

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi AAAB, AAVB, AAAM, AAVM ja EAAB
õppekavade lõputöö ülesande vorm
Kinnitatud instituudi nõukogu poolt 15.06.2020

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**KIIRENDATUD ELUEA TEGURI HINDAMINE
SAGEDUSMUUNDURI KOMPONENTIDE TASEMEL**

**EVALUATION OF THE ACCELERATION FACTOR AT THE
LEVEL OF THE FREQUENCY CONVERTER COMPONENTS
BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Oskar Annast

Üliõpilaskood: 179174EAAB

Juhendaja: Anton Rassõlkin, professor

Kaasjuhendaja Sergey Kalashnikov

Tallinn 2022

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Oskar Annast

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kiirendatud eluea teguri hindamine sagedusmuunduri komponentide tasemele“

mille juhendaja on Anton Rassõlkin.

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.

18.05.2022 (*kuupäev*)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Oskar Annast

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Kiirendatud eluea teguri hindamine sagedusmuunduri komponentide tasemel

Kuupäev:
14.05.2022

43 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Anton Rassõlkin, Sergey Kalashnikov

Töö konsultant (konsultandid): Juha Niittynen

Sisu kirjeldus:

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli hinnata sagedusmuunduri erinevate komponentide kiirendatud eluea tegureid. Kiirendatud eluea tegurit on vaja selleks, et hinnata komponentide vananemist testimise käigus. Lisaks taheti teada, kuidas mõjutavad koormuse tüüp ja tsükli kestus kiirendatud eluea tegurit.

Selle uurimiseks kinnitati erinevatele sagedusmuunduri komponentidele termopaarid. Seejärel asetati sagedusmuundur testrisse, kus sellega viidi läbi eelnevalt planeeritud katsed. Kogu testimise käigus salvestati andmeid, millest hiljem sai välja arvutada komponentide kiirendatud eluea tegurid.

Kokkuvõttes kulgesid katsed ja arvutused edukalt ning leiti vastused algselt püstitatud küsimustele.

Märksõnad: kiirendatud eluea testimine, kiirendatud eluea tegur, töökindlus

ABSTRACT

Author: Oskar Annast

Type of the work: Bachelor

Title: Evaluation of the acceleration factor at the level of the frequency converter components

Date: 14.05.2022

43 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Anton Rassõlkin, Sergey Kalashnikov

Consultant(s): Juha Niittynen

Abstract:

Main target of this bachelor thesis was to evaluate acceleration factor of different frequency converter components. Acceleration factor is used to measure fatigue in equipment during testing. Other objective was to examine how different testing parameters, like cycle duration and load type affect acceleration factor.

For testing, thermocouples were attached to different frequency converter components to measure their temperature during testing. After that frequency converter was installed to tester and different tests were run. From the testing data, components acceleration factors were calculated.

In conclusion testing and evaluation of acceleration factors went well, and questions that were proposed were answered.

Keywords: Accelerated lifetime testing, Acceleration factor, reliability

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

| | |
|--|---|
| Lõputöö teema: | Kiirendatud eluea teguri hindamine sagedusmuunduri komponentide tasemel |
| Lõputöö teema inglise keeles: | Evaluation of the acceleration factor at the level of the frequency converter components |
| Üliõpilane: | Oskar Annast, 179174EAAB |
| Eriala: | Mehhatroonika |
| Lõputöö liik: | bakalaureusetöö |
| Lõputöö juhendaja: | Anton Rassõlkin |
| Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt) | Sergey Kalashnikov |
| Lõputöö ülesande kehtivusaeg: (kehtivusaja annab juhendaja) | 2021/2022 Kevad |
| Lõputöö esitamise tähtaeg: | 18.05.2022 |

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Töökindlusel on tähtis osa toote kvaliteedi parendamisel ja säilitamisel. See võimaldab ennendada ja ennustada probleeme toote disainis ja tootmises, enne kui see jõuab kliendini. Üheks töökindluse testimise viisiks on kiirendatud eluea test. Kiirendatud eluea testimise käigus arvutatakse välja toote simuleeritud eluiga ehk kui palju vastab toote tööaeg testimise käigus, toote tööajale tavakasutuses, näiteks 1000h testris võrdub 2 aastaga tavatingimustel. See saavutatakse temperatuuri ja töökoormuse muutumisega. Simuleeritud eluea arvutamiseks kasutatakse kiirendatud eluea tegurit, mille abil saab need aastad välja arvutada. Hetkel kasutatakse tervele sagedusmuundurile ühte kiirendatud eluea tegurit, aga see ei ole täpne, kuna sagedusmuunduris on palju erinevaid komponente, mis iganevad erinevalt vastavalt testimise profiilile. Leides komponentidele eraldi kiirendatud eluea tegurid saab

vastavalt vajadusele igat komponenti eraldi testimise profiili abil koormata, nii saab soovitud tulemuse kiiremini ja täpsemini, näiteks kui tahetakse testida kui töökindel on uus sagedusmuunduri vaheldi, siis teades selle kiirendatud eluea tegurit saan optimeerida testri parameetreid, et koormata vaheldit.

2. Töö eesmärk

Leida erinevatele sagedusmuunduri komponentidele kiirendatud eluea tegur.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Kuidas viia läbi katsed, et leida kiirendatud eluea tegurit?

Milliseid andmeid on vaja, et arvutada kiirendatud eluea tegurit?

Kuidas arvutatakse mõõtmistulemustest kiirendatud eluea tegur?

4. Lähteandmed

Töö alguses viikase läbi katsed ja mõõtmised, mille käigus leitakse vajalikud lähteandmed edaspidiseks arvutamiseks.

5. Uurimismeetodid

Lõputöö tulemuse leidmiseks on vaja alguses läbi viia katsed ja mõõtmised, et saada edasise töö jaoks vajalikud andmed. Mõõtmistele järgneb analüütiline osa, kus andmeid töödeldaks ja tehakse vajalikud arvutused, et leida kiirendatud eluea tegur.

6. Graafiline osa

Lõputöö graafilises osas kasutatakse välja olulisemaid skeeme, jooniseid, tabeleid ja graafikuid.

7. Töö struktuur

Lõputöö ülesanne

- Sisukord
- Eessõna
- Sissejuhatus
- Lõputöö põhiosa:
 - Töökindlus ehk reliability
 - Kiirendatud eluea testimine
 - Kiirendatud eluea tegur kirjeldus
 - Katsetamine ja mõõtmine
 - Andmete analüüs ja arvutused
- Tulemused

- Kokkuvõte
- Kasutatud kirjanduse loetelu

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Kirjanduslike allikatena kasutatakse IEEE Xplore, Researchgate ja Ettevõtte sisesed dokumente.

9. Lõputöö konsultandid

Juha Niittynen- katsete ja mõõtmiste läbi viimine.

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel.

SISUKORD

| | |
|---|----|
| LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| EESSÕNA | 10 |
| Lühendite ja tähiste loetelu | 11 |
| SISSEJUHATUS | 12 |
| 1 Töökindlus ja selle uurimine | 14 |
| 1.1 Töökindlus | 14 |
| 1.2 Kiirendatud eluea testimine..... | 15 |
| 1.3 Temperatuuri valik kiirendatud eluea testimisel | 17 |
| 1.4 Kiirendatud eluea tegur | 18 |
| 1.5 Arrheniuse mudel | 18 |
| 1.6 Coffin-Mansoni mudel..... | 19 |
| 1.7 Vahekokkuvõte..... | 20 |
| 2 Katsed ja mõõtmised..... | 21 |
| 2.1 Eesmärgid | 21 |
| 2.2 Tester | 21 |
| 2.3 Sagedusmuundur..... | 23 |
| 2.4 Andmete salvestamine | 23 |
| 2.5 Termopaar | 26 |
| 2.6 Testimise profiilid | 26 |
| 2.7 Testimise algus ja seadistamine..... | 28 |
| 2.8 Testimisel tekkinud probleemid | 29 |
| 3 Tulemused ja nende analüüs | 31 |
| 3.1 Katse tulemuste esialgne töötlemine | 31 |
| 3.2 Tulemuste analüüs..... | 34 |
| 3.3 Õppetunnid ja tähelepanekud | 38 |
| KOKKUVÕTE | 40 |
| 4 Kasutatud kirjandus | 41 |
| LISAD | 42 |
| LISA 1 Keysight 34972A mõõtevead [11] | 43 |

EESSÕNA

Bakalaureusetöö „Kiirendatud eluea teguri hindamine sagedusmuunduri komponentide tasandil“ on kirjutatud koostöös ühe Eestis tegutseva tehnoloogiaettevõttega. Lõputöö teema sõnastati Sergey Kalashnikovi ja Juha Niittynen algatusel, kes olid selle uurimuse põhilised planeerijad ja läbiviijad. Uuringud viidi läbi ettevõtte tehases.

Autor soovib tänada järgmisi isikuid, kes nõu ja jõuga aitasid kaasa selle bakalaureusetöö valmimisele: TalTech'i professorit Anton Rassõlkin, Sergey Kalashnikov, Juha Niittynen, Risto Rosin, Ardi Soosalu ning teisi kolleege, kes nõu ja jõuga aitasid kaasa selle bakalaureusetöö valmimisele.

Lühendite ja tähiste loetelu

AF – Kiirendatud eluea tegur (ingl k *Acceleration Factor*)

ALT – Kiirendatud eluea test (ingl k *Accelerated Lifetime testing*)

HALT- Väga kiirendatud eluea test (ingl k *Highly accelerated life test*)

IGBT - Isoleeritud paisuga bipolaartransistor (ingl k *Insulated-gate bipolar transistor*)

DT- Developers tool, tarkvara nimi

DC – Alalisvool (ingl k *Direct current*)

SISSEJUHATUS

Toote töökindluse ja kvaliteedi tagamine on väga olulised tänapäeva konkurentsitihedal turul. Toote kvaliteet ja töökindlus on klientide poolt väga hinnatud. Selleks, et konkurentidega sammu pidada ja võita uusi kliente, tuleb pidevalt oma tooteid parendada. Töökindluse tagamise üheks meetodiks on toodete testimine. Toodete testimine ettevõttes võimaldab ennetada ning leida vigu ja puudujääke nii toote disainis, tööpõhimõttes, tootmises kui ka komponentides enne kui need jõuavad kliendini. Kui testimise käigus selgub, et kindlal tootel esineb pidevalt sama tüüpi viga, siis saab toodet parandada disaini muutes või komponenti vahetades. Testimisprotsessi pidevalt korrates saab järjest elimineerida toote puudujääke ja seeläbi pikendada toote töökindlust.

Üheks seadmete testimise meetodiks on kiirendatud eluea test. Kiirendatud eluea testi käigus töötab toode raskemates tingimustes kui tavakasutuses, et kiirendada selle vananemist. Kiirendatud eluea testimise käigus arvutatakse välja toote kiirendatud eluea tegur, mis näitab, kui palju vastab toote tööaeg testimise käigus toote tööajale tavakasutuses. Praeguse praktika järgi käsitletakse ettevõttes sagedusmuundurit ühe objektina, seega leitakse tervele seadmele ainult üks kiirendatud eluea tegur. See annab hea ülevaate seadme üldisest vananemisest, aga komponendi tasemel ei ole kõige täpsem. Sagedusmuundur koosneb paljudest erinevatest komponentidest, mis vananevad vastavalt temperatuurile erinevalt. Leides komponentidele eraldi kiirendatud eluea tegurid, saab soovitud tulemuse kiiremini ja täpsemini. Näiteks kui tahetakse testida uue sagedusmuunduri vaheldi töökindlust, siis teades selle kiirendatud eluea tegurit, saab optimeerida testimise parameetreid nii, et kiirendatud eluea tegur oleks suurim.

Bakalaureusetöö on osa suuremast ettevõttes läbi viidud uuringust, mille käigus määratakse 21 erineva sagedusmuunduri komponendi kiirendatud eluea tegur. Käesolevas bakalaureuse töös näidatakse tulemusi ja analüüsi ainult ühe komponendi kohta. Sellepärast, et kaitsta ettevõtte äri huvisid. Töös antakse ülevaade kogu protsessist alates katsetustes ja lõpetades andmete analüüsiga.

