



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ENERGIA TARBIMISE OPTIMEERIMINE
SAGEDUSMUUNDURITE TESTIMISE
SÜSTEEMIDES ABB ETTEVÖTTES: LAHENDUSTE
ARENDAMINE JA RAKENDAMINE**

**OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN DRIVES
TEST SYSTEMS IN AN ABB COMPANY: DEVELOPMENT
AND IMPLEMENTATION OF SOLUTIONS**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aleksei Zubehhin

Üliõpilaskood: 206056EAAB

Juhendajad: Viktor Rjabtšikov,
Doktorant-Nooremteadur

Sergey Kalashnikov,
Reliability Testing Manager

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.

"....." 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 Aleksei Zubehhin

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Energia tarbimise optimeerimine sagedusmuundurite testimise süsteemides ABB ettevõttes: lahenduste arendamine ja rakendamine”,

mille juhendajad on Viktor Rjabtšikov ja Sergey Kalashnikov,

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: Aleksei Zubehhin

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Energia tarbimise säästmine Drives Reliability Center'is ABB ettevõttes

Kuupäev:
18.05.2023

68 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: Viktor Rjabtšikov, doktorant-nooremteadur

Sergey Kalashnikov, reliability testing manager

Töö konsultant: Markus Nihtinen, project manager

Sisu kirjeldus:

Käesolev bakalaureusetöö keskendub energiatarbimise optimeerimisele ABB sagedusmuundurite testimissüsteemides. Töö eesmärk oli uurida võimalikke lahendusi ja nende rakendamise samme testimissüsteemides, et vähendada testrite energiatarbimist.

Töös käsitleti üksikasjalikult töökindluse ja testimise mõisteid, testimise eesmärke ja meetodeid. Uuriti erinevate testisüsteemide energiatarbimist, et leida käesoleva töö jaoks sobivad muutuste leidmiseks ja rakendamiseks sobiv keskkond. Selgitati välja peamised energiatarbimise tarbijad ja koostati ettekujutus kõnealuste testimissüsteemide energiatarbimisest.

Selgitati välja võimalikud lahendused selle ettevõtte jaoks, valiti välja lahendus ning kirjeldati selle süsteemi rakendamise protsessi. Kirjeldati lahenduste rakendamise tingimusi ja arutati teostatud tööde põhiaspekte.

Märksõnad: elektrienergia tarbimine, ABB ettevõtte, tarbimise vähendamine, bakalaureusetöö, lahenduste rakendamine, sagedusmuundur, testimise süsteem, töökindlus, termoisolatsioon.

ABSTRACT

Author: Aleksei Zubehhin

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Energy saving consumption in the Drives Reliability Center at ABB company

Date: 18.05.2023

68 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisors of the thesis: Viktor Rjabtšikov, doktorant-nooremteadur

Sergey Kalashnikov, reliability testing manager

Consultant: Markus Nihtinen, project manager

Abstract:

This thesis focuses on the optimization of energy consumption in ABB drives test systems. The aim of the thesis was to investigate possible solutions and their implementation steps in test systems in order to reduce the energy consumption of testers.

The concepts of reliability and testing, the objectives of testing and the methods used were discussed in details. The energy consumption of different test systems was investigated in order to find a suitable environment for the identification and implementation of changes for this work. The main consumers of energy consumption were identified and an idea of the energy consumption of these test systems was developed.

Possible solutions for this company were identified, a solution selected and the process of implementing this system described. The conditions for implementing the solutions were described and the main aspects of the work carried out were discussed.

Keywords: electricity consumption, ABB company, consumption reduction, bachelor thesis, implementation of solutions, drives, test system, reliability, thermal insulation.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Energiatarbimise optimeerimine sagedusmuundurite testimise süsteemides ABB ettevõttes: lahenduste arendamine ja rakendamine**

Lõputöö teema inglise keeles: **Optimization of energy consumption in drives test systems in an ABB company: development and implementation of solutions**

Üliõpilane: **Aleksei Zubehhin, 206056EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Viktor Rjabtsíkov Tallinna Tehnikaülikool, doktorant-nooremteadur, viktor.rjabtsikov@taltech.ee**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Sergey Kalashnikov ABB, Reliability Testing Manager, sergey.kalashnikov@ee.abb.com**
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: 2022/2023 2022/2023 Kevad

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2023**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Viimase aja elektrienergia hindade tõusu tõttu on tööstusettevõtted, selle juhul sagedusmuundurite tootmise ja testimisega tegelevad ettevõtted, silmitsi vajadusega leida tõhusaid lahendusi energiatarbimise vähendamiseks, kuna ettevõtetes on elektritarbimine palju suurem, kui keskmisel eraisikul. Antud bakalaureusetöö on aktuaalne, kuna keskendub sagedusmuundurite testimisseadmete energiatarbimise optimeerimisele, mis on otseselt seotud sagedusmuundurite osakonna tegevusega ABB ettevõttes.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida ja välja töötada samme ja meetodeid sagedusmuundurite testimissüsteemi energiatarbimise optimeerimiseks ning leida lähenemisviise nende lahenduste edukaks rakendamiseks testimisprotsessides.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Milliseid samme tuleb astuda väljatöötatud lahenduste edukaks rakendamiseks?

Millised probleemid ja takistused võivad tekkida pakutud lahenduste rakendamisel ning kuidas neid ületada?

Kui suur on DRC¹ aastane elektrienergia tarbimine?

Millised on peamised tegurid, mis mõjutavad sagedusmuundurite testimisprotsessi energiatarbimist?

4. Lähteandmed

Eesmärgi saavutamiseks alustame ABB andmebaasist saadud elektrienergia tarbimise andmetega kogu tehase ja iga konteineri kohta eraldi mitme aasta jooksul. Elektrienergia hindade andmed saadakse Eesti Energia avalikest allikatest. Seejärel määratleme valitud konteinerites kasutatavate seadmete elektrienergia tarbimise. See teave on vajalik algpildi koostamiseks ja praeguse olukorra hindamiseks. Autor saab energiasäästu lahenduste ja meetodite kohta olemasolevaid teadmisi otse ettevõtetest.

¹ DRC (ehk Drives Reliability Center) – on tehas, kus paiknevad konteinerid, millistes teostatakse testimisprotsesse.

5. Uurimismeetodid

Tulemusteni jõudmiseks on vaja koguda tarbimise statistikat ja seda analüüsida, et leida elektritarbimise päeva- ja ööhinnad ning suve ja talveperioode vastavad hinnad. Kõik need operatsioonid andmete kogumiseks ja arvutamiseks kasutatakse Excel-i tabeleid. Lahendamise rakendamisel kasutatakse järgmist katse metoodikat: valitakse üks probleemi lahenduse meetod, eeldatakse mis tulemus on võimalik saada ja see lahendus rakendatakse vastavale konteinerile ning tehakse mõõtmisi. Tulemus kontrollitakse ja võrreldakse Excel-is eelnevate andmetega.

6. Graafiline osa

Graafiline osa paikneb põhiosas, kuna lähte- ja tulemuste andmeid on graafiliselt lihtsam analüüsimiseks arusaada. Joonised paiknevad ka põhiosas, et oleks võimalik näha millised muudatused olid tehtud ja mis moodi nad mõjutavad tulemusi.

7. Töö struktuur

- 1 Töökeskonna tutvustus
 - 1.1 Töökindlus
 - 1.1.1 Töökindluse põhimõte
 - 1.1.2 Töökindluse testimine
 - 1.2 Testimise süsteemid
 - 1.2.1 DRC
 - 1.2.2 Konteinerite komponendid
- 2 Lähteandmete kogunemine
 - 2.1 DRC tarbimine
 - 2.2 Testerite valik uurimiseks
 - 2.3 Mõõtmiste teostamine
 - 2.4 Tulemuste väljatöötamine
- 3 Lahenduste rakendamine
 - 3.1 Võimalikud lahendused energia säästmiseks
 - 3.1.1 Isolatsiooni parendus
 - 3.1.2 Algoritmi muutus
 - 3.1.3 Jäävuse energia kasutamine
 - 3.1.3.1 Jäävuse energia ligiid
 - 3.1.3.2 Võimalused seda kasutada

- 3.2 Meie lahenduste valik
- 3.3 Tööde teostamine
- 4 Tulemuste analüüs
 - 4.1 Järelmõõtmiste teostamine
 - 4.2 Võrdlus esialgse situatsiooniga

KOKKUVÕTE

8. Kasutatud kirjanduse allikad

https://global.abb/group/en	*ABB avatud veebileht
https://www.energia.ee/era/elekter/elektriturg	*Eesti Energia avatud veebileht
https://mylearning.abb.com/	*ABB ettevõtte õppeveebileht

9. Lõputöö konsultandid

Markus Nihtinen, Project Manager, ABB Finland, markus.nihtinen@fi.abb.com

10. Töö etapid ja ajakava

Lähteandmete kogumine	20.11.2022
Teoreetilise osa kirjutamine	30.11.2022
Arvutuste/mõõtmiste teostamine	10.12.2022
Andmete kirjeldamine	15.12.2022
Lahenduste kirjeldamine	20.12.2022
Lahenduse rakendamine	10.01.2023
Tulemuse arvutuste/mõõtmiste teostamine	15.01.2023
Uuringu tulemuste kirjeldamine	20.01.2023
Järelduste kirjutamine	01.02.2023
Kokkuvõtte koostamine	03.02.2023
Konfidentsiaalsuse taotlemine	28.03.2023
Töö esimene versioon valmis	10.03.2023
Juhendajale läbilugemiseks saatmine	10.03.2023
Paranduste sisseviimine	20.03.2023
Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine	20.03.2023
Töö lõplik versioon valmis	25.04.2023

