oluline, et seda tehtaks keskkonnahoidlikult ja kohalikele eeskirjadele vastavalt. See võib hõlmata komponentide või seadmete ringmajandusse kaasamist või ohtlike materjalide nõuetekohast kõrvaldamist. Selle tulemusel tagavad töölised keskkonnamõju vähendamist ning töötajate ja üldsuse ohutuse tagamist.

4 VEAANALÜÜSI JUHENDI KOOSTAMINE

Nagu varasemates peatükkides sai juba käsitletud, võib abitoiteplokkides tõrkeid esineda. Tõrked esinevad eri põhjustel ning iga toote puhul on vajalik sooritada veaanalüüs. Juhendamiseta on raskendatud teostada ootustele vastavat veaanalüüsi. Abitoiteploki elektriühela rikete uurimiseks viidi läbi veaanalüüsi katse, milles osalesid nii kogunud insenerid kui ka vähese kogemusega praktikandid. Katses osalejatele anti lõputöö raames valminud juhend, mis juhatas neid läbi veaanalüüsi etappide.

Enne juhendiga tutvumist tehti ülevaade visuaalse kontrolli, staatiliste mõõtmiste ja muude veaanalüüsi meetodikas käsitletud tehnikate kohta. Selgitati iga meetodika vajalikkust ning arutati läbi sammud, mis kaasnevad iga meetodikaga. Staatiliste mõõtmiste näitel tehti ülevaade, kuidas kasutada mõõteseadmeid ning mida neid kasutades silmas pidada.

Valminud juhend keskendus terviklikult sagedusmuunduri analüüsi peale. Seetõttu kajastab Lisa 1 alt leitav juhend mitte ainult elektroonika analüüsi, vaid toodet kui tervikuna. Juhend jaguneb mitme sammu vahel:

- Esimeste sammude hulgas on võimalik alustada veaanalüüsi informatsiooni kogumisega: Mis seerianumbri alt sagedusmuundur toodeti? Mis on elektroonika tootekoodid? Kas on võimalik teostada andmevahetust sagedusmuunduriga?
- Järgnevalt teostatakse sagedusmuundurile visuaalne kontroll. Uuritakse, kas on nähtavaid kahjustusi või jälgi, mis viitaks rikke juurpõhjusele.
- Staatiliste mõõtmistega tehakse kindlaks, kas alaldi ja vaheldi on töökorras analüüsitava sagedusmuunduril.
- Kõik märkused on võimalik juhendit täites kirja panna ning järgnevalt toode ohutult lahti võtta.
- Lahti võetud sagedusmuunduri sisemust analüüsides peab veaanalüüsija kordama eelnevaid meetodika samme: Kas on silmaga nähtavaid kahjustusi? Mis väärtust annab üks või teine elektroonikakomponent staatilisi mõõtmisi teostades?
- Juhendi põhjaliku täitmise lõpus peab veaanalüüsija hinnangu andma: Kas analüüsitava sagedusmuundur on töökorras või mitte?
- Juhul kui seade on töökorras, võib teostada sagedusmuunduri testimise. Ohutuse tagamise eesmärgil jäetakse testimine kogunud inseneridele.

4.1 Katse korraldamine

Katse eesmärk oli sooritada veaanalüüs, kus osalejad saaks juhendi abil teha analüüsitava sagedusmuundurile esmane veaanalüüs. Selle tulemusel oli võimalik hinnata veaanalüüsi metoodika tõhusust elektriahela rikete tuvastamisel ja diagnoosimisel. Lisaks võrreldi kogunud inseneride ja vähese kogemusega praktikantide tulemusi veaanalüüsi läbiviimisel ja täpsete järelduste tegemisel. Katse abil sooviti anda oma panus sagedusmuundurite rikkeid käsitlevate teadmiste kogumisse. Samuti oli tahe anda praktilisi soovitusi veaanalüüsi meetodite parandamiseks ning veaanalüüsija koolitamiseks.

Sagedusmuunduri veaanalüüsi katses osales kokku 18 osalejat. Sealhulgas olid nii kogunud insenerid kui ka vähese kogemusega praktikandid, kes olid värvatud ühest Eestis tegutsevast tööstusettevõttest.