Lõputöö on jaotatud kolme suuremasse peatükki. Esimene peatükk keskendub töö teoreetilisele poolele - antakse ülevaade töökindlusest ja selle uurimisega seotud terminitest ja meetoditest. Teise peatükiga hakkab töö praktiline osa, kus vaadeldakse testimise ning andmete kogumise käiku. Kirjeldatakse, kuidas, kus ja millega katsed

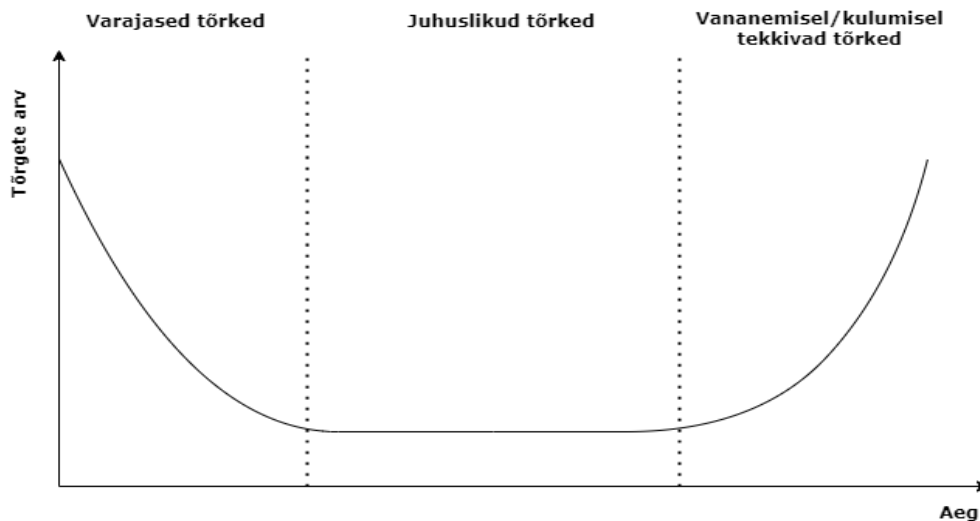
läbi viidi. Kolmas peatükk kirjeldab katsetamisel saadud andmete analüüsi ja lõplikuid testimise tulemusi.

Bakalaureusetöös kasutati järgnevaid arvutitarkvarasid: MS Excelit kasutati andmete töötlemiseks ja arvutuste tegemiseks. Illustratiivsete graafikute tegemiseks kasutati veebilehte Draw.io. Lisaks kasutati katsetamise käigus veel Keysight Benchlink Data Logger 3 termopaari temperatuuride salvestamiseks, DT sagedusmuunduri andmete salvestamiseks ja Drive Composerit mille kaudu saab sagedusmuunduri parameetreid ja limiite muuta.

1 Töökindlus ja selle uurimine

1.1 Töökindlus

Tooted ja selle osad hakkavad kasutamisel erinevatel põhjustel paratamatult kuluma. Seetõttu hakkab toote töövõime kvaliteet aja jooksul alanema. Kulumise kiirus sõltub mitmetest erinevatest teguritest, näiteks keskkond, inimfaktor, töökoormus jne. Mida aeg edasi, seda rohkem hakkab esinema tõrkeid töös, mis võib lõpuks viia mittetöötamiseni. Töökindlus näitab, kuidas toode suudab teatud tingimustel ja teatud aja jooksul täita talle ettenähtuid ülesandeid [1]. Kohati defineeritakse töökindlust tõrgete arvu järgi teatud aja jooksul.



Joonis 1. Tõrgete esinemine toote eluea jooksul

Seadme eluea jooksul esinevate tõrgete jaotust iseloomustatakse tihti „vanni kõvera“ abil (Joonis 1), see nimi on tuletatud graafiku kõverale iseloomulikust kujust. Seal liigitatakse tõrkeid kolme kategooriasse, vastavalt nende toimumise ajale toote elueas. Esimeses kategoorias on varajased tõrked. Seadme eluea alguses on tõrke tõenäosus suurem, mis on tihti põhjustatud tootmis- ja disainivigadest või defektsetest komponentidest. Aja möödudes hakkab tõrgete arv vähenema ja seade jõuab normaalsesse talitlusse, kus tõrgete eeldatav arv on konstantne ja püsib madalal. Vead on suures osas juhuslikud. Toote elu kolmandas ehk viimases etapis hakkavad tõrked sagenema, see on põhjustatud komponentide kulumisest, mis kaasneb toote vananemisega [2]. Üles hakkavad ütlema nõrgimad ja kõige kõrgema koormuse all olevad komponendid.

1.2 Kiirendatud eluea testimine

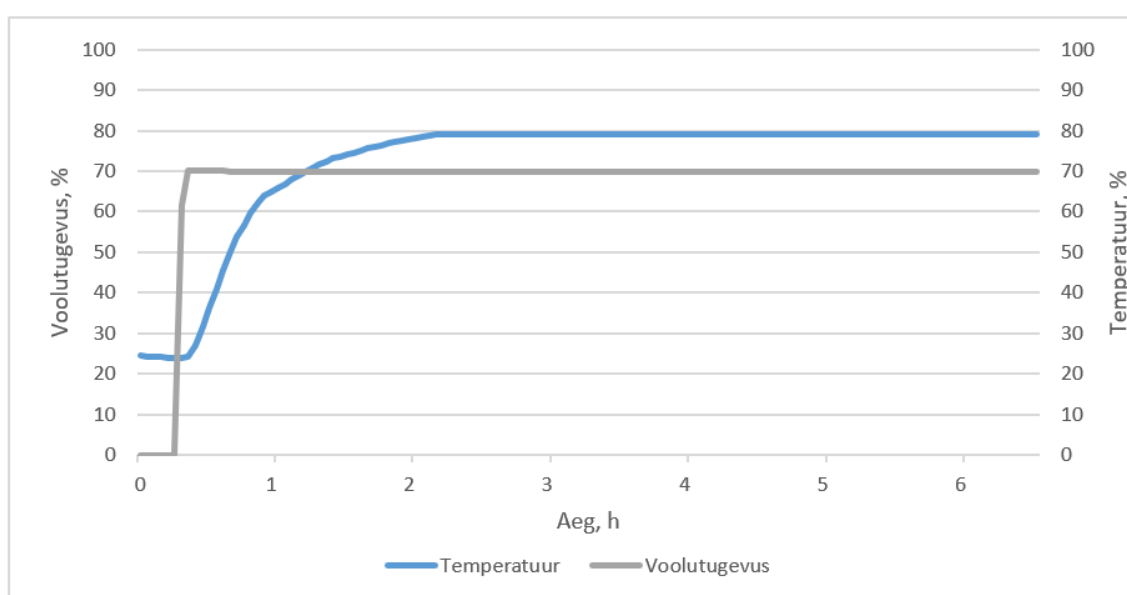
Seadme eluea testimine tavatingimustes annab kõige täpsemad tulemused, kuid ei ole efektiivne, kuna eluiga võib kohati olla väga pikk. Paljude sagedusmuundurite tootjate poolt määratud eluiga võib ulatuda mitmete aastateni. Seega oleks testimine kulukas nii rahaliselt kui ka ajaliselt ning lisaks nii pika aja peale muutuvad tulemused asjakohatuteks, kuna toodet on juba selle aja jooksul uuendatud. Toote kiiremaks katsetamiseks kasutatakse kiirendatud eluea testimist, mille käigus kiirendatakse eelnevas peatükis kirjeldatud toote elu ning saavutatakse sama vananemine, mis tavalise testimisega, oluliselt lühema aja jooksul [2]. Kiirendatud eluiga saavutatakse sellega, et toodet pannaks tööle ekstreemsemates tingimustes kui tavaliselt, näiteks niiskuse, vibratsiooni, temperatuuriga. Tänu sellele saab testi pikkust vähendada aastatelt kõigest mõnele kuule [3].

Eelnevas peatükis mainitud „vanni kõver“ näitab, et paljud tõrked tulevad kohe alguses ja on peamiselt tootmise ja disainiga. Paljud need vead on võimalik lihtsamate testimisete käigus kindlaks teha. Toote eluea lõpus esinevaid vigu on raskem leida. Kiirendatud eluea testimise eeliseks ongi see, et selle abil saab lühikese ajaga kaardistada vigu ja probleeme, mis tekivad toote eluea lõpus [2]. On võimalik kindlaks teha, milline komponent seadmes lõpetab kõige varem töötamise, millised probleemid tekivad seadmes töös, kuidas seadme efektiivsus väheneb jne.

Lisaks on kiirendatud eluea test kasulik kolmanda osapoole komponentide kasutuse võtmisel. Eriti aktuaalne on see praegusel ajal, kus paljud tarneahelad on katkenud ja tuleb kiiresti leida alternatiivseid variante. Uue komponendi asendamine seadmesse on riskantne, kuna ei teata kuidas see käitub seadmes pika aja jooksul. Ilma põhjaliku katsetamiseta on uue komponendiga seadme müüki paiskamine väga riskantne. Kiirendatud eluea testimise abil saab kindlaks määrata, kas alternatiivne komponent sobib asenduseks või mitte.

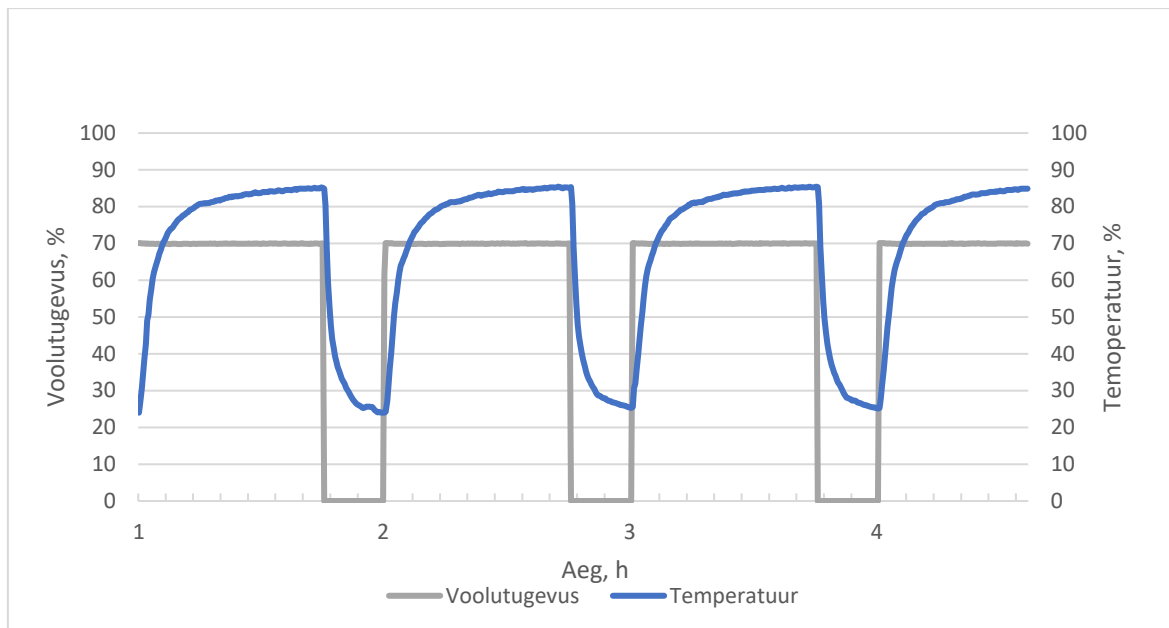
Elektriseadmete puhul on levinud termiline ja elektriline koormamine. Testimise käigus töötab testitav seade oluliselt kõrgemal või madalamal temperatuuril kui tavakasutuses. Temperatuur mõjutab elektroonika tööd, muutes näiteks materjalide elektrilisi omadusi. Teine oluline osa on soojuspaisumine. Elektroonika komponendid koosnevad tihti paljudest erinevatest materjalidest, mille soojuspaisuvused erinevad teineteisest. Pikapeale hakkavad kõrged temperatuurid materjale väsitama, pidevad temperatuurimuutused tekitavad mõrasid materjalide vahel ja materjalis endas. Käesolevas uurimistöös koormati seadmeid elektriliselt ja termiliselt.