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	12
Lühendite ja tähiste loetelu	13
SISSEJUHATUS	14
1 SAGEDUSMUUNDURITE TESTIMISE JA TÖÖKINDLUSE PÕHIALUSED.....	16
1.1 Töökindlus	16
1.1.1 Töökindluse põhimõte	16
1.1.2 Töökindluse testimine	18
1.2 Testimise keskkond.....	21
1.2.1 DRC.....	21
1.2.2 Konteinerite komponendid	22
1.3 Vahekokkuvõte.....	24
2 ANDMETE KOGUMINE JA ENERGIATARBIMISE HINDAMINE	25
2.1 DRC tarbimine.....	25
2.2 Testrite valik uurimiseks	26
2.2.1 Testrite süsteemide analüüs	26
2.3 Mõõtmiste teostamine	29
2.4 Tulemuste väljatöötamine.....	31
3 LAHENDUSTE RAKENDAMINE	34
3.1 Mis saab parandada situatsiooni?	34
3.1.1 Isolatsioon.....	34
3.1.2 Algoritm	35
3.1.3 Jäävuse energia kasutamine	35
3.1.4 Alternatiivne kondenseerumine	36
3.2 Meie lahenduste valik.....	37
3.3 Tööde teostamine	38
3.3.1 Töökeskkonna ülevaade	39
3.3.2 Isolatsiooni valik	39
3.3.3 Isolatsiooni uuendamine.....	40
4 TULEMUSTE ANALÜÜS	42
4.1 Tulemuste võrdlus	42
4.1.1 Füüsiline ülevaade	42
4.1.2 Termokaamera pildid	42
4.1.3 Mõõtmised pärast isolatsiooni vahetust	43

4.1.4 Energiatarbimise võrdlus	44
4.2 Edasised tegevused.....	44
KOKKUVÕTE	48
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	49
LISAD	51

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema oli pakutud ABB ettevõtluse poolt, elektrienergia tarbimine on aasta-aastalt üha aktuaalsem probleem, seega ettevõtte on alati huvitatud kulude vähendamises. Autor valis just selle teema, sest see töö annab reaalselt inseneri kogemust ettevõtete probleemide lahendamises, sisaldab nii teoreetilist, kui ka praktilist osi, mis annavad võimalusi omandada uusi oskusi ja teadmisi ning see on võimalus osaleda tootmise arendamises Eestis. Lõputöö autor tegi koos ettevõttejuhendajaga ja ülikooli juhendajaga ning kasutas ressursse ettevõtte poolt.

Autor tänab järgmisi isikuid, kes osalesid selle bakalaureusetöö valmimisel: töö juhendajat Sergey Kalashnikov, ülikooli juhendajat Viktor Rjabtšikov, töö konsultanti Markus Nihtinen, samuti Sergey Ungefug, Cletus-John Crasta, Artur Ivlijev, Nikolai Posohov ning teisi kolleege abistamise ning oma aja ja jõu kulutamise eest.

Võtmesõnad: elektrienergia tarbimine, ABB ettevõtte, tarbimise vähendamine, bakalaureusetöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

ALT – kiirendatud eluea test (inglise keeles Accelerated Life Test)

DRC – sagedusmuundurite testimiskeskus (inglise keeles Drive Reliability Center)

EMC – elektromagnetiline ühilduvus (inglise keeles Electromagnetic compatibility)

EUT – testitavad seadmed (inglise keeles Equipment Under Test)

HALT – kõrge kiirendatud eluea test (inglise keeles Highly Accelerated Life Test)

HASS – kõrgkiirendatud koormuse sõelumine (inglise keeles Highly Accelerated Stress Screening)

PLC – programmeeritav loogiline kontrolleri (inglise keeles Programmable Logic Controller)

PoF – ebaõnnestumiste füüsikaline meetod (inglise keeles Physics of Failures)

R&D – teadus- ja arendustegevus (inglise keeles Research and Development)

RDT – töökindluse määramise test (inglise keeles Reliability Determination Test)

VFD – muutuva sagedusega ajam (inglise keeles Variable Frequency Drive)

THB – temperatuur, niiskus, kõrvalekalded (inglise keeles Temperature, Humidity, Bias)

SISSEJUHATUS

Toote testimine (siin on tegemist sagedusmuunduritega) on oluline, et parandada toote jõudlust, disaini, tootmisprotsessi ja kasutusiga. Testimine on iga toodete arendamise programmi oluline osa, sest isegi kõige üksikasjalikumad projektid ei saa olla täiuslikud, kuna nende projekteerimisel, valmistamisel ja hooldamisel ei ole võimalik ette näha ja analüüsida kõiki võimalikke vigu.

Toodete igakülgse täiustamise saavutamiseks kasutatakse erinevaid ulatuslikke testimisprogramme, see moodustab pidevat arenguprotsessi, mille käigus leitakse igal aastal paremaid viise testide läbiviimiseks, tekivad uued testimismeetodid ja nende kriteeriumide standardid. Testiprogramm hõlmab funktsionaalseid teste, et kontrollida toote vajalikke funktsioone, keskkonnakatsetusi, et kontrollida konstruktsiooni sobivust antud kasutustingimustes, statistilisi teste, mille eesmärk on parandada toote disaini ja tootmisprotsessi, ning töökindluse teste, et arvutada toote eeldatav eluiga. Kõik need koos annavad hinnangu toote töökindluse kohta, see tähendab konkreetse tulemuse, mis annab märku juba rakendatud parandustest, konstruktsioonis või kasutatud komponentides tuvastatud puudustest ja edasistest meetmetest toote parandamiseks.

Kogu see testimisprotsess võtab aega ja, mis kõige tähtsam, kulutab palju ressursse, sealhulgas elektrit. Seetõttu on käesoleva töö eesmärk vähendada energiakulusid, otsides erinevaid lahendusi, mis eeldatavasti toovad kaasa mitmeid positiivseid pikaajalisi muutusi praeguses olukorras. Elektrienergia tarbimise kasvu probleem on tänapäeval aktuaalne, sest elektrienergia kättesaadavusest sõltub tänapäeva inimese elu mugavuse tase. Sellel teel on kaks võimalust: on võimalik piirata tarbimise kasvu, mis kahtlemata mõjutab meie kõigi elatustaset ja võimalusi, või mõelda teises suunas, nimelt säästa energiat, see tähendab kasutada seda targalt. Elektritarbimise optimeerimine toob kaasa mitte ainult rahaliste kulude vähenemise, aga veel lisa tähtsad tagajärjed, nagu negatiivse keskkonnamõju vähendamine, kõrgtehnoloogiliste seadmete arendamine ja ammenduvate loodusvarade säästmine.

Käesoleva uuringu objektiks on ABB-le kuuluv ja Harjumaal Jüri külas asuv Drives Reliability Center (edaspidi DRC). Hoone on tehas, mille kahel korrusel asuvad laevakonteinerid on rajatud stasionaarseteks ruumideks enam kui 25 testsüsteemide jaoks. Süsteemidel on erinevad nimed, näiteks Marvel, Waspnest, Daytona, Jacksonville, Miami jne. Käesolevas bakalaureusetöös kaks testsüsteemi, mis käsitletakse detailselt on Daytona III ja Daytona IV.

Eesmärgi saavutamiseks, see tähendab energiatarbimise vähendamiseks energiakulu vähendamise lahenduste ja menetluste leidmise teel, astub autor koos töökindluse osakonna meeskonnaga ABB ettevõtte testisüsteemide analüüsi põhjal järgmised sammud: tuleb saada DRC esialgne tarbimispilt mitme aasta jooksul, valida ülesande jaoks kõige sobivamad testisüsteemid, teha peamiste tarbijate tarbimismõõtmised ja muudatused testikorralduses. Seejärel tuleb teostada uusi mõõtmisi ja koostada nende põhjal järeldusi.

Kasutati järgmisi arvutipõhiseid abivahendeid: MS Excel - andmete töötlemiseks ja graafikute koostamiseks, Power Log 430-II - andmete saamiseks analüsaatorist, Automation Builder - tarkvara konteineri ja sagedusmuundurite töö automatiseerimiseks, Drive Composer Pro - temperatuuritsükli jälgimiseks, FLIR Tools - tarkvara soojuskaamera piltide eksportimiseks.

1 SAGEDUSMUUNDURITE TESTIMISE JA TÖÖKINDLUSE PÕHIALUSED

1.1 Töökindlus

1.1.1 Töökindluse põhimõte

Tootmisettevõtted pööravad erilist tähelepanu toote enda töökindlusele, kui nad müüvad valmistatud toodet, ning klientide jaoks töökindluse aspekt samamoodi mängib olulist rolli. Keegi ei saa absoluutse kindlusega öelda, kui kaua toode töötab ja millal täpselt see vajab parandamist või komponentide asendamist, kuid sellel on olemas arvutatud tõenäosus. Rikete esinemise tõenäosuse, mis kirjeldab toote minimaalset tööaega antud tingimustes ja aja jooksul, ning rikete, nende põhjuste ja tulevaste võimalike rikete lahenduste väljaselgitamise ning kõrvaldamise eest vastutab töökindluse insenerosakond. Tänapäeval on töökindlusel oluline koht ettevõtete tootmissüsteemides, sest see muudab kliendi elu lihtsamaks, andes ligikaudse aja seadme tõrgeteta kasutamiseks, aitab sobitada seadet antud töötingimustele ja nõutavatele parameetritele ning säästab ettevõtte raha, sest korduv garantiiteenus on kallis ja pärast garantiiaega esinevad tõrked kahjustaksid ettevõtte mainet, mis võib mõjutada tulevast kasumit.

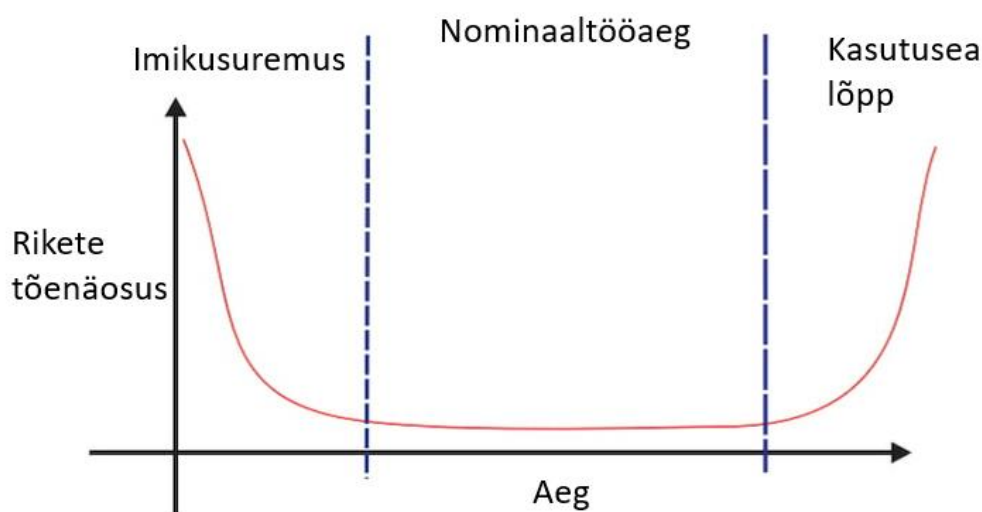
Võimalike rikete prognoosimiseks kasutab töökindluse insener füüsika lähenemise meetodit PoF (Physics of Failure). Selle eesmärk on ennustada, millise ajavahemiku jooksul on rike kõige tõenäolisem ja milline konkreetne komponent on sellega seotud. Rikke tõenäosuse hindamiseks vaadeldakse iga rikke mehhanismi eraldi. Need arvutused nõuavad ulatuslikke teadmisi materjali omaduste ja geomeetria ning keskkonnatingimuste kohta. Arvutused eeldavad arusaamist seadmele mõjuvatest pingetest, nende liikidest ja eeldatava kasutusaja prognoositavast mudelist. PoF-meetodid arvestavad seega võimalikke rikete ja toodetele mõjuvate pingete esinemist, mistõttu eeldatakse, et need on analüüside puhul täpsemad kui muud tüüpi töökindluse prognoosid, kuna need meetodid on kõige tihedamalt seotud toote disaini ja funktsiooniga. Rikkefüüsika jagab tooted kahte sorti - defektsed ja nominaalsed - ja viitab mõningatele rikete põhjustele, mida käsitletakse edaspidi.