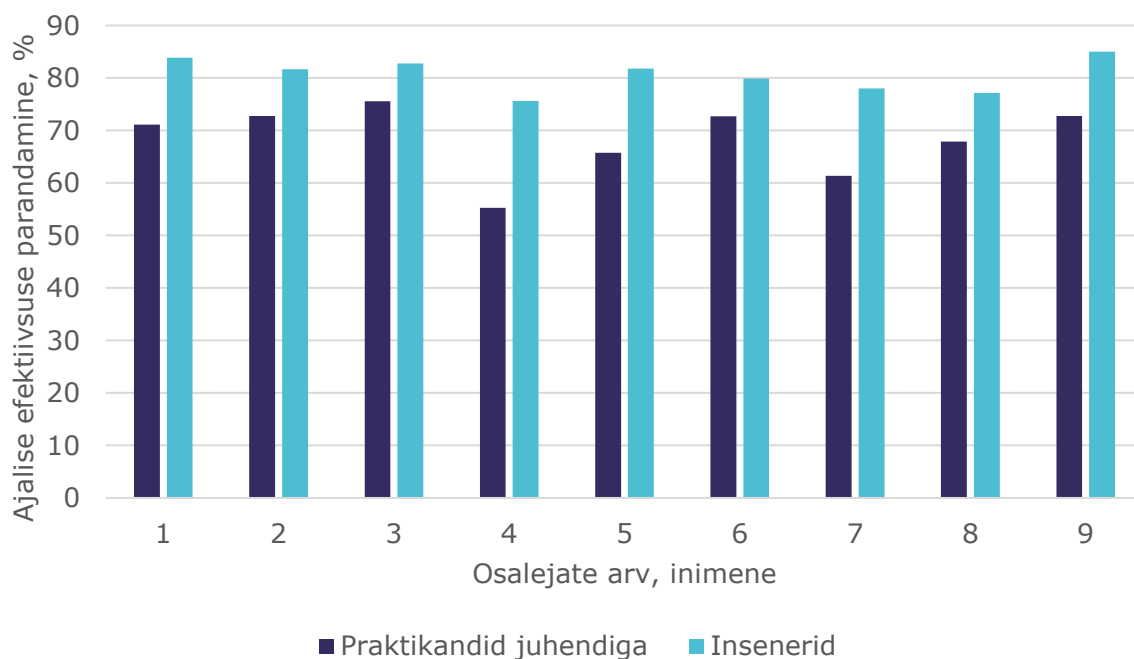
Osalejad jagati kahte rühma: Rühm A koosnes üheksast kogunud insenerist, kellel oli mitmeaastane elektrotehniline töökogemus. Neil olid laialdased teadmised ja praktilised kogemused elektriahelate, sagedusmuundurite projekteerimise ja tõrkeotsingu alal. Rühma B koosseisu kuulus 9 vähese kogemusega praktikanti, kes jätkasid praegu oma bakalaureuse- või magistriõpinguid elektrotehnika alal ja kellel olid piiratud või puudulikud praktilised kogemused selles valdkonnas.

Rühma B teavitati uuringu eesmärgist ja neile anti ülesanne sooritada veaanalüüs ilma juhendi abita. Rühm A katses ei osalenud. Katse läbiviimisel oli võimalik osalejatel iseseisvalt veaanalüüsi sooritada. Tulemuste järjepidevuse ja täpsuse tagamiseks anti analüüsimiseks identsed sagedusmuundurid, multimeeter ja muud elektrotehnika valdkonnas tavaliselt kasutatavad tööriistad rikete diagnoosimiseks ja tõrkeotsinguks. Katse toimus laboratooriumis, kus sellised muutujad nagu temperatuur ja niiskus olid kõigi osalejate puhul ühesugused.