Temperatuuri ja elektriga saab testida kahel erineval viisil: konstantse ja tsüklilise profiiliga. Konstantsel koormamisel hoitakse temperatuuri testris ühtlasena kogu testi vältel, kuid temperatuur on kõrgem kui tavatingimustes. Elektrilist koormamist saab teha kahte moodi. Esiteks, et koormus püsib koguaeg konstantne, teisele juhul koormus on tsükliline ehk seade töötab ja ei tööta kindla intervalliga (Joonis 2). Ettevõttes, kus uurimus läbi viidi on kasutusel mõlemad variandid. Tsüklilisel koormamisel temperatuur ja töökoormus kõigub tsükliliselt eelnevalt määratud intervalliga (Joonis 3), näiteks testkambri temperatuur kõigub 40 C° ja 120 C° vahel. Testimise profiil valitakse vastavalt sellele, mida tahetakse koormata, kuna komponentide vananemine ja tekkivate tõrgete olemused sõltuvad sellest, kuidas neid koormata.



Joonis 2. Sagedusmuunduri konstantse termiline ja elektriline koormamine kiirendatud eluea testis. Testimise algus

Testimise eesmärk tuleb ära määratleda testimise alguses ning tuleb selgeks teha, mida tahetakse selle testi tulemusel saavutada. Kui tahetakse leida nõrgimat lüli tootes, lastakse testil käia kuni esimese tõrkeni, kui aga tahetakse kinnitada toote töökindlust ja eluiga teatud periood jooksul, siis lepatakse testi kestvus eelnevalt kokku. Sel juhul jälgitakse, kas seade täidab talle ettenähtud ülesandeid eelnevalt kokkulepitud ajajooksul.



Joonis 3 Sagedusmuunduri tsükliline temperatuuriga koormamine kiirendatud eluea testis

1.3 Temperatuuri valik kiirendatud eluea testimisel

Testimise temperatuuri valik peab olema läbi mõeldud. Mida suurem on temperatuuri muutus, seda suurem on ka kiirendatud eluea tegur. Mida suurem on kiirendatud eluea tegur, seda kiiremini saab testi läbi viia. Probleem peitub selles, et kui valida liiga kõrge temperatuur, lõhub see lihtsalt testitava seadme ära [3]. Kiirendatud eluea testimisel ette tulevad tõrked ja defektid peavad olema samasugused, mis tulevad esile kliendi juures ehk tavakasutuses. See on oluline, et testimise tulemused oleks arvestatavad. Kui testimise käigus tekivad täiesti teistsugused vead kui tavakasutuses, siis tähendab, et testimise profiil ja temperatuur on vale. Sellise tulemustest ei ole abi, kuna need ei lähe kokku reaalsete probleemidega tootes. Valesti läbi viidud tagajärjel võidakse hakata tegelema probleemide lahendamisega, mida tegelikult ei olegi. Eraldi on kiirendatud eluea testi üheks liigiks veel väga kiirendatud eluea test ehk HALT [3]. HALT-tüüpi testimise käigus proovitakse määratleda seadme töötamise limiidid, seega pannakse seade teade tööle tingimustel, mis on üle tootja poolsete limiitide. Ning jälgitakse, kuidas seade funktsioneerib ekstreemsetes tingimustes. Sellise testimise abil saab vastuse küsimustele, mis on kõrgeim või madalaim temperatuur, kus toode suudab täita ettenähtuid ülesandeid.

1.4 Kiirendatud eluea tegur

Kiirendatud eluea testimise käigus saadud tulemused tuleb ümber teisendada tavatingimustele. Teisendamine on vajalik, et mõista, kui palju toode on realselt vananenud testimise käigus. Kui öelda, et tootel tekkis esimene tõrge pärast 2000h testimist, tekib küsimus, kas see on toote kohta hea või halb tulemus. Vastavaid mõõtmisi ja arvutusi tehes saab välja arvutada, et 2000h testris vastab tavatingimustes 5 aastale. Seda tulemust saab võrrelda tootja poolt lubatud toote eeldatava elueaga ning otsustada, kas testimine on edukalt läbitud või mitte. Selle teisenduse tegemiseks kasutatakse kiirendatud eluea tegurit, mis näitab testimise aja ja tavakasutuse aja vahelist suhet [4].

Mudeleid kiirendatud eluea tegurite uurimiseks on mitmeid ning mudeleid tuleb valida vastavalt testimise profiilile, tootele, vea mehhanismile [1]. Käesolevas uurimistöös keskendutakse kahele kiirendatud eluea teguri mudelile: Arrheniuse ja Coffin-Manson [5].

1.5 Arrheniuse mudel

Üks kõige levinum kiirendatud eluea mudel on Arrhenius, mis on tuletatud samanimelisest võrrandist ja mis seob keemilised protsessid temperatuuriga [1]. Võrrandil on mitmeid kasutusalasid, kuid tihti kasutatakse seda kiirendatud eluea teguri hindamisel elektroonikas konstantse temperatuuriga testimisel. Arrheniuse mudeli abil saab eelkõige uurida vigu, mis on põhjustatud keemilistest protsessidest, näiteks elektromigratsioon ja korrosioon [4]. Arrheniuse võrrandis arvestatakse absoluutset temperatuuri.

$$AF_{Arrhenius} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{tava}} - \frac{1}{T_{test}} \right)} \quad (1.1)$$

kus T_{test} - absoluutne temperatuur testimise käigus, K

T_{tava} - absoluutne temperatuur tavakasutusel, K

k - Boltzmanni konstant, 8.617×10^{-5} , eV/k

E_a - aktivatsioonienergia, eV

Aktivatsioonienergia defineeritakse, kui minimaalset energiahulka mida on vaja keemilise reaktsiooni esile kutsumiseks [6]. Arrheniuse võrrandis valitakse selle väärtus vastavalt vea tekkimise põhjustele. Ideaalis peaks iga tõrke puhul alustuseks leidma tõrke tekkimise põhjuse ning sellele põhjusele leidma vastava aktivatsioonienergia ning alles siis saab arvutada toote kiirendatud eluiga [6]. See annaks kõige täpsema tulemuse näiteks, kui vea analüüsi põhjal leitakse, et viga tekkis rooste tõttu, siis on teade, et aktivatsiooni energia jääb vahemikku 0,3-1,1 eV ning selle põhjal saaks leida kiirendatud eluea teguri [6]. Praktikas on seda raske alati nii teha, kuna protsess on töömahukas ja võtab palju aega. Lisaks tuleb vahel testimise käigus jooksvalt jälgida toote vananemist. Seetõttu kasutatakse tihti üldist väärtust, mis seostub kõige tihedamini esineva veaga.

1.6 Coffin-Mansoni mudel

Tsükliilisel testimisprofiilil kasutatakse Coffin-Mansoni mudelit. Tsükliilisel testimisel temperatuur muutub, see tähendab, et testitav seade pidevalt kuumeneb ja jahtub. Pidev kuumenemine ja jahtumine väsitab materjale ja materjalis tekivad praod, mis võivad viia erinevate vigadeni seadme töös. Coffin-Mansoni mudelit kasutatakse edukalt jootmiskohtade ja muude materjalide vananemise arvutamisel [1] [7]. Coffin-Mansoni mudeli üheks puuduseks on see, et ei arvestata temperatuuri kõikumise maksimum- ja miinimumväärtuseid, vaid ainult nende vahelist muutumist. Seega annavad näiteks kõikumine 20 C° ja 50 C° ja 80 C° ja 110 C° täpselt samasuguse arvutamistulemuse, sest mõlemal juhul on temperatuuri muutus 30 C°. Seetõttu tuleb olla hoolikas maksimum ja miinimum temperatuuride valikul.

$$AF_{Coffin-Manson} = \left(\frac{\Delta T_{test}}{\Delta T_{tava}} \right)^m \quad (1.2)$$

kus ΔT_{test} - temperatuuri muutus testimise jooksul, C°

ΔT_{tava} - temperatuur muutus tavakasutusel, C°

m – vananemis konstant

1.7 Vahekokkuvõte

Kiirendatud eluea teguri arvutamiseks on mitmeid teistsuguseid mudeleid. Mudeli valik sõltub, milliseid tegureid kasutatakse koormamiseks, niiskus, vibratsioon, temperatuur või kombinatsiooni nendest. Eelnevates peatükkides mainitud kiirendatud eluea teguri mudelid võtavad arvesse ainult temperatuure. See tuleneb sellest, et ettevõttes, kus uurimus läbi viidi, kasutatakse termilist koormamist ning seega oli vaja mudeleid, mis arvestaksid vaid temperatuuri ja selle muutuseid. Ettevõttes on kiirendatud eluea teste juba päris kaua aega läbi viidud ja kogemus on näidanud, et Arrheniuse ja Coffin-Mansoni mudelite kasutamine kiirendatud eluea tegurid arvutamisel annavad häid ja täpseid tulemusi. Seega, kuna neid mudeleid kasutatakse ettevõttes igapäevaselt, kasutatakse neid ka käesolevas uurimistöös. [8]

2 Katsed ja mõõtmised

2.1 Eesmärgid

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on määrata sagedusmuunduri komponentide kiirendatud eluea tegurid. Siiani on käsitletud kiirendatud eluea arvutamisel tervet sagedusmuundurit ühtse objektina. See ei ole väga täpne lähenemine, kuna sagedusmuundur koosneb paljudest erinevatest komponentidest, mis vananevad erinevalt. Käesolevas töös uuritakse komponentide vananemist temperatuuri mõjul. Soojus jaguneb sagedusmuunduri sees erinevalt. Peamiselt oleneb see asukohast ja komponendi enda olemusest. Kuna komponente on sagedusmuunduris on palju, siis valiti välja 21 komponenti.

Lisaks komponentide kiirendatud eluea teguri leidmisele taheti uurimuse kaudu ka leida, kuidas mõjutavad teistsugused faktorid kiirendatud eluea tegurit. Esitaks taheti teada, kuidas mõjutab ühe tsükli kestus kiirendatud eluea tegurit. Teoreetiliselt saab oletada, et mida pikem tsükkel, seda suurem on komponentide kiirendatud eluea tegur. Selletõttu, et mida kauem kestab sagedusmuunduri aktiivne etapp, seda rohkem on aega komponentidel soeneda. Komponentide enda soojenemine elektrivoolu tagajärjel on suurem, seetõttu on suurem ka suurem ΔT_{test} . Aga pole täpselt teada, kui suure erinevuse see teeb. See tõttu valiti testimise planeerimisel erinevad tsükli kestused (Tabel 2). Teiseks tahetakse uurida, kuidas mõjutab kiirendatud eluea tegurit see, kas koormuseks on drossel või mootor. Igapäevases testimises kasutatakse mõlemat. Ettevõtte kogemusest on teada, et drossel ja mootor koormavad sagedusmuundurit erinevalt. Selle uurimiseks viidi kõik erinevad tsüklid läbi nii drosseliga kui ka mootoriga, et tulemusi saaks hiljem omavahel võrrelda.

2.2 Tester

Testrit, kus katsed läbi viidi, kutsutakse Daytona 2. Igapäevaselt kasutataksegi seda erinevate sagedusmuundurite kiirendatud eluea testimise läbi viimiseks. Samaaegselt on võimalik testida 16 erinevat seadet. Tester ise asub ümber ehitatud merekonteineris. Testri sees asuvad eraldi testimiskambrid, kus katsealuseid seadmeid testitakse. Sagedusmuunduri väljundisse on võimalik ühendada tarbijaks kas drossel või mootor. Sagedusmuunduri kiirendatud eluea testimisel annaks kõige täpsema tulemuse mootori kasutamine, kuna see simuleeriks kõige täpsemini kasutust tavatingimustes. Mootori kasutamise negatiivseks pooleks on selle maksumus, suurus ja hooldamine. Mootor

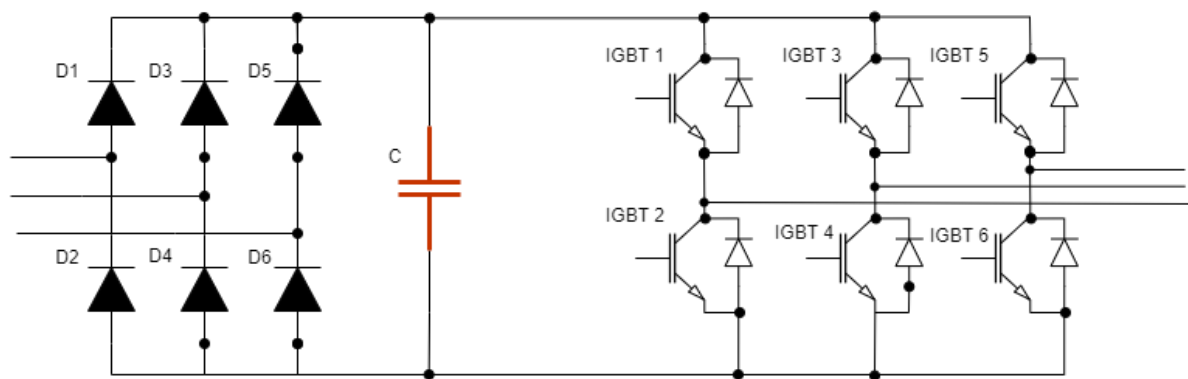
nõuab olulisemalt rohkem tööd ning seetõttu kasutatakse palju testimisel drosseleid, kuna need on töökindlamad, kompaktsemad ja odavamad.