Seadme rikke põhjuseid võib olla palju: kõige sagedamini põhjustab rikkeid toote või komponendi kulumine või ülekoormus. Rikete põhjuseks võib olla ka tootmisviga, vale projekteerimine, ebaõiged konstruktsiooniarvutused, ebaõige hooldus, vale seadme kasutamine ja nii edasi. Toodete ülekoormus tähendab, et seadet on koormatud üle

selle tugevuspiiride. Töökindlusega seotud pinged on keemilised, mehaanilised, termilised, elektrilised või kiirguspinged, näiteks temperatuurimuutused, kokkupuude kõrge või madala temperatuuriga, korrosioon, vibratsioon, mehaaniline pinge, vool, pinge, niiskus või kiirgus. Kulumine seevastu ei ole seotud mitte tugevusega, vaid toote vastupidavusega. Töö ajal on seade koormatud, isegi kui see ei ületa nominaalpiiranguid, kuid see koormus mõjub kumulatiivselt. See tähendab, et see kipub kuhjuma ja kui kumulatiivne koormus ületab seadme tugevuse, viib see rikke tekkimiseni ja tekib tõrge.

Samuti on olemas kaks tüüpi valmistooteid - defektne ja nominaalne. Nominaalne toode on võimeline täitma oma ettenähtud kasutusiga koormuste juures, mille jaoks seade on valitud. Defektne toode on toode, mis ebaõnnestub, kui nominaalpinge rakendub defektikohale, mis põhjustab seadme rikke. Defektseid seadmeid on siiski rohkem kui rikkeid. See on tingitud sellest, et mitte alati ei rakendata seadmele pinget, mis piirneb selle nominaalpiiridega, mille puhul jääb defekt avastamata ja seade jätkab edukalt tööd.

Töökindluse terminoloogias kasutatakse rikete sageduse kirjeldamiseks "*bathtub curve*" mõistet.



Joonis 1.1 "*Bathtub curve*".

See graafik näitab, et kui toode on uus, on rikete esinemissagedus ja tõenäosus suur, sest esimest korda, enne tavapärase kasutamise, kogeb toode pinget, mis võivad sageli ületada testimise ajal kogetud pinget. Toodete "imikusuremine" juhtub seadmete transportimisel ja ladustamisel, kus rolli mängivad vibratsioon ja mehaanilised pinged, ning mehaanilised või termilised pinged võivad tekkida komponentidele ka seadme kasutuselevõtu või vale seadistamise ajal. Selleks et vältida nagu nimetatud

"imikusuremust", see tähendab seadme riknemist kohe alguses selle toimimise tõttu, tuleks valida sobivad spetsifikatsioonid, teha konstruktsioonis mõistlikud tolerantsid, rakendada kvaliteedikontrolli tootmises ja teha stressitestid juba arenduse varajases etapis.

Tõrjete intensiivsus toote nominaalse tööaja jooksul väheneb, võib esineda juhuslikku laadi rikkeid, kuid need on seotud ka mitmesuguste ülepingete, ühekordse voolu ülekoormuse, inimliku eksimuse või rikke põhjuseks oli varem omandatud defekt, mis ilmnis alles toote nominaalse eluea jooksul. Väärrib märkimist, et arvestuslik kasutusiga on otseselt seotud süsteemi nõrgima komponendi elueaga, mis ei ole osa plaanilisest asendusteenusest.

Kui eeldatav kasutusiga on lõppenud, väheneb seadme vastupidavus. See põhjustab toote kulumist koormuse ja pikaajalise kasutamise tõttu - komponent rikub, kuna ületab oma ettenähtud tugevust. Rikke intensiivsus kipub suurenema ja tekivad kõikvõimalikud vead.

Ei ole võimalik täiuslikult simuleerida kõiki toodete rikkeohtu olukordi ja projekteerida toodet prognoositavate probleemide põhjal ilma tõrjeteta tulevikus. Rikkeid esineb igal juhul. Nende tõhusaks kõrvaldamiseks ja toodete parandamiseks vajalike parandusmeetmete võtmiseks tuleb testimise abil otsida vigade algpõhjuseid. Järgnevalt käsitletakse testimisprogramme, mis on kavandatud vastavalt PoF lähenemisviisile.

1.1.2 Töökindluse testimine

Testimise põhimõte

Töökindluse testimine on protsess, mis on seadmete testimisprogramm, mille eesmärk on määrata kindlaks konstruktsiooni töökindlus nõutavates keskkonnatingimustes kasutamise ajal eeldatavalt tõrjeteta tööks ettenähtud aja jooksul. Testimine on toodete ja tootmise üldise täiustamise protsessi lahutamatu osa. Eelmises alapeatükis kirjeldatud töökindluse põhimõtete mõistmine toob õigesti rakendades kaasa vähem tõrkeid, luues usaldusväärse toote, mis säästab ka ettevõtte aega ja ressursse.

Töökindluse testimine on testide süsteem, mis hõlmab funktsionaalseid teste, statistilisi teste, keskkonnamõjude teste, töökindluse teste ja ohutuse teste. Lisaks sellele jagunevad testid kahte rühma: ebaõnnestumistestid ja edukustestid. Ebaõnnestumistestid, mille puhul tekitatakse tõrkeid spetsiaalselt piirväärtuste määramiseks, mis on vajalik konstruktsioonivigade avastamiseks ja parandamiseks enne tootmise alustamist, aitavad anda teavet kiiresti ja seega ettevõtte jaoks

kulutõhusalt. Edukustestid, mille puhul tuleb vältida suurt arvu tõrkeid, tehakse sageli pärast seadme muutmist ja need viiakse läbi selleks, et kontrollida seadet lõplikult eeldatavas keskkonnas. Esimesse rühma, see tähendab ebaõnnestumistestidesse, kuuluvad mõned ohutustestid ja enamik töökindlusteste, mille puhul arvutatakse toote kasutusaeg. Teise rühma, see tähendab edukatsetuste hulka kuuluvad funktsionaalsed testid, mida tehakse konstruktsiooni toimivusomaduste kontrollimiseks, statistilised testid, mis vastutavad tootmisprotsesside parandamise eest, ja keskkonnatestid, mille käigus tehakse katsed, et määrata kindlaks seadme toimivus konkreetsetes keskkonnas.

Ideaaljuhul peaks testimisprogramm sisaldama kõiki eespool nimetatud teste ja olema võimeline tuvastama kõiki võimalikke rikkeid enne kasutamist. Muidugi, erinevaid testimisprogramme oleks raske eraldada, kuna nad kõik annavad teavet toote toimivuse ja töökindluse kohta ning neil on sageli ühised nõuded, kuid mõnel neist, eriti keskkonna või ohutusega seotud testidel, on erinõuded.

Testimine on protsess, mis on tähtis teha kõikides etappides. Alustades R&D etapist, järgmist testimist tuleb teha tootmise etapil ja seejärel, pärast toodete poolt läbitud kasutusiga, kui toote on juba ebaõnnestunud rikete tõttu tuleb seda analüüsida. R&D etapi testimise protsess kontrollib, kas konstruktsioon vastab klientide poolt tellitud tingimustele või mitte. Kui testi käigus oli tuvastanud mingisuguse kriitilise rikemehhanismi, ehk esialgse testi analüüs selgus, millised nõrgad küljed konstruktsioonis olemas, siis järgmised testid peavad näitama, et nende rikete tõenäosus, eeldatavates tingimustes ja arvutatud kasutusea jooksul on väga väike. Kui esimene testimise etapp oli edukalt läbitud, siis tegu on järgmise testimise programmiga, tootmise etapi ajal. Nende testide eesmärgiks on kontrollida toodete kvaliteeti ja funktsioone, mis peavad vastutama programmi nõuetele. Lõpuks, pärast seadme surma, test peab tuvastama, kas tegu on defektiga, mis oli varjatud mõnes eelmises etapis või see on loomulik kulum ning seade toimis selle arvestusliku eluea jooksul ootuspäraselt.

Testimise meetodid

Vastavalt toodete tüübile ja uuritavale veamehhanismile valitakse testimismeetodeid, mis koostavad testimisprogrammi. Need on väga olulised toodete toimivuse ning töökindluse määramiseks ja hindamiseks. Käesolevas alapeatükis on esitatud põhilisi meetodeid, mida kasutatakse töökindluse valdkonnas ja käsitletak detailselt nende omadusi.

- Kiirendatud testid (ALT, HALT, HASS): Kiirendatud testid on ettenähtud kiire toodete töökindluse hindamiseks ja analüüsimiseks. Selleks, et kiirendada

vananemisprotsessi ja niimoodi tuvastada kõike võimalikke probleeme, testide käigus luuakse tingimusi, kus seadmetele rakendatakse kõrgeid koormusi. Selliste tingimuste hulgas on kõrge temperatuuri, vibratsiooni, niiskuse katsetused ja muud. ALT (Accelerated Life Testing) on testimismeetod, kus seadme kasutusea staatilise analüüsi abil määratakse selle töökindlust. Kiirendades komponentide vananemist, antud meetod aitab määrata eeldatavat kasutusaega ja tuvastada probleeme ning teha tööd, et võimalikke rikkeid kõrvaldada või minimiseerida. HALT (Highly Accelerated Life Testing): Seda meetodit, kasutatakse seadmete konstruktsiooni nõrkade külgede tuvastamiseks äärmuslikel temperatuuride ja muude mõjutuste tingimustel. HALT meetod aitab kindlaks määrata toodete töökindluse piirid, et tagada stabiilset tööd reaalses töökeskkonnas. HASS (Highly Accelerated Stress Screening): HASS on testimismeetod, mis eeldab, et tooted pannakse kokku stressiteguritega ja see annab võimalusi tuvastada ja parandada rikked tootmise varases etapis. See on oluline, kuna see aitab vähendada tulevaste probleemide riski ja vähendada garantiikulusid.