Järgnevalt said nii rühm A kui ka rühm B veel ühe analüüsi sooritada, kuid seekord neile jagati juhend, millega veaanalüüsi sooritada. Kõik tähelepanekud ja järeldused pandi veaanalüüsi raportis kirja. Raportit täideti igat sammu jälgides ja küsimuste korral, saadi katse läbiviijalt täiendavaid küsimusi küsida. Katse tingimused ei muutunud – keskkond, veaanalüüsijad, temperatuur ja seadmed jäid identseteks. Selle katse eesmärk oli näha, et juhendi abil rühmad saavad paremini tööd sooritada.

4.2 Katse tulemused ja ettepanekud

Katse lõppemisel tehti kindlaks, et kõik veaanalüüsijad on teostanud ootustele vastavat veaanalüüsi. Iga osaleja puhul mõõdeti aega ning tulemusi on võimalik näha Joonis 4.1 peal. Joonis näitab veaanalüüsiks kulunud ajalist kulu eri rühmadel. Võrdluseks on võetud esimeses katses osalenud praktikantide aega, kus neil ei olnud võimalik juhendit kasutada. Protsentuaalne määr näitab kuivõrd palju paremini said töötajad veaanalüüsi sooritatud juhendit kasutades võrreldes ajakuluga, mis oli enne juhendi kasutamist.



Joonis 4.1 Veaanalüüsiks kulunud ajaline kulu eri rühmadel

Uuringu tulemused näitavad, et nii kogenud insenerid kui ka kogemusteta praktikandid suutsid vigade analüüsimeetodit kasutades vigade algpõhjuse õigeaegselt tuvastada. Kogenud inseneridel oli vähe raskusi juhendi järgimisel ja analüüsi läbiviimisel, mistõttu on võimalik näha sarnaseid tulemusi ajalise kulu analüüsimisel. Praktikandid olid katse alguses raskustes, kuid vähese juhendamise ja toetuse korral said nad ülesandega hästi hakkama.

Töö käigus ei leitud märkimisväärset erinevust kahe rühma tulemuslikkuses rikete tuvastamisel ja diagnoosimisel. See viitab sellele, et asjakohase koolituse ja toetuse korral paraneb veaanalüüsiks kulunud aeg ning veaanalüüside soorituse kvaliteet. Võib oletada, et pikaajasel juhendi kasutamisel võivad vähese kogemusega praktikandid veaanalüüsi läbiviimisel sama hästi hakkama saada kui kogenud insenerid. Uuringu piirangute hulka kuuluvad siiski identsete sagedusmuundurite kasutamine ja

kontrollitud laboratooriumi keskkond, mis ei pruugi kajastada analüüside tulemuslikkust tervikuna.

Uuringus kasutatud veanalüüsi meetodika oli tõhus sagedusmuunduri rikke tuvastamisel. Vigade analüüsimise meetodika parandamine ning inseneride ja praktikantide parem väljaõpe ja koolitus võib suurendada veaanalüüsi protsessi täpsust ja tõhusust ning aidata vältida kriitilisi tõrkeid erinevates rakendustes. Samuti on soovitatav jätkata teadusuuringuid ja arendustegevust selles valdkonnas, et teha kindlaks uued tehnikad ja vahendid, mida saab kasutada veaanalüüsi protsessis.

Tulevased sarnased uuringud võiksid laiendada seda uuringut suurema valimi ja laiema hulga rikete ja stsenaariumide valikuga. Lisaks võiks täpsust ja tõhusust parandada uute tehnoloogiate nagu näiteks tehisintellekti ja masinõppe kasutamisega veaanalüüsis. Täiendkoolituste läbimisel ja juhendaja abil oleks võimalik olemasolevasse juhendisse rakendada arenenumate meetodite kasutamist. Termograafia, vibratsioonianalüüsi ja röntgenpildistamise üksikasjalikumad ja põhjalikumad koolitused veaanalüüsi valdkonnas tagaks põhjalikumad aruanded ja aitaks kaasa hõlpsamini juurpõhjuseni jõuda. Sellega kaasneks juurdepääsu tagamine spetsiaalsetele tööriistadele ja seadmetele efektiivsema veaanalüüsi nimel.