Daytona 2 koormatakse sagedusmuundureid elektriliselt ja termiliselt. Kogu testimise aja seadmed käivad vastavalt eelnevalt kokkulepitud koormusele enamasti 70% nominaal väljundvoolust. Samal ajal toimub ka termiline koormamine. Eelnevalt lepitakse kokku, kas termiline koormamine on konstantse või tsüklilise temperatuuriga. Samuti määratakse piirväärtused nagu maksimaalne ja minimaalne temperatuur. Kõik seadmed asuvad isoleeritud kambris, kuhu on suunatud ventilatsioon, mis vastavalt vajadusele kuumutab või jahutab testkappe, et saavutada ette nähtud temperatuur. Testri ja sagedusmuundurite tööd juhitakse PLC abil. Testris on veel arvuti, kus hallatakse SQL serverit ja graafilist liidest, mille kaudu saab juhtida PLC-d. Testimise ajal sagedusmuunduritelt loetavad andmed laetakse ülesse SQL serverisse.

2.3 Sagedusmuundur

Sagedusmuundur on seade, mis võimaldab muuta vahelduvvoolu sagedust ning seda kasutatakse elektriaparaatide, näiteks asünkroonmootori töö juhtimiseks. Sagedusmuunduri ehitusi on erinevaid, kuid enim levinud on alalisvoolu vahelüliga sagedusmuundur. See koosneb kolmest suuremast osast: alaldi, alalisvoolu vahelüli ja vaheldi. Alaldisse tuleb võrgust vahelduvvool mis muundatakse alalisvooluks. Alalisvoolu vahelülis olevad alalisvoolu kondensaatorid aitavad pinget siluda. Vaheldis muundatakse alalisvool tagasi vahelduvvooluks, mille sagedus väärtus on vastavalt sellele mida on vaja. [9]



Joonis 4 Sagedusmuunduri lihtsustatud skeem. Uuritav komponent on märgistatud punase värviga

Nagu sissejuhatuses mainitud, tahetakse leida 21 erineva komponenti. Käesolevas uurimistöös näidatakse ainult kahe komponendi tulemusi. See on peamiselt selleks, et mitte avaldada liiga palju ettevõtte jaoks olulisi uurimise tulemusi. Samal ajal annavad kaks komponenti piisava ülevaate meetodikast ja tulemustest.

Käesolevas töös tuuakse tulemused kahe elektrolüüt-kondensaatori kohta. Need asuvad eelnevas lõigus nimetatud alalisvoolu vahelülis. Uurides elektrolüüt-kondensaatorite vananemise kohast kirjandust, tuleb välja, et nende kiirendatud eluea teguri arvutamisel kasutatakse kõige enam Arrheniuse mudelit. [10]

2.4 Andmete salvestamine

Tavaliselt testimise käigus ei salvestata temperatuure nii paljudelt komponentidelt. Enamik parameetreid (väljund voolutugevus, väljund sagedus, alalispinge jne.) salvestatakse sagedusmuunduri enda tarkvara kaudu. Seega pidi uurimise jaoks sagedusmuunduri erinevate komponentide temperatuuri mõõtmiseks neile kinnitama termopaarid.

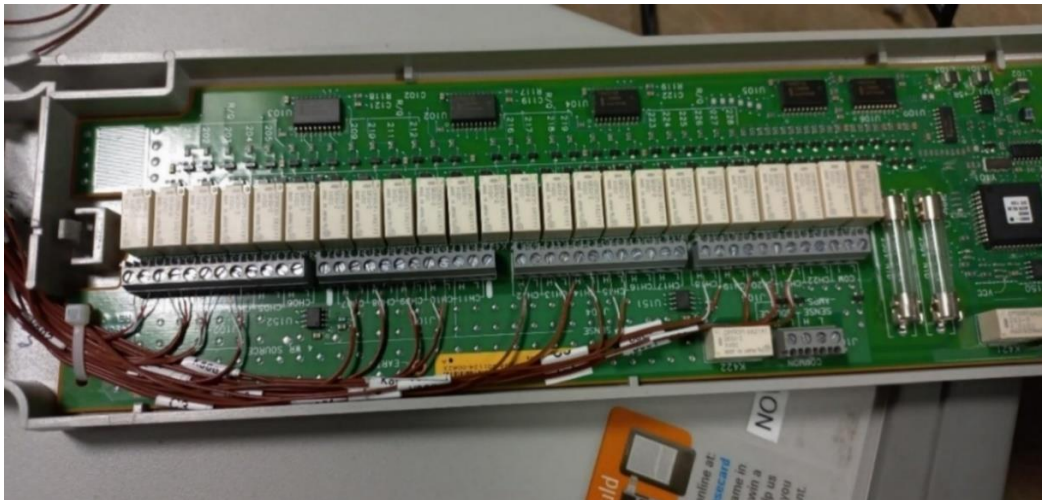
Termopaaridelt saadud andmed salvestati Keysight 34972A Data Acquisition Tooli abil. Temperatuuride salvestamiseks oli vaja seadet, millel on palju sisendeid, kuna korraga oli vaja mõõta ligi 50 termopaari mõõtmistulemusi. Kasuks tuleks mugav kasutajaliides, et saaks kõiki kanaleid seadistada vastavalt vajadusele. Seetõttu otsustati Keysight 34972A Data Acquisition Tooli kasuks, kuna see täitis eelnevad tingimused. Mõõteseadme resolutsiooniks on 6 1/2 [11]. 34972A kasuks rääkis ka see, et see oli ettevõttes kohapeal olemas ja on seal igapäevases kasutuses ehk selle kasutamise kogemus on juba olemas. Seadme mõõtevead temperatuuri mõõtmisel on välja toodud Lisa 1.



Pilt 1 Keysight 34972A Data Acquisition Tooli

Seadmes on kolm lahtrit, kuhu saab panna multipleksereid. Multiplekseriks kasutati 34972A. Igal multiplekseril on 20 kanalit, seega saab seade samaaegselt mõõta 60 erinevat väärtust igas sekundis. Seade võimaldab kahe ja nelja juhtmega mõõtmist. Lisaks on seadmes olemas külmjootekoha temperatuuriparand [11]. Seadistamine toimub läbi tarkvara Keysight Benchlink Data Logger 3, kus tuleb iga kanal eraldi seadistada ja määrata ajaline intervall, mille järel andmed salvestatakse. Käesoleva katse käigus määrati andmete salvestamise intervalliks 3 sekundit. Leiti, et see on piisav intervall, kus ei salvestata üleliigseid andmeid ja samas on andmed piisavalt täpsed. Kasutaja jaoks on seade väga mugav, kuna see teisendab automaatselt termopaarilt loetud pinge kraadideks.

Data Acquisition Tool on ühendatud läbi LAN kaabli arvutisse, kus andmed salvestatakse .csv faili formaati. Iga testimise andmed salvestati eraldi faili, mida saab Exceli tarkvara kaudu avada ja töödelda.



Pilt 2 Multiplekser ja ühendatud termopaarid

Sagedusmuundur ise jälgib ka teatud parameetreid, nende salvestamiseks tuli ühendada sagedusmuundur arvutiga. Andmete salvestamiseks kasutati tarkvara DT ehk Developers tool. Kiirendatud eluea teguri arvutamiseks otseselt neid parameetreid ei olnud vaja salvestada, aga neid salvestati selle jaoks, et jälgida seadme tööd ja kontrollida, et kõik töötab nagu ette nähtud. Lisaks tulevad need kasuks veaanalüüsidel, et teada saada, kuidas moodul käitus enne viga. DT kaudu salvestatavad parameetrid on näha Tabel 2. Neid parameetreid salvestati iga 1 sekundi tagant.

Tabel 1 DT kaudu salvestatavad parameetrid

| Parameeter | Ühik |
|-------------------------------|-------|
| Mootori kiirus | RPM |
| Mootori voolutugevus | A |
| Mootori moment | % |
| Väljundvõimsus | kW |
| Vaheldi temperatuur | % |
| <i>Main status word</i> | 16bit |
| <i>Limit word</i> | 16bit |
| Lülitamissagedus | kHz |
| Ventilaatori pöörlemiskiirus | RPM |
| Ventilaatori referentsväärtus | % |
| Ümbritsev temperatuur | C° |
| DC lüli pinge | V |
| Väljundsagedus | Hz |
| Juhtrükkplaadi temperatuur | C° |

2.5 Termopaar

Temperatuuride mõõtmisel on levinud vahendiks termopaarid. Termopaar koosneb kahest erinevast metallist, mis on ühest otsast kokku ühendatud. Ühenduskoha soojendamisel tekib metallide vabadesse otstesse elektripinge. Seda nähtust nimetatakse Seebecki efektiks. Termopaare on mitmeid erinevaid tüüpe, need on toodud välja Tabelis 2. Peamiselt erinevad need neis kasutatavate metallide poolest.

Tabel 2 Termopaaride tüübid ja nende omadused. [5]

| Tüüp | Termiliste elektrootodide materjal | Töötemperatuuri vahemik, C |
|--------|--|----------------------------|
| T | vask – konstantaan (vase ja nikli sulam) | -200...370 |
| J | raud – konstantaan | 0...760 |
| E | kromell (nikli ja kroomi sulam) – konstantaan | -200...900 |
| K | kromell – alumell (nikli, mangaani, alumiiniumi ja räni sulam) | -200...1260 |
| R ja S | plaatina ja roodiumi sulam – plaatina | 0...1480 |
| B | plaatina-roodiumi sulam (30%) – plaatina-roodiumi sulam (6%) | 870...1700 |

Termopaarid sobisid hästi nende katsete läbi viimiseks. Termopaar ise on väga väike ja katsealustes sagedusmuundurite sees ei ole palju vaba ruumi ning osad komponendid on väga väiksed. Seega oli termopaare sinna väga lihtne kinnitada. Käesolevas uurimustöö kasutati J-tüüpi termopaari. See valiti, sest J-tüüpi mõõtmisvahemik kattus testimise käigus olevate temperatuuridega. Nagu Tabelist 2 on näha, oli J-tüüpi termopaari töötemperatuuri vahemik on päris suur. Lisaks mängisid rolli praktilised kaalutlused, nimelt oli J-tüüpi termopaarid tehases kohe olemas. Vaadates termopaaride täpsust 34972A spetsifikatsioonist (Lisa 1) näeb, et selle seadmega mõõtmisel on J-tüüpi termopaari mõõteviga ± 1 °C. Kasutatud termopaaride enda mõõteviga on andmelehe järgi ± 1.1 °C [12].

2.6 Testimise profiilid

Eelnevalt lepiti kokku erinevad katsed, mis uurimuse käigus läbi viiakse. Tavaline testimise ühe tsükli pikkus on üks tund. Selle saab jagada kolmeks etapiks. Esimene etapp on töötamise etapp. See on aktiivne faas, kus alguses soojendatakse testimiskamber maksimaalse määratud temperatuurini ja samal ajal sagedusmuundur moduleerib ettenähtud koormusel. Teise etapi käigu hakatakse kappi jahutama ja

sagedusmuundur lõpetab moduleerimise, kuid seade on endiselt sisselülitatud. Kolmanda ja viimase etapi käigus lülitatakse toide seadmelt välja ja see lihtsalt seisab. Seejärel lülitatakse toide jälle sisse ja kogu tsükkel hakkab otsast peale.