- Rikete modelleerimine (Arrhenius, Mason): Vigade modelleerimise meetod tuvastab rikete võimalikke mudeleid ja hindab nende esinemise tõenäosust. Arrheniuse meetod: See meetod põhineb aktiivenergia arvutamisel ja eeldab, et keemilise reaktsiooni kiirus suureneb temperatuuri kasvades. Seda meetodit kasutatakse töökindluse testimisel seadme ja selle komponentide kasutusea arvutamisel erinevatel temperatuuride tsüklitel, selleks määratakse termilist kiirendustegurit. Masoni meetod: Masoni meetod kasutab tõrgete statistikat, mis võimaldab määrata süsteemi töökindlust ning prognoosida eluiga. See meetod kogub tõrgete arvu ja tüüpi, analüüsib nende põhjuseid ja see informatsioon võimaldab teha ettepanekuid süsteemi töökindluse parandamiseks.
- Statistiliste andmete põhjal (RDT) saab töökindlust arvutada varasemate dokumenteeritud rikete statistika põhjal. RDT-d kasutatakse töökindluse hindamise ja seadme eeldatava eluea mõõtmise meetodina. Kasutades statistika ajaloo põhjal analüüsi, saab kindlaks määrata seadmete töökindluse ja kasutusaja nõudeid. See meetod sõltub kogu informatsiooni kogumisest kõikide testide käigus, mis teeb selle tõhusaks ja kasulikuks viisiks toote töökindlusnõuete määramisel.
- Elektromagnetiline ühilduvus (EMC): EMC on oluline näiteks sagedusmuundurite elektromagnetilise ühilduvuse hindamiseks. EMV-testimine hõlmab seadmete ja nende komponentide testimist nii nende võime suhtes kiirata häireid kui ka

nende võime suhtes vastu pidada välistele häiretele, samuti hinnatakse toote enda vastupidavust, see tähendab, et toode töötab välismõjude mõjul tõrgeteta.

- Vibratsiooniteste kasutatakse selleks, et hinnata seadme võimet taluda mehaanilisi mõjusid, näiteks komponentide sunnitud ja mitte sunnitud liikumise vibratsiooni või löökide mõjutust. See on vajalik selleks, et hinnata seadmete töökindluse taset ja potentsiaalset kasutusiga realistlikes tingimustes transportimise või ladustamise ajal.
- Temperatuuri- ja niiskustsüklitestid viiakse läbi, et uurida temperatuuri ja niiskustaseme järskude muutuste mõju seadmete töökindlusele. Neid rakendatakse mõlema tingimuse erinevates tsüklites ning siis saadud tulemuste põhjal hinnatakse pingete mõju nende üldisele kasutusajale.

Sagedusmuundurite võimsuse optimeerimise raames kasutatavad meetodid aitavad tuvastada puudusi konstruktsioonis, määrata kindlaks seadme töökindlusnõuded ja hinnata erinevate stressitegurite mõju toimivustulemustele. Need meetodid võivad aidata optimeerida testimis- ja arendusprotsessi, parandades seega toote kvaliteeti ja tõhusust ning aidates samal ajal vähendada tootmiskulusid.

1.2 Testimise keskkond

1.2.1 DRC

ABB tootetestimise hoonet nimetatakse Drive Reliability Center (DRC). Hoone koosneb kahest korrusest, kus kummaski on mitmeid tootetestimise konteinereid. DRCs on olemas protoala, tööriistade ning erinevate kasutatud ja uute komponentide hoiualad. DRC laos on olemas ka tööpinnad erinevate ülesannete täitmiseks. Testimiskonteinerid on DRC hoones peamine tööala, mis tagab tingimusi sagedusmuundurite testimiseks. Konteinerid pakuvad ka võimalusi sagedusmuundurite, elektrimootorite, ventilaatorite ja muude toodete testimiseks. Iga konteiner sisaldab varustust, mida on vaja kõrgetasemeliste katsetuste teostamiseks ja töökindluse või tõhususe kontrollimiseks. Igal testimissüsteemil on ka oma ventilatsioonisüsteem, et hoida vajalikku temperatuuri ja niiskust konteinerites ja DRC-s. Protoala on ette nähtud kabinettide, elektrikilpide ja muude testimisvahendite kokkupanekuks, samuti edasist analüüsi ootavate või juba testitud seadmete hoidmiseks. Kõik vajalikud tööriistad asuvad DRC eri kohtades ja on märgistusega varustatud, et neid oleks lihtne kätte saada. Lõpuks on DRCs olemas lauad, mida kasutatakse erinevate tööde, näiteks jootmise, mõõtmiste, kleepimise ja muude tööde mugavaks teostamiseks. Neid kasutatakse ka seadmete kokkupanemisel.

Oluline on märkida, et DRC-s töötavad kõrgelt koolitatud spetsialistid, kes testivad iga toote enne selle turule viimist, tagades kvaliteedi ja kliendi rahulolu. Kokkuvõttes on DRC oluline rajatis ABB toodete testimiseks ning see on varustatud kõigi vajalike seadmete, tööriistade ja tööruumidega, mis võimaldavad seadmete tõhusat testimist.

1.2.2 Konteinerite komponendid

Sagedusmuunduri testisüsteemides on palju erinevaid komponente, mis varieeruvad süsteemist ja testimise eesmärgist sõltuvalt. Vaatamata nende erinevustele tavaliselt on olemas sellised komponendid nagu:

- Sagedusmuundurid ise või muud tööstustooted.
- Tarkvara tagab testimisprotsessi paindliku ja täpse juhtimise. Tarkvara võimaldab inseneridel seadistada erinevaid parameetreid ja testimisstsenaariume ning analüüsida andmeid, mis lihtsustab vigade ja parandamist vajavate valdkondade tuvastamist.
- Andurid on olulised, et koguda testimise käigus täpset ja töökindlat informatsiooni erinevate parameetrite kohta. Nad annavad inseneridele võimaluse tuvastada võimalikke probleeme, mis võimaldab neil seadme tööd õigeaegselt optimeerida.
- Testkabinetid pakuvad kontrollitud keskkonda õigete testimistingimuste loomiseks ja lihtsat juurdepääsu testitavale objektile erinevates tingimustes. Läbimõeldud testimiskabinetid tagavad võimalikult täpse testimise.
- Elektrisüsteemi varustus: Need on sellised komponendid nagu toiteallikad, signaaligeneraatorid, analüsaatorid jne. Need tagavad testitava seadme parameetrite ja omaduste igakülgse uurimise.
- Testimisprotsessi automatiseerimine arvutite ja juhtimisseadmete abil võimaldab inseneridel kiiresti jälgida testimisprotsessi reaajas kogu testimise ajal, võimaldades vajadusel teha kiireid parandusi.
- Testimiskoormused: simuleerides kunstlikult loodud koormusi, võimaldavad need testida sagedusmuundureid realistlikes tingimustes.
- Kvaliteetsed, õigesti sobitatud kaablid on süsteemi oluline aspekt, tagades töökindla signaaliülekanne testisüsteemi komponentide vahel ja kaitstes samal ajal testimise ajal tekkida võivate häirete eest.

- Mõõteriistad, nagu multimeetrid, ostsilloskoobid ja LCR-meetrid, võivad koguda andmeid ja anda inseneridele teavet seadme parameetrite kohta. See aitab neil tuvastada võimalikke projekteerimisprobleeme ja parandada jõudlust.

Neid komponente ja vahendeid on toodete tõhusaks testimiseks erineval määral vaja. Allpool käsitletakse mõningaid kõige olulisemaid neist:

Sagedusmuundur

Sagedusmuundureid kasutatakse asünkroonmootori pöörlemiskiiruse ja pöördemomendi reguleerimiseks sageduse ja toitepinge muutmise teel. Kasutatakse erinevaid juhtimismeetodeid, näiteks vektorjuhtimist või otsest pöördemomendi juhtimist. See võimaldab sagedusmuunduril pakkuda maksimaalset jõudlust ja tõhusust.

PLC

Programmeeritavad loogikakontrollerid (PLC): PLCd on mikroprotsessoril põhinevad seadmed, mis automatiseerivad selliseid ülesandeid nagu testimine. See seade annab vajaliku paindlikkuse juhtimises, võimaldades jälgida testimisprotsesse, suhelda erinevate süsteemide ja seadmetega ning integreerida erinevaid sisend- ja väljundseadmeid ja võrku teiste süsteemide või seadmetega.

Koormus

Kunstlike koormuste kasutamisel luuakse keskkond, mis simuleerib tegelikke töötingimusi. Need võivad hõlmata elektrilisi, mehaanilisi või termilisi koormusi. Koormusi kasutatakse selleks, et vähendada häirete taset elektrilistes vooluahelates. Sisuliselt toimivad nad filtritena ja lasevad teatud sagedusalasid läbida, mis aitab parandada süsteemi signaalide kvaliteeti. Neid kasutatakse ka voolu reguleerimiseks vooluahelates.

Kabinetid

Testipingid, -kapid või seadme testimise kabinetid pakuvad platvormi testitavatele seadmetele, näiteks sagedusmuunduritele või ventilaatoritele, paigaldamiseks ja nende ühendamiseks. Need konstruktsioonid on vastupidava konstruktsiooniga, et kaitsta peamiselt liigse niiskuse, tolmu või muude tegurite eest, ning neid saab ka spetsiaalselt projekteerida vastavalt eri tüüpi testimisprogrammide erinõuetele. Need võivad sisaldada kaablikanaliseerimist, jahutus-, ventilatsiooni- või maandussüsteeme vastavalt nõutavatele eritingimustele.

1.3 Vahekokkuvõte

Esimeses peatükis käsitleti üksikasjalikult töökindluse tehnoloogia aluspõhimõtteid ning valdkonna probleeme ja eripärasid. Seejärel pöörati tähelepanu süsteemide testimisele, mida kasutatakse seadmete töökindluse kõrge kvaliteedi saavutamiseks. Käsitleti toodete testimise koha peamisi aspekte ja nende süsteemide elemente, nende funktsioone ja rolli üldpildis.