KOKKUVÕTE

Töö peamine eesmärk oli luua eestikeelset kirjandust veaanalüüsi kohta. Lisaeesmärgina seati veaanalüüsi juhendi loomist, mille abil on võimalik ühel Eestis tegutseval tööstusettevõttel veaanalüüsiks kulutatud tööaega vähendada. Töö kajastab meetodika valikut ja uuritavaid komponente, et sooritada ootustele vastav veaanalüüs.

Lõputöö esimene peatükk tekitab ülevaate sagedusmuunduritest ja sagedusmuunduris leitavatest komponentidest. Põhjalikumalt uuritakse sagedusmuunduris olevaid abitoiteplokkke.

Teine peatükk loob ülevaate juurpõhjustest, miks seadmed riknevad. Tuuakse esile kuus levinumat juurpõhjust ning mis tõenäosusega nad esinevad. Samuti tehti ülevaate levinumate komponentide riknemistest ja kuidas neid tuvastada.

Kolmas peatükk keskendub veaanalüüsi meetodikate uurimisele: tutvustati kahte populaarsemat meetodikat ning toodi välja seitse sammu veaanalüüsi sooritamiseks.

Lõputöö suurimaks tulemuseks on neljandas peatükis käsitletud juhendi koostamine ja selle rakendamine tööstusettevõtte protsessi parandamise eesmärgil. Eelnevalt käsitletud teemad kasutati juhendi koostamisel, mida näeb Lisa 1 all.

Selgus, et bakalaureusetöö alguses seatud hüpotees sai kinnitatud. Juhendi rakendamisel parandasid tulevased praktikandid oma veaanalüüsiks kulunud aega ning olid lähedased inseneridele kulunud ajaga. Vähesese juhendamisega oli võimalik praktikantidel ka soovitud tulemus saavutada. Seega saab järeldada, et juhendi rakendamisel paranes mitte ainult veaanalüüsi kvaliteet vaid ka tööks kulunud aeg.

Käesoleva töö parendamiseks oleks võimalik tulevikus osalejate ja analüüsitava teodete valimit suurendada, et saada paremat ülevaadet juhendi tõhususest. Samuti võiks uurida magistritöö raames täiendavaid võimalusi, kuidas näiteks tehisintellekti ja masinõppe rakendamisega veaanalüüsi parendada.

Teoreetilise materjali läbitöötamine, juhendi koostamine ja selle rakendamine andis bakalaureusetöö autorile palju oskusi veaanalüüsi sooritamises. Töö käigus arenesid oskused elektroonika süvendatud arusaama tekkimisel ning nende kasutamises. Tulevikus saab antud tööd kasutada näiteks eestikeelse õppe läbiviimisel elektroonika veaanalüüsi teemal koos veaanalüüsi töötoaga.

SUMMARY

The main aim of the thesis was to create a body of literature in Estonian on the topic of failure analysis. An additional objective was the creation of a manual for failure analysis, which would help to reduce the time spent on failure analysis in an industrial company operating in Estonia. The work reflects the choice of methodology and the components to be investigated to perform a failure analysis that meets the expectations.

The first chapter of the thesis gives an overview of frequency converters and the components to be found in a frequency converter. The auxiliary power supplies in the frequency converter are investigated in more detail.

The second chapter provides an overview of the root causes of equipment failure. The six most common root causes and their probability of occurrence are highlighted. An overview of common component failures and how to detect them is also provided.

The third chapter focuses on failure analysis methodologies: two of the most popular methodologies are introduced and seven steps to perform a fault analysis are outlined.

The major outcome of the thesis is the development of a manual, discussed in chapter four, and its implementation for process improvement in an industrial company. The previously discussed topics were used in the preparation of the guide, which can be seen in Appendix 1.

It turned out that the hypothesis set at the beginning of the thesis was confirmed. By implementing the guide, future trainees improved their time spent on failure analysis and were close to the time spent by engineers. With little guidance, the trainees were also able to achieve the desired result. Therefore, it can be concluded that the implementation of the guide improved the quality of the failure analysis and the time spent on the work.

To improve the present work, it would be possible to increase the sample of participants and products to be analyzed to better understand the guide's effectiveness. Also, further ways to improve failure analysis, for example by applying artificial intelligence and machine learning, could be explored in the context of a master's thesis.