Tabel 3 Erinevate katsete parameetrid [10]

| Testi nr. | Temperatuur | Ühe tsükli kestus, h | Esimese etapi kestus, min | Teise etapi kestus, min | Kolmanda etapi kestus, min | Voolutugevus nominaalvoolust |
|-----------|-------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | konstantne | 1 | 45 | 10 | 5 | 70% |
| 2 | konstantne | 1 | 45 | 10 | 5 | 100% |
| 3 | tsükliiline | 1 | 45 | 10 | 5 | 70% |
| 4 | tsükliiline | 2 | 105 | 10 | 5 | 70% |
| 5 | tsükliiline | 4 | 225 | 10 | 5 | 70% |

Ikka katse käigus tehti neli tsükli, välja arvatud katse nr 1 ja nr 2 ajal, sest see oli konstantse temperatuuriga. Seega olid katse kogupikkused järgnevad: katse nr 2 oli 4 tundi, katse nr. 3 oli 8 tundi ja katse nr. 4 oli 16 tundi.

Test nr 1 on referentskatse. Selle parameetrid ja tingimused on võimalikult lähedased tavakasutuste tingimustele. Tavatingimused on leitud klientidelt saadud ja vaadeldud info põhjal. Test nr 1 käigus saadaksegi valemities 1.1 ja 1.2 kasutatavad ΔT_{tava} ja T_{tava} väärtused.

Sagedusmuunduri nominaalse väljundvoolu katsetamine oleks kõige kasulik, kuna siis oleks kiirendatud eluea tegur suurem, sest komponendid ise soojenevad rohkem elektrivoolu tõttu. Tootja poolt on ette seatud piirangud. Paljudel toodetel on limiidid ära toodud andmelehel, stiilis, et iga 1 °C kohta, kus seadme ümbruse temperatuur on üle teatud limiidi tuleb vähendada seadme koormust 1% võrra. Vastasel juhul ei ole garanteeritud masina töötamine. Sellepärast viiakse termilised kiirendatud eluea testimised läbi väiksema nominaal väljundvooluga või siis tuleb testimise maksimaalne temperatuur madalamaks viia. Antud uurimuses viidi katsed läbi 70% nominaalvoolust.

2.7 Testimise algus ja seadistamine

Katsed viidi läbi kolme nädala jooksul veebruari lõpus 2022. aastal. Uurimust planeeriti ja koordineeriti Soome tehases ning uuritavad sagedusmuundurid on toodetud Soomes, siis saadeti sagedusmuundurid ja osa vajalikku varustust Eestisse paar nädalat enne testimise algust. Termopaarid kinnitati komponentidele juba Soome tehases ühe inseneri poolt. Ettevõttes on olemas dokument, mis kirjeldab kuidas komponentidele peaks termopaare kinnitada. Soome tehases tuli uurimuse peamine korraldaja ise 14. veebruaril. Kokku testiti nelja sagedusmuundurit ehk kahte paari. Ühes paarid olevad sagedusmuundurid olid identsed, kuid paarid omavahel erinesid võimsuse ja füüsilise suuruse poolest. See oli selle jaoks, et näha, kas uurimuses leitud tulemusi saab erinevate võimustega sagedusmuundurite vahel üle kanda. Lõputöö tulemuste osas on välja toodud ainult ühe sagedusmuunduri andmetest saadud tulemused.

Esimesed kolm päeva kulusid ettevalmistumisele ja testri valmis seadmisele. Esiteks tuli sagedusmuundurid testimiskohtadele füüsiliselt installeerida. Teiseks tuli need ühendada PLC-ga, et selle abil neid juhtida. Selle jaoks kasutati Profineti ühendust, kuna see on testrisse juba sisse ehitatud.

Sagedusmuunduris endas on sisseehitatud temperatuurikaitsed. Seade monitoorib pidevalt osade komponentide temperatuure ja kui need ületavad ettenähtud piiri, rakenduvad kaitsemehhanismid, näiteks lõpetavad seadme töötamise. Need piirid on määratud tavaliste tingimuste jaoks. Testris on temperatuurid kõrgemad, mis tähendaks seda, et katseid ei saaks segamatult läbi viia. Õnneks on Drive Composer tarkvara kaudu manuaalselt võimalik tõsta temperatuuride limiite. Tuli tõsta IGBT ja osade trükkplaatide temperatuure. Drive Composer kaudu tuli veel sisestada mootori või drosseli parameetrid: nimivõimsus, võimsus, võimsustegur, maksimaalne pöörlemiskiirus, väljundsagedus, väljundvool, väljundpinge.

Veel tuli ühendada iga sagedusmuundur arvutiga. Arvutisse salvestati testimisel saadud andmed. Nagu eelpool mainitud, salvestati sagedusmuunduri parameetrid DT tarkvara abil ja termopaaride mõõtmistulemused Keysight Benchlink Data Logger 3 abil. Igal sagedusmuunduril on oma juhtpaneel, kus on USB mini pistik, mille abil saab seda ühendada arvutiga.

Seejärel tuli üles seada Keysight 34972A Data Acquisition Tooli ja see seadistada. Kui kõik asjad olid seadistatud tehti paar testkatset, et näha, kas kõik töötab nii nagu ette nähtud.

2.8 Testimisel tekkinud probleemid

Katsetamise käigus tekkis mõningaid probleeme, mis enamjaolt olid seotud testri ja andmete salvestamisega. Esimene probleem tekkis sellest, et PLC ei saanud ühendust arvutiga, kus käis PLC programm. Pärast poolt tundi otsimist leiti, et interneti kaabel oli halvasti ühendatud. Ühe korra tekkis probleem PLC programmiga. Selgus, et PLC saatis sagedusmuundurile vale juhtimissõna, mille tõttu ei hakanud see testimise käivitamisel tööle. See tulenes sellest, et katsealustele sagedusmuunduritel oli laetud peale kõige uuem tarkvara, kus oli seda osa muudetud. Selle lahendamiseks tuli ühendust võtta PLC programmeerijaga, kes muutis programmi ümber nii, et saadeti õige juhtsõna.

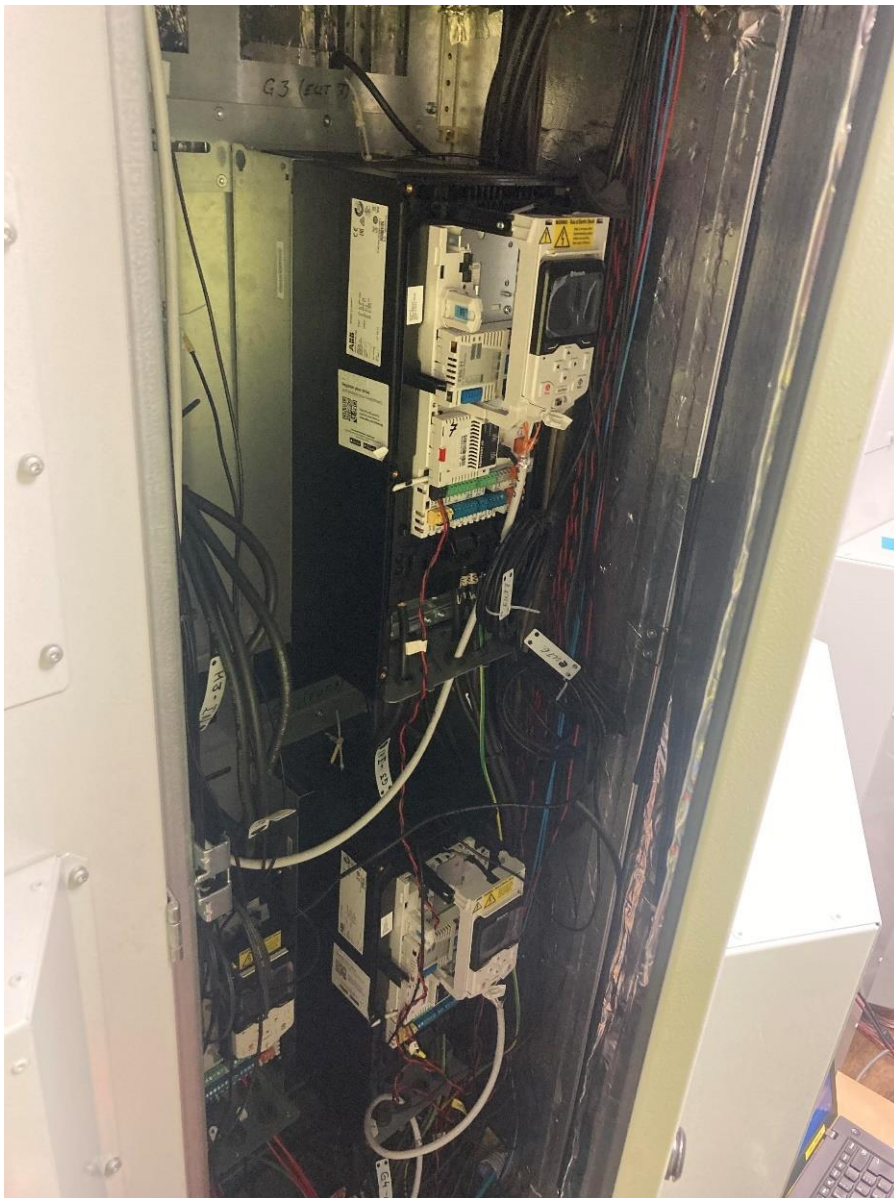
Teisel juhul tekkis probleem sagedusmuunduri poolt loetavate andmete salvestamisega. Tarkvaras DT tekkis selline huvitav probleem, et kui programmi ei olnud salvestamisrežiimil kuvati kõik väärtused õigesti, kuid kui programmis käivitati salvestamise režiim, muutusid kõik väärtused nulliks. Keegi polnud varasemalt sellise probleemiga kokku puutunud ja seetõttu võttis selle lahendamine terve päeva. Tuli ühendust võtta IT-osakonnaga, kes puutub selle tarkvaraga rohkem kokku. Selgus, et DT-s on iga sagedusmuunduri parameetri lugemiseks eraldi kood, mille järgi tarkvara selle üles leiab. Need koodid on erinevad iga sagedusmuunduri tarkvaral. Testitavatel sagedusmuunduritel oli laetud uus tarkvara, mille koodid ei klappinud eelnevalt sisestatud koodidega. Pika otsimise ja pärimise peale leiti õiged koodid üles ja arvuti tarkvara hakkas parameetreid salvestama.

Ülejäänud osas sujus katsetamine sujuvalt. Ainult ühe korra tekkis veel probleem kaheksatunnise katse käigus. Kuna tegemist oli pika katsega, siis pandi see tööpäeva lõpus salvestama. Teadmata põhjusel aga katse lõppes poole peal. Ilmselt oli see põhjustatud mõnest PLC veast. Seetõttu tuli katse hiljem uuesti teha.

Nagu eelpool mainitud, katsetati kokku nelja sagedusmuundurit. Kõik katsed viidi läbi ühes testimiskambris. Alguses pandi testrisse väiksema väljundvõimsusega seadmed. Esimesena tehti katsed, kus koormuseks oli drossel. Seejärel tehti kõik Tabelis 2 toodud katsed, pärast mida vahetati drosselid mootoritega ja tehti samad katsed. Pärast nende katsete lõpetamist võeti väiksema väljundvõimsusega sagedusmuundurid välja ja nende asemele pandi suurema võimsusega sagedusmuundurid. Katsete tegemise järjekord oli sama.

Tegelikult oleks saanud kõiki nelja sagedusmuundurit katsetada samaaegselt, kuna testri suurus oleks võimaldanud seda teha, aga kõik katsed otsustati viia läbi samas testimiskambris, kuna on teada, et temperatuur erinevates testimiskambrites varieerub. Viies läbi kõik katsed samas testimiskambris saab tulemuste erinevusi vähendada.

Eialgu oli testimisteks arvestatud kaks nädalat. See osutus natuke liiga optimistlikuks. Tekkinud probleemide ja nende lahendamise tõttu kulus kõikide katsete läbi viimiseks kokku kolm nädalat.