Testitavate seadmete toimivuse ja puuduste parem mõistmine on võimalik saavutada komplekssete testide abil, mis koosnevad funktsionaalsetest, statistilistest ja töökindluse testidest.

Käesoleva peatüki lõpetuseks tuleb märkida, et eespool nimetatud valdkondades saadud teadmised ja kogemused võimaldavad meil rakendada uuritud testimismeetoditel ja -põhimõtetel põhinevaid energiasäästulahendusi. Pärast uuringut on võimalik liikuda järgmistes peatükkides üldmõistete juurest tegeliku praktika juurde. Analüüsides võimalikke probleeme, tuletatakse käesolevas töös nende lahendamise viise, mis annavad konkreetseid mõõdetavaid tulemusi. See võimaldab teha järeldusi ja teha edasisi ettepanekuid energiakulude vähendamiseks sagedusmuundurite testimissüsteemides.

2 ANDMETE KOGUMINE JA ENERGIATARBIMISE HINDAMINE

Käesolevas peatükis keskendutakse peamiselt esialgse tarbimisolukorra saamisele, et leida kõige sobivamad testisüsteemid muudatuste rakendamiseks. Uuringu graafiliste tulemuste saamiseks ja energiakulude hindamiseks vaadeldakse DRC energiatarbimist ajavahemikul 2015-2022.

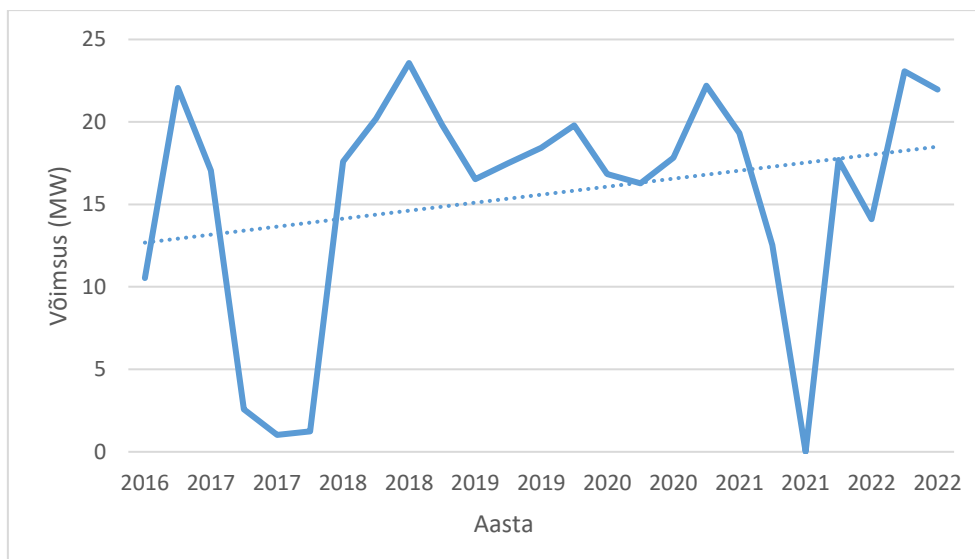
Uuringu alguses tasub pöörduda ABB andmebaasi poole, et määrata kindlaks kõigi olemasolevate testsüsteemide energiatarbimine ja seejärel teha graafikud, mis võimaldavad visuaalselt esitada nende energiatarbimist ja muudatuste vajadust. Seejärel, kui sobiv sihtkatsesüsteem on kindlaks määratud, tuleks selle omadusi, funktsioone ja eripärasid üksikasjalikult uurida ning leida süsteemi kõige olulisemad tarbijad ja mõõta nende tarbimist. Võtmetarbijate, näiteks kütteseadmete, jahutussüsteemide ja kliimaseadmete energiatarbimise mõõtmise teel koostatakse graafikud. Neid graafikuid uurides võib uurida iga tarbija mõju temperatuuritsükli ja hinnata nende rolli süsteemis kui terviku energiatarbimises. Nende vaatluste põhjal tehakse järeldused, mille põhjal on võimalik teha ettepanekuid süsteemi muutmiseks, et parandada energiatarbimist.

2.1 DRC tarbimine

Uuringus analüüsiti 23 testimissüsteemi energiatarbimise andmeid ajavahemiku 2015-2022 kohta, mis võeti ABB andmebaasist. Neid andmeid kogutakse iga kuu, et arvutada ja hinnata ettevõtte igakuiseid rahalisi kulusid, mis tulenevad testimiskeskuse pidamisest.

Nende andmete põhjal analüüsis autor kõige energiakulukamaid süsteeme ja valis välja järgmised viis testsüsteemi, mis näitasid kasvavat suundumust või püsivalt suurt tarbimist: Miami, Coral, Daytona 2, Daytona 3 ja Daytona 4. Nende viie testseadme energiatarbimise graafikuid on võimalik näha osas LISA (vt. L1, L2, L3, L4, L5), kuid allpool on esitatud Daytona 3 graafik näitena.

Samuti on oluline arvestada graafikutes, kui tarbimine on väga madal, sest see ei tähenda, et energiatarbimine oleks selle aja jooksul muutunud paremaks, vaid näitab ainult seda, et konteineris võisid sel ajal olla hooldustööd või et näiteks 2 sagedusmuundurid 10-st võimalikust testiti. Analüüsi eesmärk on juhtida tähelepanu tipptarbimise väärtustele, kui testi teostati täies mahus.



Joonis 2.1 Kogu elektritarbimine testris „Daytona 3“ (aastatel 2016-2022)

Efektivsemate uurimistulemuste saavutamiseks on käesoleva bakalaureusetöö autor otsustanud keskenduda üksikasjalikult viiest eelnevalt valitud testisüsteemist kahele, kus trendijoon ja üldised energiakulu näitajad kipuvad kasvama. Seega, keskendudes kahele testimissüsteemile, on võimalik põhjalikult analüüsida, millised konkreetset muudatused võivad aidata kaasa energiakulude vähendamisele nendes testimissüsteemides.

2.2 Testrite valik uurimiseks

Vaatlusalusteks testimissüsteemideks valiti Daytona 3 ja Daytona 4. Neil on potentsiaali muutmisvajaduse mõttes ja piisavalt suur energiatarbimine, et nad vastaksid uuringus kasutatava testimissüsteemi valikukriteeriumidele.

2.2.1 Testrite süsteemide analüüs

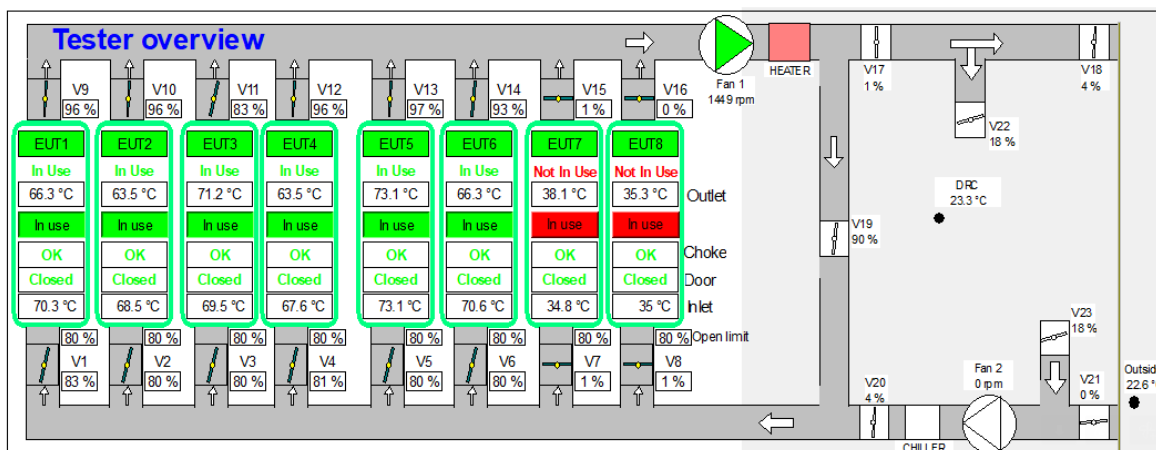
Daytona-seeria süsteemid on temperatuuritsüklilised sagedusmuundurite testimise süsteemid ja DRC-I on Daytona 1, Daytona 2, Daytona 3, Daytona 4 ja Daytona 5 testerid, mida kasutavad meetodit ALT testimises. Selle seeria testisüsteemide temperatuuritsükkel kestab 1 tund, välja arvatud Daytona 2, mille puhul kestab tsükkel 2 tundi. Tsükkel koosneb 2 faasist: tööfaas, kus temperatuur hoitakse 80 kraadi juures, ja jahutusfaas, kus temperatuur on 20 kraadi. Nendes testitakse erinevaid sagedusmuunduri mooduleid, mille suurus on vahemikus R2 kuni R9 (minimaalne suurus on R1, maksimaalne R11).

Edasi analüüsitakse Daytona 3 ja Daytona 4 testisüsteemide funktsioone ja tööpõhimõtteid. Uuring hõlmab nii füüsilisi objekte, st seadmeid testimissüsteemi konteinerites, kui ka tarkvara osa, see tähendab testimissüsteemide algoritmi loogikat, mis rakendab süsteemide temperatuuritsükli.

Daytona 3

Daytona 3 testimissüsteemi konteiner (vt. L16) sisaldab 8 sagedusmuunduri kabinetit, mis on peamiselt mõeldud sagedusmuundurite ühendamiseks toiteallikaga ja testi temperatuuritsükli tingimuste tagamiseks. Konteiner sisaldab transformaatorit, mille ülesanne teisendatakse pinget 500 V-lt 400 V-le, mida kasutatakse moodulite jaoks, vajadusel kasutatakse otse 500 V sagedusmuundurite tööks. Konteiner sisaldab ka drosselkoormusi, mida kasutatakse kunstliku koormusena sagedusmuundurite jaoks, muundades reaktiivenergia. Paigaldatud elektrikilbid sisaldavad erinevaid toiteallikaid, releed, PLC, lüliteid ja muud elektroonikat. Konteineris on sülearvuti, mida saab kasutada testimisprotsessi juhtimiseks kas kohapeal, see tähendab otse konteineris, või ka kaugjuhtimisega. Samuti on seinale paigaldatud kaks sagedusmuundurit ACS380, suurusega R3, mis vastutavad kahe ventilaatorite juhtimise eest, mis töötavad paaris kütteseadmega ja jahutiga. Daytona 3 konteineri välisküljel on ventilatsioonisüsteem, mis koosneb ventilatsioonivõrest, ventilaatoritest, õhureguleerimisventiilidest ning kütte- ja jahutuselementidest, samuti soojuspumbast, mis toimib kliimaseadmena.