Working through the theoretical material, designing the guide, and implementing it gave the thesis author a lot of skills in performing failure analysis. During the thesis, skills in developing a deeper understanding of electronics and their application were developed.

In the future, this thesis can be used, for example, in conducting classes (in Estonian language) on electronics failure analysis in combination with a failure analysis workshop.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] VFD – Variable Frequency Drives, „Saving energy & money now!,” [Võrgumaterjal].
- [2] Market Business News, „What is failure analysis? Definition and examples,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://marketbusinessnews.com/financial-glossary/failure-analysis/>. [Kasutatud 19.03.2023].
- [3] Built In, „Reliability Engineer - Drive Products at ABB,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://builtin.com/job/engineer/reliability-engineer-drive-products/1365704>. [Kasutatud 19.03.2023].
- [4] K. Kuslap, „Basics of diagnostics and fault-tolerant control of electrical Drives. Elektriajamite diagnostika ja tõrkeid taluva juhtimise alused.”, [Bakalaureusetöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2020. [Online]. Loetud aadressil <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/563dd1eb-6a40-4e55-af15-fbfd1357a06e>. Kasutatud 07.05.2023.
- [5] E. Volkova, „Analysis of the Errors Found During Software Testing on the Example of the Andevis AS Company. Tarkvara testimise käigus leitud vigade analüüs ettevõtte Andevis AS näitel.”, [Bakalaureusetöö], Infotehnoloogia teaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2019. [Online]. Loetud aadressil <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/71542a92-8d64-4bbd-82e5-bb600af0a16f>. Kasutatud 07.05.2023.
- [6] StrongFlow, „Sagedusmuunduriga ajamid,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://strongflow.fi/et/sagedusmuunduriga-ajamid>. [Kasutatud 29.03.2023].
- [7] V. Vodovozov, R. Jansikene, Jõuelektronika, Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, Tallinn, 2008.
- [8] T. Lehtla, Sujuvkäivitid ja sagedusmuundurid, Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, Tallinn, 1999.
- [9] Energy Management Corporation, „Pros and Cons of Using a VFD,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://emcsolutions.com/2021/02/04/vfds-pros-and-cons/>. [Kasutatud 29.03.2023].
- [10] ECSTUFF4U, „Advantages and disadvantages of VFD,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ecstuff4u.com/2019/11/advantage-disadvantage-vfd.html>. [Kasutatud 29.03.2023].
- [11] IndustryARC, „Frequency Converter Market - Forecast(2023 - 2028),” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.industryarc.com/Report/15229/frequency-converter-market.html>. [Kasutatud 31.03.2023].
- [12] Physics and Radio-Electronics, „Rectifier - What is rectifier,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/rectifier/rectifier-what-is-rectifier.html>. [Kasutatud 04.04.2023].