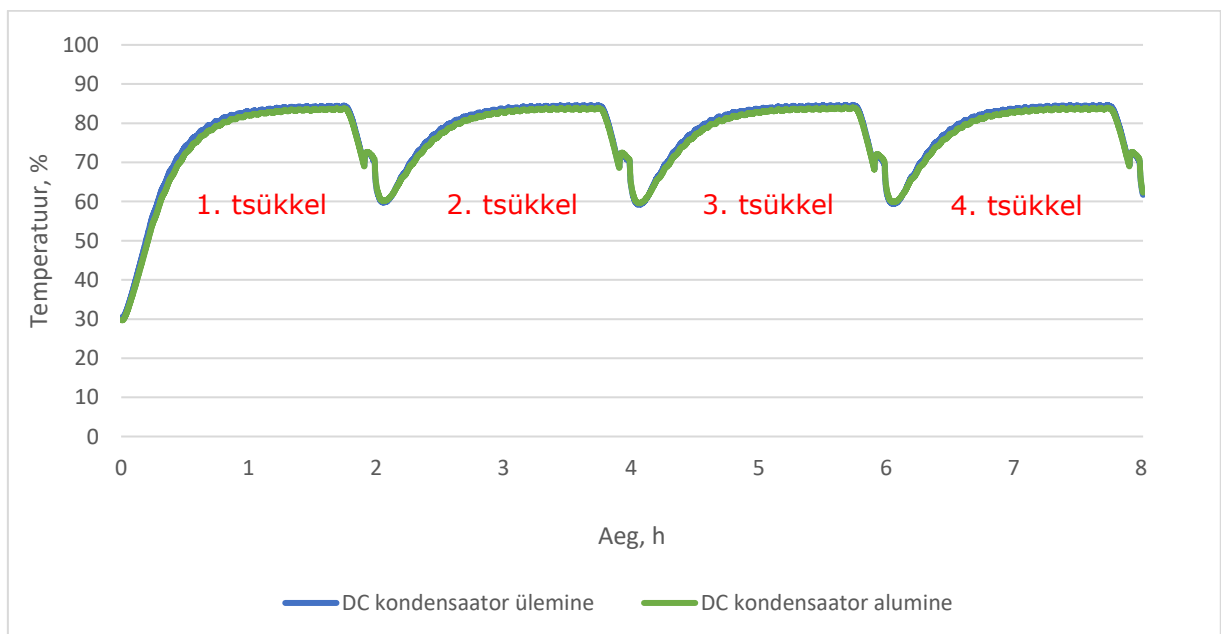
Pilt 3 Testimiskambri sisemus

3 Tulemused ja nende analüüs

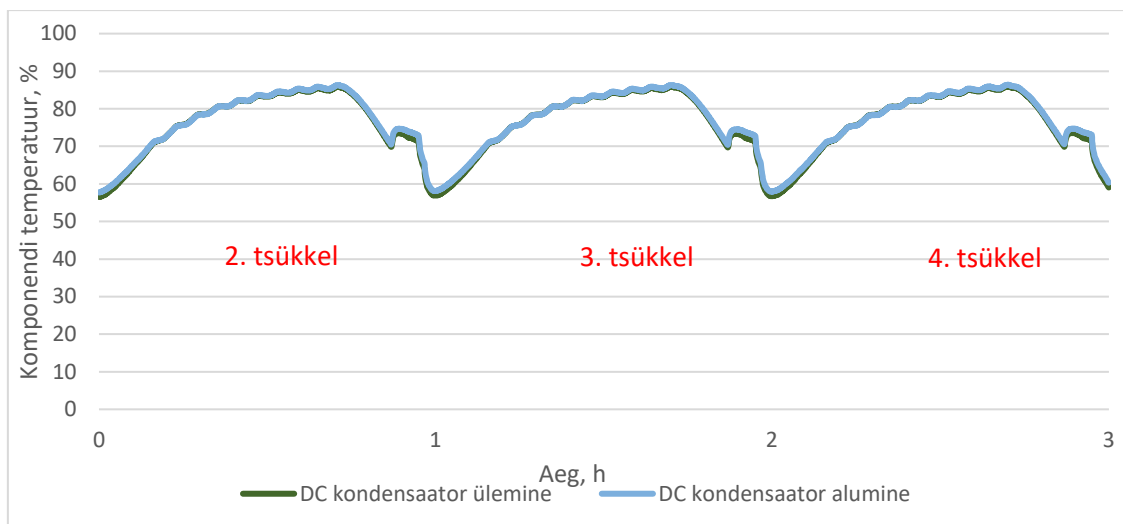
3.1 Katse tulemuste esialgne töötlemine

Pärast katsetamise lõpetamist pidi andmeid töötleva hakkama. Kõige pealt tuli andmed saada kasutataval kujul Microsoft Excelisse. Andmed salvestati .csv failina, mis tähendab, et kõik väärtused on eraldatud komaga, mitte ei asu eraldi lahtrites. See teeb andmete töötlemise väga keeruliseks, aga Excelil on funktsioon, mille abil saab need andmed lahtritesse viia. Kui andmed sai töödeldavale kujule viidud, pidi hakkama andmeid puhastama.

Edaspidised arvutused ja graafikud on toodud näitena katsest, kus tsükli kestus oli 1 tund ja koormuseks oli mootor. Üleliigsed andmed tuli kustutada, sest termopaaride salvestamist lülitati sisse ja välja manuaalselt, seetõttu sattus sinna palju üleliigseid andmeid (Joonis 5). Lisaks tuli kõikidest katseandmetest eemalda esimese tsükli andmed. Seda tuli teha sellepärast, et esimene tsükkel erineb oluliselt ülejäänud kolmest tsüklist. Esimese tsükli alguses hakkab tester alles soojenema oma seisemisolekust, seega on seadmed maha jahtunud. Joonisel 5 on näha kuidas esimese tsükli alguses on temperatuur oluliselt madalam.

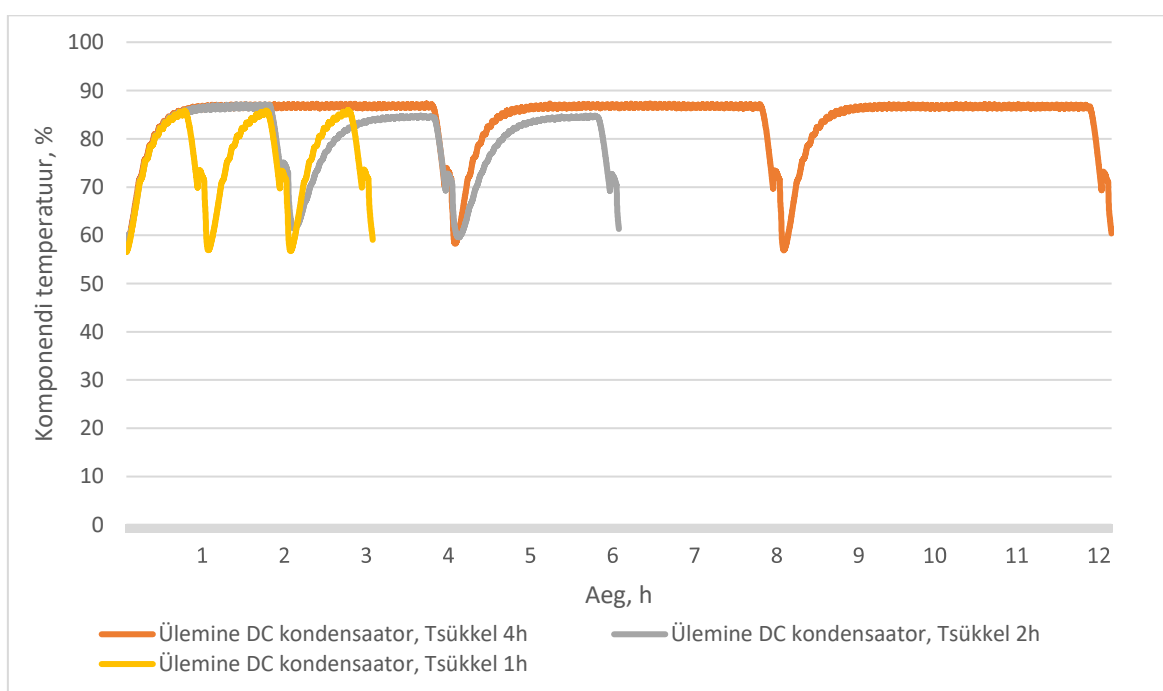


Joonis 5 Esialgsed korrastamata andmed. Muutuva temperatuuriga.



Joonis 6 Korrastatud andmed

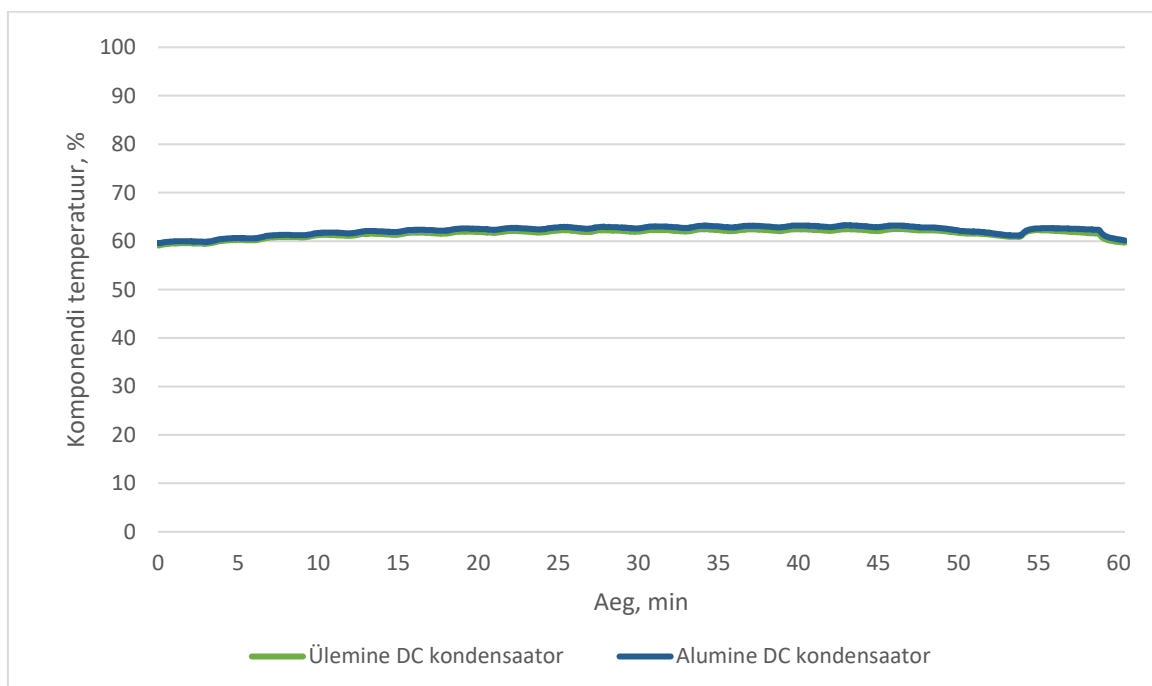
Kuna esimesel tsüklil hakkab tester soojenema toatemperatuurist on temperatuuri muutus palju suurem kui tavaliselt. See mõjutab oluliselt Coffin-Mansoni mudeli kasutamisel (Valem 1.2) saadud arvutuslikku kiirendatud eluea tegurit, kus saadakse tulemus temperatuuri muutuse kaudu. Kui testimine toimub pikaajaliselt, näiteks paar kuud, siis ei mängi see rolli. Käesolevas katsetes oleks sellele uurimusele suur mõju. Kui lõpptulemus, ehk komponendi kiirendatud eluea tegur saadakse nii, et arvutatakse kiirendatud eluea tegur iga tsükli kohta eraldi ja lõpuks võetakse nendest aritmeetiline keskmine. Kui ühe tsükli tulemus neljast on oluliselt kõrgem, siis tõuseb ka keskmise väärtus märkimisväärselt ning tulemus on vähem täpsem. Pärast esimest tsükli jõuab tester oma tavalisse talitlusse.