Järgnevalt käsitletakse Daytona 3 süsteemi kõikide süsteemi komponentide juhtimisskeemi raames.



Joonis 2.2 Daytona 3 süsteemi visualiseerimise skeem.

Juhtimise visualiseerimine toimub CodeSyS tarkvaras, kus määratakse ja kontrollitakse kõiki Daytona 3 süsteemi erinevaid testimise parameetreid. Ülaltoodud pildil (vt. 2.2) on rohelisega märgitud 8 testikabinetti (EUT1-EUT8), igas kabinetis on

ventilatsioonisüsteemi väljalaske- ja sisselaskeava juures klapp (V1-V16), mille avanemistase on kirjutatud protsentides klapi numbri kõrval. Liikudes edasi paremale, võib näha ventilatsioonisüsteemi, seal on kaks ventilaatorit (Fan 1, Fan 2), kumbki üks jahutus- ja kütteelemendi jaoks, ning klapid (V17-V23), mis tagavad vajaliku õhuvoolu konkreetse tsükli faasi jaoks. Samuti on näidatud kaks temperatuuri andurite väärtusi, esimene (DRC) näitab temperatuuri hoone sees ja teine (Outside) näitab temperatuuri õues.

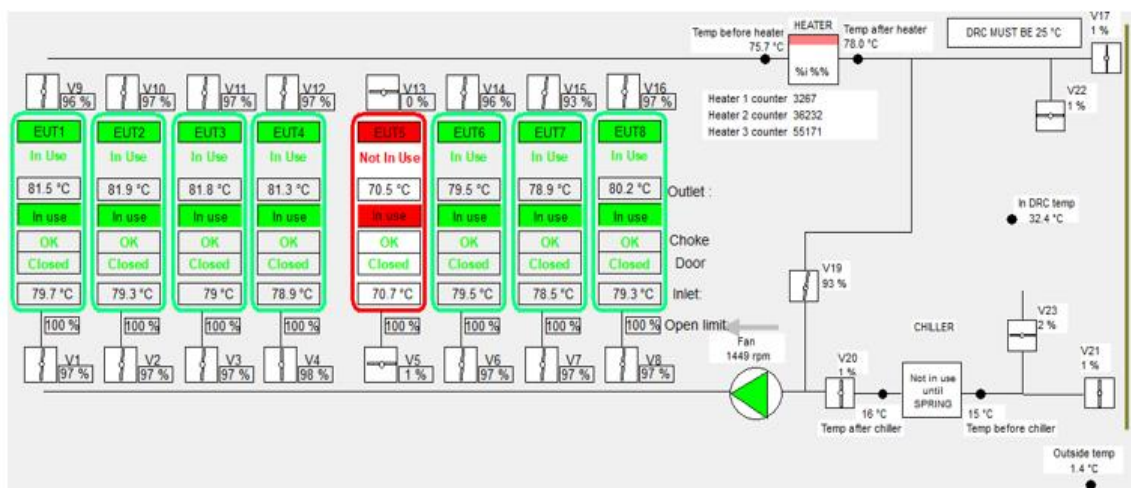
Süsteemi temperatuuritsükkel on järgmine: algab kabinettide küttefaas, mis kestab 40 minutit. Kõik kabinetid, mille sagedusmuundureid testitakse (käesoleval juhul on kabinetid 1-6, 7 ja 8 on märgitud punasega, sest need ei ole kasutusel), on avatud, ventilaator (Fan1) ja mõlemad kütteseadme osad on aktiveeritud, kabinettide õhk suunatakse läbi ventilatsioonisüsteemi edasi, suletud klapp V17 suunab õhu tagasi kabineti ventilatsiooni sisendisse, tekitades seega suletud süsteemi ja soojendades õhku järk-järgult. Kui õhk on saavutanud seatud temperatuuri 80 kraadi, juhitakse liigne soojus välja pooleldi avatud ventiili V17 kaudu ja ülejäänud õhk jätkab ringlemist süsteemis. Üleliigne õhk suunatakse kas DRC-sse, mille eest vastutab ventiil V22, või juhitakse ventiili V18 kaudu väljapoole, mis sõltub aastaajast.

Sellele järgneb jahutusfaas, mille kestus on 20 minutit. Kabineti ventiilid on avatud, ventiil V19 sulgub, takistades ringlust. Õhku tõmmatakse sõltuvalt aastaajast: kui väljas on külm, on sobivam võtta õhk väljastpoolt läbi ventiilide V21 ja V20, sest see hõlbustab jahutuselemendi tööd, ja kui on suvi, tõmmatakse õhk süsteemi läbi ventiilide V23 ja V20. Oluline on märkida, et rõhulanguse vältimiseks juhitakse suurem osa õhust välja sinna, kust see võetakse. Kui õhk on võetud tänavalt, siis juhitakse see sinna, kui õhk on võetud DRC-st, siis juhitakse see samuti DRC-sse tagasi.

Daytona 4

Daytona 4 testisüsteemil on suures osas sarnane konteinerivarustus, kuid on ka erinevusi (vt. L17). Süsteem saab 690 volti, kus 2 trafot muudavad selle 230, 400, 500 ja 690 volti, mis vastavad erinevatele vajadustele. Neid väärtusi saab vahetada kabinettide puhul, mis töötavad 4 kaupa. Sarnaselt Daytona 3-ga on Daytona 4 varustatud 8 testimiskabinettidega, kus toimub sagedusmuundurite testimise protsess, PLC ACS500, mille ülesandeks on juhtida seadmetega koodi põhjal, drosselkoormusega kui testeri kunstliku koormusena, konteineri sees oleva kliimaseadmega koos ventilatsiooni süsteemiga, õhulaskeventiilidega, ventilatsiooni süsteemis oleva kütteseadmega ja jahutiga, nad vastutavad küttefaasi ja jahutusefaasi eest, R3-raamiga sagedusmuunduriga ACS380, mida kasutatakse ventilaatorite juhtimiseks, ja arvutiga, mille abil toimub testimisprotseduuride kohapealne ja kaugjuhtimine.

Järgnevalt käsitletakse Daytona 4 süsteemi komponente juhtimisskeemi raames.



Joonis 2.3 Daytona 4 süsteemi visualiseerimine.

Daytona 4 algoritm on väga sarnane ülaltoodud Daytona 3 algoritmile: 8 kabinetti (EUT1 kuni EUT8), igas kabinetis on 2 klappi ventilatsioonisüsteemi sisse- ja väljavoolu juures, kokku 16 (V1 kuni V16), kuid selle erinevusega, et sisselaskepiirangut ei ole kehtestatud ja klappe võib avada 100% ulatuses. Sama põhimõtte kehtib ka temperatuurikatsetsükli puhul: küttesükli ajal ringleb õhk läbi süsteemi, lülitades vastavalt vajadusele sisse erinevad küttepeldurid tasemed. Jahutusfaasi ajal lülitatakse tsirkulatsioon välja ja õhk võetakse kas väljastpoolt või DRC-st. Peamine erinevus seisneb selles, et küttesfaas kestab selles testris 45 minutit ja jahutusfaas 15 minutit, üldiselt kestab tsükkel samuti 1 tund. Talvel, kui mõõtmisi tehti, ei tööta jahuti ja õhk võetakse tänavalt. Lisaks on kütteseadmel 3 võimsusastet.

Autori poolt uuritud süsteemides testitakse järgmisi moodulite suurusi: Daytona 3 puhul alates R6 mooduli raami suurusest kuni R9-ni ja Daytona 4 puhul testitakse sagedusmuundureid ainult raami suurusega R4.

2.3 Mõõtmiste teostamine

DRC-s saavad kõik testimissüsteemid toidet kohalikust alajaamast ja kasutavad neis olevate seadmete jaoks erinevaid pingeid: 690 V, 500 V ja 400 V. Enamik sagedusmuundureid vajab oma tööks 690 V toiteallikat. Sekundaarseadmed, sealhulgas jahutus- ja küttesüsteemid, vajavad tavaliselt 400V või 500V toite, kuid see sõltub süsteemist ja võib erineda konkreetsete testimiseseadmete või nende komponentide puhul. Mõned sagedusmuundurite moodulid vajavad 500 toidet, samas kui teised sagedusmuundurid vajavad toiteallikana 400V. See sõltub nii seadmete tehnilistest

spetsifikatsioonidest ja nõuetest kui ka testimissüsteemi individuaalsetest omadustest. Kui võetakse arvesse ainult konteineri kogutarbimist, kuid puuduvad andmed süsteemi üksikute komponentide energiatarbimise kohta, ei ole võimalik kindlaks teha süsteemi probleeme ja määrata kindlaks konkreetsete meetmed, mis on vajalikud selle talitluse parandamiseks.

Seepärast on peale mõlema testimissüsteemi omaduste ja tööpõhimõtete uurimist vaja teada süsteemide kõige olulisemate tarbijate energiatarbimist. Samuti on oluline arvestada, et suurema osa süsteemi energiatarbimisest tarbivad testitavad sagedusmuundurid ise ning neid näitajaid ei saa muuta.

Pärast Daytona 3 testeri uurimist leiti, et 3 peamist tarbijat on järgmised:

- Konditsioneer (head pump): selle peamine ülesanne on säilitada optimaalne temperatuur konteineri sees nii soojal aastaajal kui ka talvel. See võib täita nii kütte- kui ka jahutusfunktsiooni. See on vajalik konteineris töötavate inimeste mugavuse tagamiseks ja seadmete jaoks, mis ei tohi üle kuumeneda.
- Kütteseade (heater) vastutab soojendustesti soojusringi programmi küttesfaasi eest, tagades sagedusmuunduri kabinettide programmiga määratud, kontrollitud soojendamise. Kütteseade on jagatud kaheks osaks ja selle võimsusel on kolm astet: 14kW ja 28kW ning 42kW, kui mõlemad osad on sisse lülitatud. Kolmas aste tagab kiire kuumutamise lühikese aja jooksul kohe pärast jahutustsükli lõppu.
- Jahutuselement (chiller) on peamine komponent, mis vastutab testri jahutuse faasi eest. Selline seade jahutab konteineri sees olevaid seadmeid, tsirkuleerides läbi jahuti jahedat vedelikku. Jahuti koosneb kahest koos või eraldi töötavatest osadest, olenevalt sellest, palju osi on vaja sisse lülitada, et tagada vajaliku jahutustase.