- [13] EMIS, „Reactors and Filters used in VFD and Motor protection,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.emisindia.com/insights/reactors-and-filters-used-in-vfd-and-motor-protection/>. [Kasutatud 04.04.2023].
- [14] DOSupply, „Drive Component Overview: DC Bus Definition and Overview,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dosupply.com/tech/2022/07/06/drive-component-overview-dc-bus-definition-and-overview/#:~:text=DC%20Bus%20or%20DC%20link,AC%20converter%20in%20electric%20drives..> [Kasutatud 04.04.2023].
- [15] Sunpower Electronics, „What is an inverter,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-an-inverter/>. [Kasutatud 04.04.2023].
- [16] Industlabs, „VFD Control System Basics,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://industlabs.com/vfd-control-system#:~:text=What%20is%20a%20VFD%20Control,frequency%20\(Hz\)%20and%20voltage.](https://industlabs.com/vfd-control-system#:~:text=What%20is%20a%20VFD%20Control,frequency%20(Hz)%20and%20voltage.) [Kasutatud 04.04.2023].
- [17] Spike Electric Controls, „VFD Control Panels,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://spikeelectric.com/products/variable-frequency-drive-vfd-control-panels/>. [Kasutatud 04.04.2023].
- [18] VFDS, „Variable frequency drive Cold Plate,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.vfds.org/variable-frequency-drive-cold-plate-867193.html>. [Kasutatud 04.04.2023].
- [19] TMEIC, „Cooling Large Variable Frequency Drives,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tmeic.com/sites/default/files/assets/files/library/Application%20Edge%20Cooling%20Large%20VFDs.pdf>. [Kasutatud 04.04.2023].
- [20] ABB, „User interface options,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/drives/connectivity/user-interface-options>. [Kasutatud 05.04.2023].
- [21] Control Engineering, „VFDs from the inside out,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.controleng.com/articles/vfds-from-the-inside-out/>. [Kasutatud 05.04.2023].
- [22] P. Scherz, S. Monk, *Practical Electronics for Inventors*, 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016, pp. 371, 714.
- [23] F. M. Mims III, *Getting Started in Electronics*, 12th ed. The United States of America: Archer Publishing, 1994.
- [24] Advanced Conversion Technology, „Navigating The Power Supply Component Shortage,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.actpower.com/educational/power-supply-component-availability/>. [Kasutatud 05.04.2023].
- [25] Sierra Circuits, „6 Types of Electronic Component Failures in PCBs,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.protoexpress.com/blog/types-electronic-component-failures-pcbs/>. [Kasutatud 17.05.2023].

- [26] H. P. Bloch, F. K. Geitner, *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: Practical Machinery Management for Process Plants*, 3rd ed. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1994
- [27] A. S. H. Makhlof, M. Aliofkhaezai, *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*, Kidlington: Butterworth Heinemann, 2016
- [28] P. L. Martin, *Electronic Failure Analysis Handbook: Techniques and Applications for Electronic and Electrical Packages, Components, and Assemblies*, 1st ed. USA: The McGraw-Hill Companies, 1999
- [29] HZO, „Corrosion: What is Water Damage Really Doing to Your Electronics?“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hzo.com/blog/corrosion-water-damage-electronics/>. [Kasutatud 17.05.2023].
- [30] BEZANTEK Corporation, „Safety Tools to Prevent Common Electrical Problems“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://besantek.com/blogs/news/safety-tools-to-prevent-common-electrical-problems>. [Kasutatud 17.05.2023].
- [31] Swiftpak, „The top 4 pain points of electronics packaging & how to avoid them“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.swiftpak.co.uk/insights/pain-points-of-electronics-packaging-and-how-to-avoid>. [Kasutatud 17.05.2023].
- [32] Tempo Automation, „The 8 Most Common Electronic Component Failures and How to Avoid Them“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tempoautomation.com/blog/the-8-most-common-electronic-component-failures-and-how-to-avoid-them/>. [Kasutatud 17.05.2023].
- [33] akaneohm, „Resistor Failure Modes“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.akaneohm.com/english/column/resistor-failure-modes/>. [Kasutatud 17.05.2023].
- [34] reddit, „Is the capacitor on the right blown? This was in a amp that isn't working and it was the only thing that looked out of place.“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.reddit.com/r/AskElectronics/comments/oz193g/is_the_capacitor_on_the_right_blownt_this_was_in_a/. [Kasutatud 17.05.2023].
- [35] Biophysics Lab, „Testing Transistor DC Gain (hFE) in My Lab“, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.biophysicslab.com/2021/04/27/testing_transistor_hfe/. [Kasutatud 17.05.2023].
- [36] Stack Exchange, „Identify burned transistor on multi-tool PCB - top marking CM...JA200“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/605545/identify-burned-transistor-on-multi-tool-pcb-top-marking-cm-ja200?rq=1>. [Kasutatud 17.05.2023].