Joonis 7. Tsüklite võrdlus. Mootoriga koormamine

Seejärel sai minna edasi arvutuste juurde. Nagu mainitud siis peatükk 2.4, katse nr. 1 on referents katse, selle kaudu leitakse ΔT_{tava} , mida kasutatakse hiljem Coffin-Mansoni mudelil põhinevate arvutuste tegemisel (Joonis 8). Katse nr. 1 planeeriti nii, et see oleks võimalikult sarnane tavakasutuse tingimustele ehk kuidas kliendid seda kasutavad. ΔT_{tava} on temperatuuri muutus sagedusmuunduri töö käigus. Ehk selle jaoks tuli leida minimaalne temperatuur ja maksimaalne temperatuur, ning seejärel leida nende vahe. Selline referents katse oli vaja läbi viia selleks, et saaks iga komponendi kohta leida eraldi ΔT_{tava} , sest eelnevalt ei olnud täpselt teada, kuidas muutub temperatuur igas komponendis.

ΔT_{test} tuleb leida iga katse ja tsükli jaoks eraldi. Tsüklilise testimise korral leitakse maksimaalne ja minimaalne temperatuur igas tsüklis ja leitakse nende vahe. Tsükli täpset algust ja lõppu sai määrata mõõtepunktide järjekorra alusel. Mõõtmiste salvestamise intervall oli täpselt 3 sekundit ning iga salvestamisega anti mõõtmispunktile järjekorranumber. Kui teame, et näiteks tsükli pikkus on 1 tund ja tunnis on 3600 sekundit siis, jagades 3600/3 saame, et iga tsükkel teeb mõõteriist kokku 1200 mõõtepunkti salvestust. 2-tunnise tsükli puhul on see 2400 salvestust ja 4-tunnise tsükli puhul 4800 salvestust tsükli kohta. Sellise loogika abil oli andmetes lihtne orienteeruda.



Joonis 8 Temperatuuri graafik referents katsele. Konstantse temperatuuriga ja 70% nominaalvoolust

Kui iga tsükli jaoks oli leitud ΔT_{test} , sai alustada kiirendatud eluea teguri arvutamisega. Alguses leiti Coffin-Mansoni mudeli põhjal arvutatud kiirendatud eluea tegurid (Valem 1.2). Ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegurit iga tsükli kohta näeb Tabelist 4.

Tabel 4 Ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur iga tsükli kohta. Mootor, tsükli kestus 1h.

| Tsükli number. | Kiirendatud eluea tegur | Aritmeetiline keskmine |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 2 | 879 | 846 |
| 3 | 855 | 846 |
| 4 | 805 | 846 |

Võttes kolme tsükli keskmise saame lõpuks lõpptulemuse. Teame, et kui muutuva temperatuuriga, kus ühe tsükli keskus on 1 tund ja koormuseks on mootor, vananeb ülemine DC kondensaator keskmiselt ühe tsükli jooksul 846 tundi. Täpselt samasuguse lähenemisega arvutati ka teiste katsete tulemused.

Kogu komponendi testitud eluiga saadakse kõikide tsüklite kiirendatud eluea teguri summana. Tabel 4 tulemuste näitel - liites selle katse kiirendatud elueategurid igas tsükliks $879+855+805=2539h$ ja jagades selle 24h saame, et selle katse käigus vananes komponent 105 päeva.

Tehes vastupidised tehted, saab ka leida, mitu tsüklit tuleb teha, et saavutada teatud vananemine. Ütleme, et tahetakse katsetada, kas sagedusmuunduri uue DC kondensaatori eluiga on 10 aastat. Saame leida, et kümnes aastas on 87 600 tundi ja leides jagatise $87\ 600/846=103h$ ehk kondensaator peab olema testris 103 tundi, et vananeda 10 aastat tavatingimustes.

3.2 Tulemuste analüüs

Üheks uurimuse eesmärgiks oli katsetada erinevaid tsükli pikkuseid ja nende mõju kiirendatud eluea tegurile. Tulemusi nii drosseli kui ka mootori kohta saab näha vastavalt Tabelites 5 ja 6.

Tabel 5 Ühe tsükli pikkuse mõju komponendi kiirendatud eluea tegurile, kus koormuseks on mootor. Coffin Mansoni mudeli järgi.

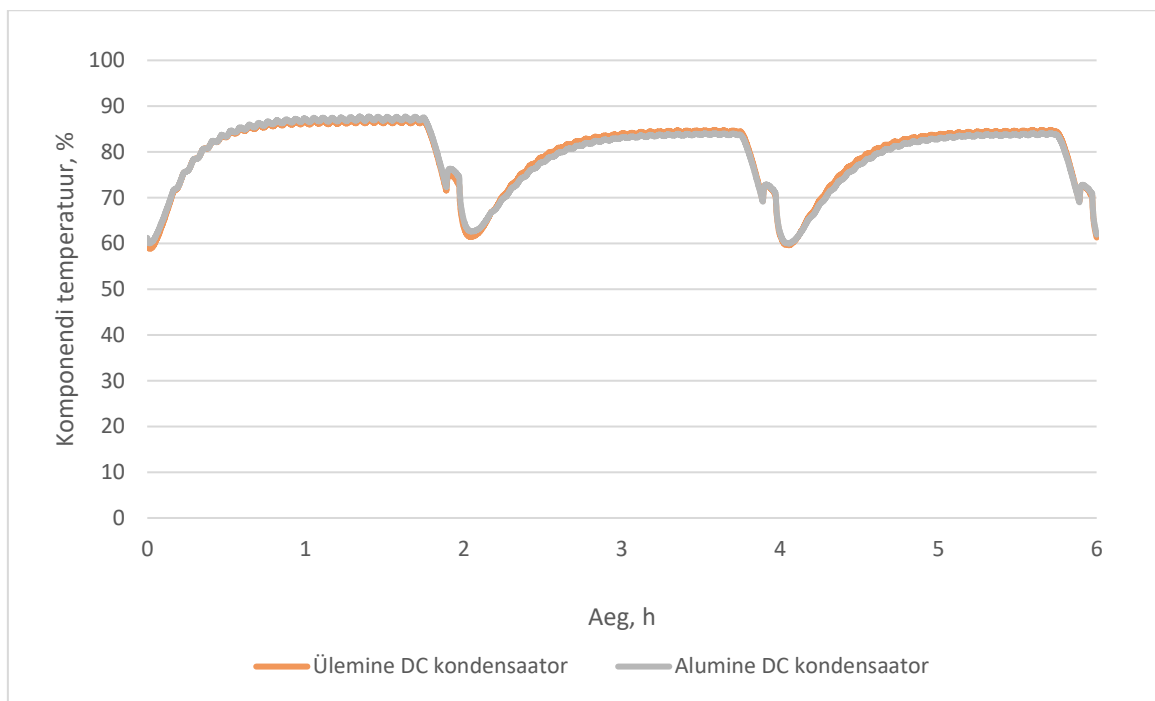
| Ühe tsükli kestus, h | Ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur | Alumise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur |
|-----------------------------|---|---|
| 1 | 877 | 660 |
| 2 | 627 | 458 |
| 4 | 932 | 709 |

Tabel 6 Ühe tsükli pikkuse mõju komponendi kiirendatud eluea tegurile, kus koormuseks on drossel. Coffin-Mansoni mudeli järgi

| Ühe tsükli kestus, h | Ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur | Alumise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur |
|-----------------------------|---|---|
| 1 | 846 | 620 |
| 2 | 850 | 628 |
| 4 | 884 | 660 |

Mõlemal juhul on selgelt näha, et tsükli kestusel on mõju komponendi kiirendatud eluea tegurile. Mida kauem kestab tsükkel, seda suurem on kiirendatud eluea teguri lõppväärtus. Lõpptulemustest jääb koheselt silma 2-tunnise tsükli tulemused Tabelist 7. Ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur on 627 ja alumisel DC kondensaatoril on see 458. 1 tunni pikkusel tsükliil on ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur on 877 ja alumisel DC kondensaatoril on see 660. 1-tunnise tsükli väärtused on suuremad kui 2-tunnise tsükli väärtused. Vaadates drosseli koormuse tulemusi, siis seal kasvab kiirendatud eluea tegur koos tsükli kestusega. 1- tunnise tsükliil on ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur on 864 ja alumisel DC kondensaatoril on see 620. 2-tunnise tsükli kestuse puhul on vastavad tulemused 850 ja 628. Võrreldes drosseli ja mootori tulemusi ja siin uurimustöös avaldamata tulemusi, siis tundub, et selle katse käigus läks testris midagi valesti. Vaadates sagedusmuunduri salvestatud parameetreid, tundub kõik normaalselt töötavat. Seega võime väita, et midagi läks valesti testri või siis andmete salvestamise poole pealt, mis jäi testimise käigus märkamata. Nüüd tagantjärele on raske kindlaks teha, mis täpselt sellise anomaalia põhjustas, tõenäoliselt

võis olla viga seadistuses või ventilatsioonis. Analüüsid igat tsükli eraldi selles katses, on näha, et esimese tsükli kiirendatud eluea tegur on korras, aga pärast teist tsükli väheneb see drastiliselt ning 3. Seega tundub, et testriga juhtus midagi peale 1. tsükli. Vaadates komponentide temperatuuri graafikut (Joonis. 9) On näha, et peale esimest tsükli on järgmiste tsükelite temperatuurid madalamad.



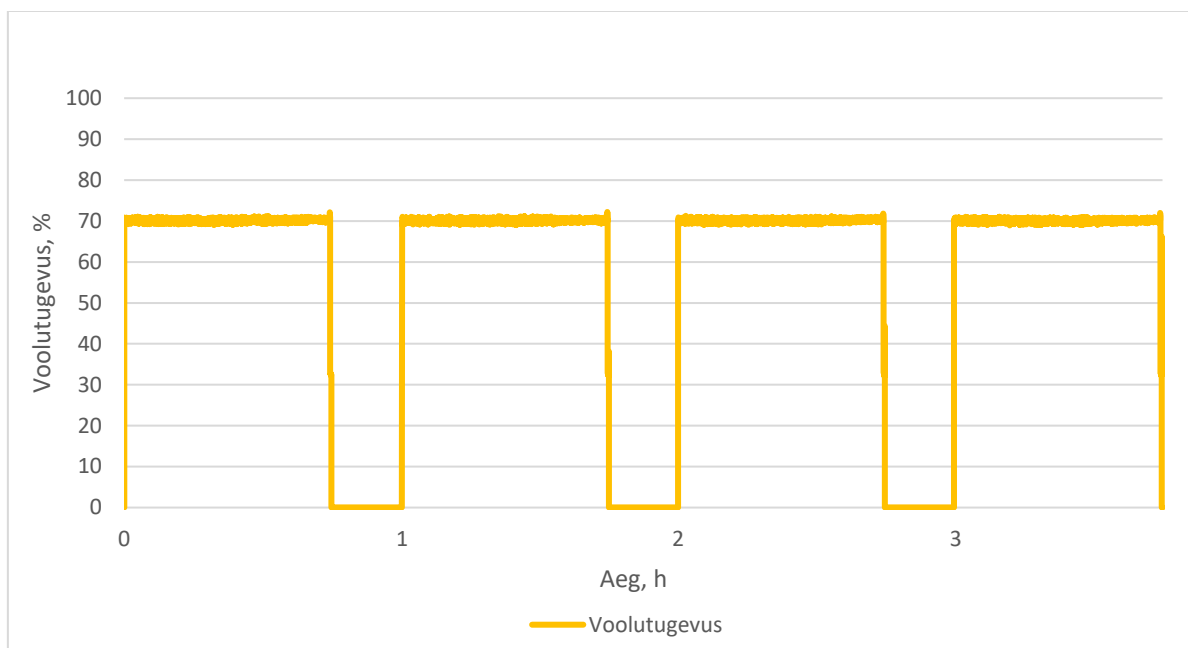
Joonis 9 Vigane katse. Tsükli kestus 2 tundi, mootori koormusega

Pikem aktiivne etapp võimaldab komponentidel soojeneda kauem nii ümbritseva temperatuuri kui ka töötamisest tingitud soojenemisest.