Daytona 4 testimissüsteemis on kaks peamist tarbijat:

- Konditsioneer (head pump): konditsioneer ehk soojuspumba peamine ülesanne on säilitada optimaalne temperatuur konteineri sees nii soojal aastaajal kui ka talvel. See võib täita nii kütte- kui ka jahutusfunktsiooni. See on vajalik konteineris töötavate inimeste mugavuse tagamiseks ja seadmete jaoks, mis ei tohi üle kuumeneda. Samuti soojuspump täidab jahuti funktsioone, jahutades kabinette jahutus faasi ajal.

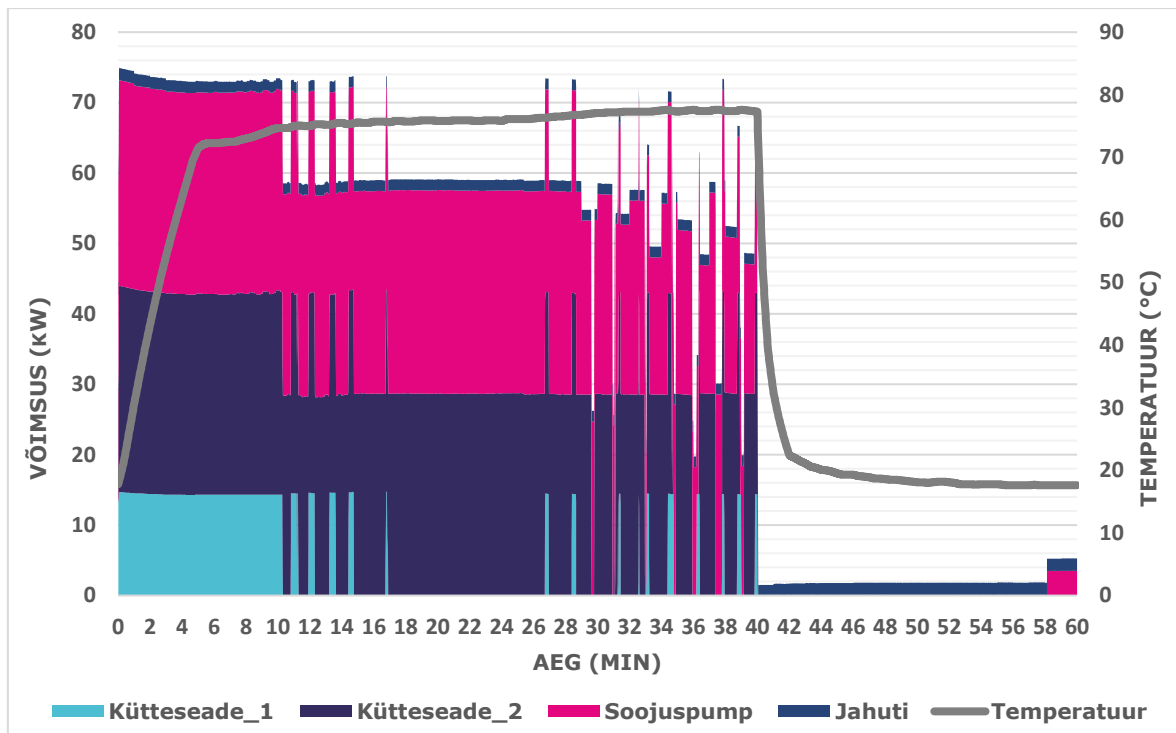
- Kütteseade (heater) vastutab soojendustesti soojusringi programmi küttefaasi eest, tagades sagedusmuunduri kabinetide programmiga määratud, kontrollitud soojendamise. Kütteseadme võimsus koosneb kolmest osast: 14kW, 26kW ja 40kW. See tähendab, et maksimaalne võimsus on 80 kW, kui kõik osad on sisse lülitatud. Kolmas aste tagab kiire kuumutamise lühikese aja jooksul kohe pärast jahutusfaasi lõppu temperatuuritsükli.

Mõõtmiseks kasutati Fluke 435 Series II elektrienergia kvaliteedi ja tarbimise analüsaatorit. Selle mõõteseadmega saab täpselt mõõta ja analüüsida erinevaid elektriparameetreid, kuid selle töö jaoks oli vaja eelkõige pinget, voolu ja võimsust. Fluke 435 Series II multifunktsionaalne analüsaator suudab teha ka palju erinevaid mõõtmisi, sealhulgas harmoonilisi moonutusi, tasakaalustamatust, värelust, üle- ja alajõudu ning energiatarbimise arvutusi. Analüsaator ühendati kolmefaasiliste kaitselülititega, mis on jahuti, kütteseade või soojuspumba erinevad osad, et mõõta süsteemi põhikomponentide tarbimist. Seade kasutas juhtmeid iga faasi pinget mõõtmiseks, samas kui voolu mõõtmiseks kasutati voolulukke, mis jäädvustasid iga faasi ringis. Lisaks tehti ohutuse ja mõõtmise täpsuse tagamiseks maandus- ja neutraalühendused.

Kui testimissüsteem oli jahutusfaasis, peatati see sunniviisiliselt analüsaatori rakendamiseks ja käivitati uuesti, kui seadistamine oli lõppenud. Fluke 435 Series II võimaldab seadistada vajaliku sellel juhul taimerit ja mõõtmiste sagedust. Antud juhul oli seade sisse lülitatud umbes 24 tundi ja mõõtmisintervalliks oli seatud 1 sekund. Peamine parameeter mis huvitas autorit oli võimsus, mida mõõdeti igast valitud tarbijast.

2.4 Tulemuste väljatöötamine

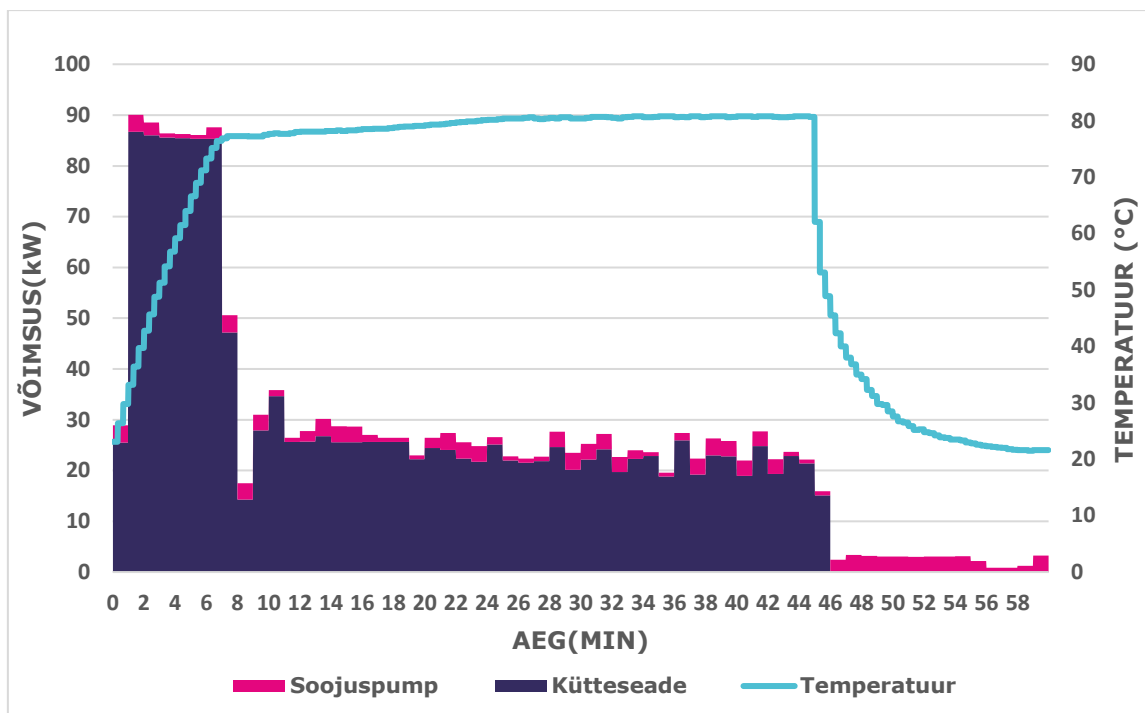
Fluke 435 Series II analüsaatori andmeid töödeldi tootja PowerLog 430-II tarkvara abil. See tarkvara võimaldab analüüsida, visualiseerida ja eksportida suurt hulka andmeid teistesse tarkvaradesse. Pärast andmete töötlemist PowerLog 430 II-s edastati tabel analüüsimiseks Microsoft Exceli tabelisse, kus loodi graafikud, mis näitavad kõigi mõõdetud tarbijate energiatarbimist erinevatel ajahetkedel. Need graafikud võimaldavad visualiseerida testisüsteemi soojusringlust ja vaadelda iga tarbija mõju.



Joonis 2.4 Daytona 3 testimise termotsükkel. (1 tund)

Ülaltoodud graafikul on võimalik jälgida Daytona 3 temperatuurtsükli, kus küttefaas kestab 40 minutit, seejärel läheb jahutusfaas, mis kestab 20 minutit, seega kogu tsükkel kestab 1 tund aega. On esitatud jahuti ühe osa energiatarbimist (jahuti 2 jäeti graafikule lisamata, kuna selle väärtus oli liiga väike, kuna talviseks hooajaks piisab ühest osast jahutist), kütteseadme kahe osa energiatarbimist, soojuspumba energiatarbimist ja testimisetsükli temperatuuri režiimi. Need andmed võimaldavad analüüsida ja võrrelda põhitarijate energiatarbimist erinevatel ajavahemikel koos temperatuuritsükliga, nii et meil on terviklik pilt testimise konteinerit ja selle tarbijate toimimisest.