- [37] Stack Exchange, „Help identifying broken TVS or Zener diode,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/593476/help-identifying-broken-tvs-or-zener-diode>. [Kasutatud 17.05.2023].
- [38] GET Electronic, „Water Damage Repair to PCB board,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.getelectronic.net/products/water-damage-repair-to-pcb-board>. [Kasutatud 17.05.2023].
- [39] ASQ, „Eight Disciplines 8D,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://asq.org/quality-resources/eight-disciplines-8d>. [Kasutatud 17.05.2023].
- [40] Enlaps, „All about Ishikawa Diagram,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://enlaps.io/us/guide/ishikawa-diagram.html>. [Kasutatud 27.04.2023].
- [41] ORI, „Module 4: Methods of Information Collection - Section 1,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://ori.hhs.gov/module-4-methods-information-collection-section-1#:~:text=Examples%20of%20information%20collection%20methods%20include%20surveys%2C%20interviews%2C%20tests%2C,for%20research%20participants%20to%20answer>. [Kasutatud 27.04.2023].
- [42] IBM, „What is visual inspection?,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ibm.com/topics/visual-inspection>. [Kasutatud 27.04.2023].
- [43] Researchgate, „Method for Static and Dynamic Resistance Measurements of HV Circuit Breaker,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/249335124_Method_for_Static_and_Dynamic_Resistance_Measurements_of_HV_Circuit_Breaker. [Kasutatud 27.04.2023].
- [44] NTS, „Destructive Physical Analysis,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://nts.com/services/testing/electrical/destructive-physical-analysis/>. [Kasutatud 27.04.2023].
- [45] T4Tutorials, „Report Writing in Research Methodology,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://t4tutorials.com/report-writing-in-research-methodology/>. [Kasutatud 27.04.2023].
- [46] West Coast Compute Recycler, „Recycling Electronic Components,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wcrecycler.com/blog/recycling-electronic-components>. [Kasutatud 27.04.2023].

LISAD

Lisa 1 Koostatud Juhend

Veaanalüüsi mõõtmiste logi mall			
Kuupäev	Autor	Olek	Lehekülg
18/05/2023	Artur Lavrov	Avatud	1 / 4

Mõõtmised enne sagedusmuunduri avamist						
Üldinfo sagedusmuunduri kohta						
Analüüsi kuupäev:						
Ajami seerianumber:						
Juhtpaneeli tüüp:						
Juhtpaneeli triipkood:						
Visuaalne kontroll			JAH	EI		
Mehaaniline kahjustus			<input type="checkbox"/>			
Tolmune			<input type="checkbox"/>			
Purunenud			<input type="checkbox"/>			
Muu saaste (märkida allpool, kui JAH)			<input type="checkbox"/>			
Kommentaar:						
Kommunikatsioon paneeliga			<input type="checkbox"/>			
Tugipakett alla laetud			<input type="checkbox"/>			
Staatilised mõõtmised						
Nr.	Ajam	Positiivne mõõtmisvars	Negatiivne mõõtmisvars	Möödetud väärtus	Korras	Ei ole korras
1	Sisendsilla alumine osa	UDC-	L1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.1		UDC-	L2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.2		UDC-	L3		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Sisendsilla ülemine osa	L1	UDC+		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.1		L2	UDC+		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.2		L3	UDC+		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Väljundsilla alumine osa	UDC-	U		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.1		UDC-	V		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.2		UDC-	W		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Väljundsilla ülemine osa	U	UDC+		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.1		V	UDC+		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.2		W	UDC+		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tulemus, järeldus:						
Visuaalne kontroll näitas, et ajam nägi välja ...						
Staatiliste mõõtmiste käigus jõuti järeldusele, et sisend- ja väljundsild on ...						
Ajami funktsionaalne testimine ...						