Kuigi on olemas selge korrelatsioon tsükli kestuse ja kiirendatud eluea teguri vahel, siis on vahed võrdlemis väiksed. Tabelis 6 välja toodud andmete põhjal on näiteks alumise DC kondensaatorite kiirendatud eluea teguri vahe tsükli kaupa järgnevad 1- ja 2-tunnise tsükli vahe on 8. 2- ja 4-tunnise tsükli vahe on 32. Arvestades seda, et Coffin-Mansoni kiirendatud eluea teguri arvutamisel leitakse kiirendatud eluea teguri iga tsükli kohta eraldi ja seejärel liidetakse need kokku, oleks antud juhul kasulik teha lühemad tsükliid, et saada suurem komponendi vananemine. Tabelis 6 välja toodud alumise DC kondensaatorite kiirendatud eluea tegur 2-tunnise tsükliga 628. Samas, kui teha samaajaga kaks 1-tunnist tsükliid, tuleks tulemus vastavalt $620+620=1240$, ehk vananemine on ligikaudu poole suurem.

Teiseks uurimuse eesmärgiks oli seatud uurida, kuidas mõjutab drosseli või mootori kasutamine kiirendatud eluea tegurit. Vaadates tabelit 5 ja 6 ja võrreldes tulemusi, on mootoriga koormamisel saadud kiirendatud eluea tegur nende komponentide puhul

suurem kui drosseliga koormamisel, olenemata tsükli pikkusest. Seda, kuidas koormamine toimus, on näha Joonisel 10. Voolutugevus on selles graafikus näidatud, sest elektrimootori moment on otseselt seotud voolutugevusega.



Joonis 10 Voolutugevuse muutumine tsüklilise testimise käigus. Ühe tsükli pikkus 1 tund.

Need kaks uuritud komponenti annavad ka hea võrdluse sellest, et komponentide kiirendatud eluea tegur võib komponendi kaupa olla väga erinev. Mõlemad komponendid ülemine DC kondensaator ja alumine DC kondensaator, asuvad sagedusmuunduri DC vahelülis, on täpselt identsed ja täidavad täpselt sama ülesannet. Ometi on näha, et tulemused on erinevad. Ülemine DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur on kõikide katsete puhul suurem kui alumise DC kondensaatori oma. See on põhjustatud nende komponentide asukohast.

Peatükis 1.5 on öeldud, et Arrheniuse mudel on mõeldud konstantse temperatuuriga testimise jaoks ja peatükis 1.6 on öeldud, et Coffin-Manson on mõeldud tsükliliseks testimiseks. Mõlemad kiirendava teatud tüüpi veatüüpe. Arrhenius pigem keemilisi ja Coffin-Manson rohkem mehaanilisi vigu. Need mõlemat tüüpi vananemised toimuvad olenemata testimise profiilist. Arrheniuse tüüpi vead kiirenevad ka tsüklilisel testimisel, sest temperatuur on ikkagi kõrgem, kui tavalistes tingimustes ning seetõttu keemilised reaktsioonid kiirenevad [13]. Vaadates erinevate katsete ülesehitust saab sellest paremini aimu. Nendes katsetes proovitakse balansseerida Arrheniuse ja Coffin Mansoni vananemist. See tõttu ongi tsükkel ülesehitatud nii, et alguses test soojeneb, see järel hoiab tükki aega ühtlast temperatuuri ja siis test jahtub. Ainult Coffin-Mansoni mudelit arvestades, oleks mõistlik teha hästi lühikesed tsüklid, kuna nii saaks kõige kiiremini

teste läbi viia, sest selles mudelis arvestatakse ainult temperatuuri muutumist. Seetõttu arvutati välja ka Arrheniuse kiirendatud eluea tegur tsüklilisele testimisele. Tulemusi on näha tabelis 7 ja 8.

Tabel 7 Ühe tsükli pikkuse mõju komponendi kiirendatud eluea tegurile, kus koormuseks on mootor. Arrheniuse mudeli järgi.

| Ühe tsükli kestus, h | Ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur | Alumise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur |
|-----------------------------|---|---|
| 1 | 13 | 12 |
| 2 | 17 | 15 |
| 4 | 23 | 21 |

Tabel 8 Ühe tsükli pikkuse mõju komponendi kiirendatud eluea tegurile, kus koormuseks on drossel. Arrheniuse mudeli järgi.

| Ühe tsükli kestus, h | Ülemise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur | Alumise DC kondensaatori kiirendatud eluea tegur |
|-----------------------------|---|---|
| 1 | 11 | 9 |
| 2 | 15 | 14 |
| 4 | 22 | 16 |

Vaates tulemusi Tabelist 7 ja 8, näeme, et Arrheniuse mudeli järgi arvatud kiirendatud eluea tegurite puhul kehtivad sarnased järeldused nagu Coffin-Mansoni mudeli puhul – mida kauem kestab tsükel, seda suurem on kiirendatud eluea tegur ja mootoriga koormamisel on kiirendatud eluea tegur suurem kui drosseliga koormamisel.

3.3 Õppetunnid ja tähelepanekud

Tulemusi analüüsid tehti järeldus, et järgmine kord võiks olla tsükli jahtumisaeg pikem. Tabelis 2 võib näha, et jahtumisperioodi kestus oli 15min. Selle aja jooksul ei jõudnud osad komponendid piisavalt maha jahtuda soovitud temperatuurile. Seetõttu tuli nende Coffin-Mansoni mudeli järgi arvatud kiirendatud eluea tegur väiksem.

Tõsiasi on see, et kõige täpsemad kiirendatud eluea tegurid iga individuaalse komponendi kohta saaks leida neid eraldi testides. Sellel juhul saaks luua kõige paremad testimise tingimused iga komponendi kohta. Temperatuur ei ole kindlasti ainukene faktor, mis põhjustab vananemist, mängivad rolli ka teised keskkonna tegurid nagu näiteks niiskus, ümbritsev keskkond (kas õhk on puhas või tolmune) või siis elektrilised tegurid nagu näiteks komponendile rakendatav pinge, sagedus jne. Kuna ülesanne on aga uurida tervet toodet ja selle komponentide tööd korraga, siis see seab ka komponentide kiirendatud eluea teguri uurimisele teatud piirangud. Tuleb teha teatud lihtsustusi ja üldistusi.

Tulevikus peaks sarnaseid katseid tegema erinevate sagedusmuunduritega. Ettevõttes testitakse palju erineva suuruse ja võimsusega sagedusmuundureid. Teades, kuidas komponentide kiirendatud eluea tegurid varieeruvad erinevate sagedusmuundurite vahel, saaks iga katse puhul täpsemalt komponendi vananemist hinnata.

KOKKUVÕTE

Ettevõtted peavad pidevalt enda tooteid testima, et toodangu töökindlus vastaks seatud nõuetele ja kliendi ootustele. Töökindluse tagamise üheks meetodiks on oma toodete testimine. Üheks toodete testimise alaliigiks on kiirendatud eluea test, kus koormamise abil kiirendatakse toode elukõiku. Selle abil on võimalik leida kulumise ja vananemisega seonduvaid vigu.

Töö eesmärgiks oli leida kiirendatud eluea tegur erinevatele sagedusmuunduri komponentidele, mille abil oleks võimalik hinnata individuaalselt komponentide vananemist testimise käigus. Varasemalt arvutati kogu sagedusmuundurile välja ainult üks kiirendatud eluea tegur, aga on teada, et reaalsuses komponendid vananevad erinevalt.

Katsetamisel saadud andmete abil sai välja arvutada erinevate komponentide kiirendatud eluea tegurid. Lisaks leiti, kuidas mõjutab koormuse tüüp ja tsükli kestus kiirendatud eluea tegurit. Leiti, et mootoriga töötamisel on kiirendatud eluea tegur suurem kui drosseliga koormamisel ning et mida kauem kestab tsükkel, seda suurem on kiirendatud eluea tegur.

Nüüd kui on olemas komponentide kiirendatud eluea tegurid saab hakata koguma andmeid kiirendatud eluea testimistelt. Kui on piisavas koguses testimisandmeid, saab neid võrrelda klientide poolt tulevate andemetega. Seda tehes saab anda parema hinnangu tulemuste täpsusele ja kas selline üldistamine õigustab ennast.

Tulevikus peaks sarnaseid katseid viima läbi erinevate sagedusmuunduritega, et saaks vananemist iga katse puhul täpsemalt hinnata. Lisaks peaks jahutamisperiood olema pikem. Käesolevas lõputöö puhul oli testkambri jahutusetapi kestus kõikide katsete puhul 15min. Mõned komponendid ei jõudnud selle ajaga maha jahtuda soovitud temperatuurile.

4 Kasutatud kirjandus

- [1] A. K. Patrick D. T. O'Connor, Practical Reliability Engineering. Fifth Edition, London: A John Wiley & Sons, 2012.
- [2] K. Tikkanen, „The embodiment of reliability for variable speed drives,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/drives/our-stories/reliability-for-speed-drives>. [Kasutatud 12 Märts 2022].
- [3] K. Tikkanen, „Why do variable speed drives fail and how do we test them?,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/drives/our-stories/reliability-for-speed-drives>. [Kasutatud 12 Märts 2022].
- [4] „e-Handbook of Statistical Methods,” NIST/SEMATECH , [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. [Kasutatud 30 03 2022].
- [5] [Võrgumaterjal]. Available: https://www.tthk.ee/MEH/Andurid_2.html. [Kasutatud 22 04 2022].
- [6] „Activation Energy,” EESemi, [Võrgumaterjal]. Available: <https://eesemi.com/activation-energy.htm>. [Kasutatud 31 märts 2022].
- [7] H. Cui, „Accelerated Temperature Cycle Test and Coffin-Manson Model for Electronic Packaging,” RF Micro Devices, [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1408421>. [Kasutatud 14 Märts 2022].
- [8] „Accelerated life test acceleration factors,” Ettevõtte sisedokument, 2020.
- [9] A. K. Kuno Janson, Elektrimasinate alused, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2017.
- [10] J. Sam G. Parler, „Deriving Life Multipliers for Electrolytic Capacitors,” 2004. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cde.com/resources/technical-papers/multipliers.pdf>. [Kasutatud 23 04 2022].
- [11] Keysight, [Võrgumaterjal]. Available: <https://testworld.com/wp-content/uploads/user-guide-keysight-agilent-34970a-34972a-da-q.pdf>. [Kasutatud 22 04 2022].
- [12] TEW&C, [Võrgumaterjal]. Available: <https://tewire.com/wp-content/uploads/2015/04/3-10.pdf>. [Kasutatud 17 05 2022].
- [13] „Balanced Test Cycle in Accelerated lifetime test,” Ettevõtte sisedokument, 2016.
- [14] „Acceleration Factor Definition Test,” Ettevõtte sisedokument, 2021.

LISAD

LISA 1 Keysight 34972A mõõtevead [11]

| Temperature | Type | 1-Year Best Range Accuracy ^[5] | | Extended Range Accuracy ^[5] | | Temperature Coefficient /°C |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|--------------|--|--------------|-----------------------------|
| | | | | | | |
| Thermocouple ^[6] | B | 1100°C to 1820°C | 1.2°C | 400°C to 1100°C | 1.8°C | 0.03°C |
| | E | -150°C to 1000°C | 1.0°C | -200°C to -150°C | 1.5°C | 0.03°C |
| | J | -150°C to 1200°C | 1.0°C | -210°C to -150°C | 1.2°C | 0.03°C |
| | K | -100°C to 1200°C | 1.0°C | -200°C to -100°C | 1.5°C | 0.03°C |
| | N | -100°C to 1300°C | 1.0°C | -200°C to -100°C | 1.5°C | 0.03°C |
| | R | 300°C to 1760°C | 1.2°C | -50°C to 300°C | 1.8°C | 0.03°C |
| | S | 400°C to 1760°C | 1.2°C | -50°C to 400°C | 1.8°C | 0.03°C |
| | T | -100°C to 400°C | 1.0°C | -200°C to -100°C | 1.5°C | 0.03°C |
| RTD | R ₀ from 49Ω to 2.1 kΩ | -200°C to 600°C | 0.06°C | | | 0.003°C |
| Thermistor | 2.2 k, 5 k, 10 k | -80°C to 150°C | 0.08°C | | | 0.002°C |