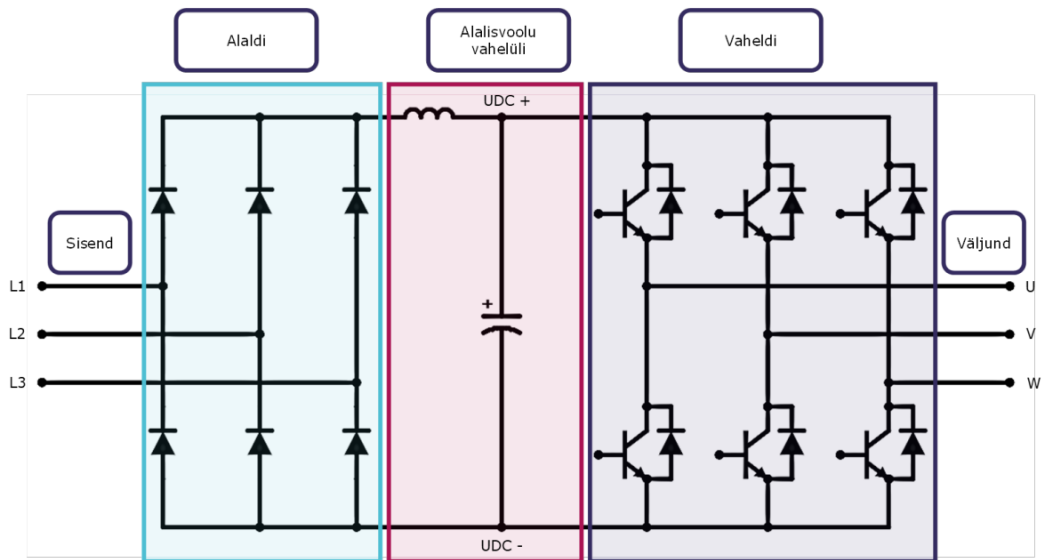
Veeanalüüsi mõõtmiste logi mall			
Kuupäev	Autor	Olek	Lehekülg
18/05/2023	Artur Lavrov	Avatud	2 / 4

Jõuelektroonika moodulite mõõtmised

Multimeetriga diodirežiimis:

~ Kontrollida alumise diodide seisundit sisendsillal ja IGBT-sid väljundsillal (Joonis 1). Asetage positiivne mõõtmisvars UDC - klemmle ja kontrollige negatiivse mõõtmisvarrega iga sisend- ja väljundklemmi.

~ Kontrollige ülemiste diodide seisundit sisendsillal ja IGBT-sid väljundsillal (Joonis1). Asetage negatiivne mõõtmisvars UDC + klemmle ja kontrollige positiivse mõõtmisvarrega iga sisend- ja väljundklemmi.



Joonis 1 Sagedusmuunduri põhimõtteskeem

Veaanalüüsi mõõtmiste logi mall			
Kuupäev	Autor	Olek	Lehekülg
18/05/2023	Artur Lavrov	Avatud	3 / 4

Mõõtmised peale sagedusmuunduri avamist						
Üldine informatsioon						
Abitoiteploki triipkood:						
Visuaalne kontroll						
Visuaalne kontroll			JAH	EI		
Purunenud			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Muu saaste			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Kaarleegi jäljed			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Muud tähelepanekud (märkida allpool, kui JAH)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Kommentaar:						
Staatilised mõõtmised						
Nr.	Abitoiteplokk	Positiivne mõõtmisvars	Negatiivne mõõtmisvars	Möödetud väärtus	Korras	Ei ole korras
1	Sulavkaitse	-	-		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.1	MOSFET	Läte	Pais		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.2		Neel	Pais		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.3		Pais	Läte		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.4		Neel	Läte		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.1	Pulsilaiusmodu- latsiooni kontroller	GND	VCC		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.2		GND	OUT		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.3		OUT	VCC		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ajam on valmis sisselülitamiseks?			Jah <input type="checkbox"/>	Ei <input type="checkbox"/>		
Komponentide tasandi kirjeldus vigaste moodulite/komponentide korral						
Komponent	Asend	Tootja		Seerianumber		

Veaanalüüsi mõõtmiste logi mall			
Kuupäev	Autor	Olek	Lehekülg
18/05/2023	Artur Lavrov	Avatud	4 / 4

Juhtpaneeli mõõtmised						
Visuaalne kontroll		JAH			EI	
Mehaanilised vigastused		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
Põlemisjäljed		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
Muud tähelepanekud (märkida allpool, kui JAH)		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
Kommentaar:						
Staatilised mõõtmised						
Nr.	Komponent	Positiivne mõõtmisvars	Negatiivne mõõtmisvars	Möödetud väärtus	Korras	Ei ole korras
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tulemus, järelendus:						