Selle graafiku põhjal võib teha järgmised tähelepanekud: temperatuuri muutumise joon jahutusfaasis jõuab kiiresti seatud väärtuseni 20 kraadi ja hoiab seda väärtust stabiilselt kuni faasi lõpuni, temperatuurimuutus kuumutusfaasis ei jõua nii hästi seatud väärtuseni 80 kraadi, temperatuurid üle 70 kraadi saavutatakse umbes 5 minutiga, mis on vastuvõetav tulemus, kuid seejärel hakkab temperatuur 74 kraadist aeglaselt liikuma soovitud väärtuse 80 kraadi suunas, saavutades maksimumi. Kuna kuumutusetsükli esimese 10 minuti jooksul töötavad mõlemad kütteseadme osad täisvõimsusel, siis on probleem hoopis teises aspektis. Võimalik, et kiire soojuslekketõttu ei ole kütteekehal piisavalt aega kapi soojendamiseks, mis annab märku kas kütteelemendi ebapiisavast võimsusest või kapi kehvast isolatsioonist. Võimalik, et probleemiks on kütteekeha vale juhtimine, mille tulemusel saavutab küttefaas temperatuuritsükli jooksul nii aeglaselt nominaaltemperatuuri.



Joonis 2.5 Daytona 4 testimise termotsükkel. (1 tund)

Ülaltoodud graafikul on võimalik jälgida, kütteseadme energiatarbimist, soojuspumba ehk konditsioneeride energiatarbimist ja testimisetsükli temperatuuri režiimi. Selliste andmete visualiseerimine on oluline, sest see lihtsustab põhitarijate analüüsimist koos testimisseadme temperatuuritsükliga, mis annab ülevaate iga tarbija rollist ja hinnangu selle hetke energiatõhususe kohta.

Pärast kütteelemendi ja pumba tarbimisandmete saamist ning energiatarbimise graafikute koostamist võib kohe järeldada, et Daytona 4 testeri temperatuuritsükli jahutusfaas toimib halvasti. Nõutavat 20-kraadist temperatuuri ei saavutata, maksimaalne lähenemine vastab umbes 25 kraadile, kuid see väärtus saavutatakse väga aeglaselt, mis viitab kohe probleemile jahutusfaasis. Selle põhjuseks võib olla ebapiisav soojuspumba võimsus või vale seadistus või võib olla probleem ventilatsioonisüsteemi ventilaatoritega, mis ei jahuta süsteemi piisavalt hästi. Soojendusfaasis on asjad paremad: vajalik 80 kraadi saavutatakse 20 minuti jooksul, mis ei ole ideaalne, kuid normi piires on kütmine kiire ja stabiilne.

3 LAHENDUSTE RAKENDAMINE

Käesolevas peatükis käsitletakse meetodite uurimist ja rakendamist, et vähendada energiatarbimist ja parandada Daytona 3 ja 4 testimissüsteemi tõhusust, et vähendada seadmete koormust, mille tulemuseks on optimaalne energiatarbimine. Vaadeldakse võimalikke muudatusi, nende rakendamise põhimõtet, selliste lahenduste eeliseid ja puudusi kõnealuse testisüsteemide ja ettevõtte raames. Lisaks sellele valitakse eelnevalt määratletud testimissüsteemide jaoks kõige asjakohasemad lahendused, uuritakse nende rakenduste põhiaspekte ja teostusprotseduuri. Seejärel on võimalik teostada kavandatud uuendusi ja teha töö käigus järeltööd tulemuste kohta.

Eelmises peatükis esitatud graafikud näitavad, et kõige rohkem energiat tarbivad soojuspump ja kütteseadme mõlemad osad. Mis puutub jahutusseadme töösse, siis selle tarbimine on võrreldes teistega väike ja sellele pööratakse vähem tähelepanu. Selle asemele tuleks keskenduda koormuse vähendamisele ja soojuspumba ja kütteseadme juhtimisalgoritmi jälgimisele, sest nii on võimalik saavutada suurim energia optimeerimise mõju.

3.1 Mis saab parandada situatsiooni?

3.1.1 Isolatsioon

Selle osa peamine eesmärk on välja selgitada soojuspumpade (mis hoiavad elektroonikaseadmete jaoks ideaalset töötemperatuuri 20-22 kraadi) ja kütteseadmete suurenenud energiatarbimise põhjused.

On teada, et kui sagedusmuundurimoodulid töötavad, on nad samuti soojusenergia allikaks konteinerites, nagu ka kütteseadme küttefaasis. Kabinetis on kaks sektsiooni, üks mooduliga ja teine elektroonikaga. Kui esimene peab hoidma temperatuuri vaheldumist 20 ja 80 kraadi vahel, siis teine peab jääma suhteliselt jahedaks, et pikendada sekundaarseadmete elektriliste komponentide eluiga. Ainus asi, mis takistab soojuse vaba väljapääsu kabinetidest, on isolatsioon. See võib aga aja jooksul muutuda ebatõhusaks pidevalt muutuvate temperatuuride, tõusva õhuniiskuse, sagedusmuundurite paigaldamise ajal toimuvate mehaaniliste mõjutuste või loomuliku kulumise tõttu, mille tulemuseks on soojuse kadu.

Soojuskadu võib viia selleni, et kütteseadme ja soojuspump peavad üksteise vastu töötama. See tähendab, et kütteseadme soojendab kappi, et anda moodulitele vajalik temperatuur, kabinetist soojus pääseb konteinerisse, kus soojuspump püüab

temperatuuri vähendada, vältides komponentide ülekuumenemist. Mõlema seadme eeldatav lisakoormus annab esimese võimaliku lahenduse - termoisolatsiooni uuendamine.

3.1.2 Algoritm

Teine oluline aspekt, mis võib oluliselt mõjutada testimissüsteemi energiatõhusust, on testimisalgoritmi optimeeritud juhtimine. Süsteemi töö automatiseerimine tarkvara ja kirjutatud koodi abil toimub soojuse reguleerimise, jahutamise, ventiilide avamise ja sulgemise, mahuti õhuvahetuse, temperatuuriandurite lugemise kontrollimiseks ja nii edasi. Ülaltoodud energiatarbimise graafikud näitavad, et olemasolevad algoritmid on ebatäiuslikud: erinevad kütteseadmete tasemed töötavad ebajärjekindlalt ning lülituvad liiga sageli sisse ja välja. Sellise töörežiimi kadude põhjuseks on suured energiakaod seadme igal käivitamisel, mis mõjutab negatiivselt üldist energiatarbimist, samuti kontrollib algoritm konteineri ventilatsiooniseadmeid, mille töö samuti võib vajada uut juhtimist.

Seega on testimisseadme toimimise optimeerimiseks vaja analüüsida algoritmi, teha vajaduse korral muudatusi selle koodis ning parandada süsteemi kõigi elementide kooskõlastamist ja ühtlustamist. Algoritmi täiustamise tulemusena vähenevad üldised energiakulud, mis mõjutab positiivselt töö tulemuseesmärki.

3.1.3 Jäävuse energia kasutamine

Ühise soojuspumba paigaldamisega kõikidesse DRC-süsteemidesse on võimalik suurendada tõhusust ja optimeerida seadmete jõudlust. Sellise pumba kasutamine võimaldab kuumu ja külma õhu ülekandmist konteinerite vahel, et säästa energiat ja suurendada üldist jõudlust.

Sellise lahenduse eelised:

- + Ühine soojuspump võib oluliselt vähendada energiatarbimist, kuna õhk jaotatakse ümber konteinerite vahel, vähendades seeläbi üksikute jahutus- või küttesüsteemide koormust.
- + Tootlikkuse optimeerimine: Soojendatud õhu ümbersuunamine konteinerite vahel võimaldab ühtlasemat soojuskoormust, kasutades teise süsteemi poolt eelsoojendatud õhku, aidates seeläbi suurendada võimsust.

See süsteem esitab mitmeid probleeme ja võimalikke raskusi:

- Projekteerimise, paigaldamise ja seadistamise keerukus. Ühise soojuspumba edukas rakendamine nõuab keerukat koostoimet mitme konteineri ja süsteemi vahel; see nõuab potentsiaalselt mõningaid projekteerimis-, paigaldus- ja integreerimiskulusid selle keerulise süsteemi puhul.
- Automatiseerimine ja juhtimine: soojuspumba toimimine nõuab keerukat juhtimis- ja automatiseerimissüsteemi, et tagada konteinerite optimaalne toimimine ja nende omavaheline koordineerimine, mis toob kaasa tarkvara arenduskulud.
- Tuleohutus: õhu ümberjuhtimine konteinerite vahel võib olla potentsiaalne tuleohtlik. Seetõttu on väga oluline ette arvestada võimalike hädaolukordade riskiga ja võtta vajalikke meetmeid tuleohtu vältimiseks.

Vaatamata keerukusele on tõhususe seisukohast ühe soojuspumba paigaldamine kõigile DRC-süsteemidele väga efektiivne strateegia energiatõhususe parandamiseks ja seadmete töö optimeerimiseks. Seetõttu tuleks enne sellise lahenduse kasutuselevõtmist üksikasjalikult uurida kõiki võimalikke riske ja süsteemi üksikasju.

Oluline on märkida, et idee kasutada DRC-süsteemides ühist soojuspumpa pakkus välja Soome testimisosakond. Nende kogemustest on teada, et see lahendus võib olla edukas DRC süsteemides testimiseks, sest nende testimisekeskuses on juba õnnestunud sarnast lahendust rakendada, mis ütleb, et seda lahendust on võimalik tulemuslikult rakendada.

3.1.4 Alternatiivne kondenseerumine

Alternatiivne konteineri jahutustehnoloogia hõlmab õhu kasutamist väljastpoolt DRC-d, mida on võimalik juhtida läbi spetsiaalse "akna" või avause. See tehnoloogia kasutab välisõhku konteineri sisemuse jahutamiseks, mis võib vähendada soojuspumpade ja jahutite koormust, vähendades seeläbi energiakulusid. Siiski tasub meeles pidada, et selle lähenemise viisi puhul tuleb arvestada mitmete oluliste punktidega:

- Tulekahju ajal, kui tulekahjuandur käivitub, peab automaatne ventiil või klapp sulguma, et takistada hapniku juurdepääsu ja piirata tulekahju levikut. Samuti peab see süsteem olema integreeritud DRC tulekustutussüsteemiga, et suurendada tõhusust hädaolukordades.
- Õhu filtreerimine: Väljastpoolt võetud õhk võib sisaldada tolmu, saasteaineid ja muid osakesi. Need võivad häirida elektrooniliste komponentide nõuetekohast toimimist. Optimaalse puhtuse saavutamiseks ja elektrooniliste komponentide

eluea pikendamiseks on oluline kasutada filtreid, mis püüavad osakesed kinni enne nende sattumist õhuvarustusse.

- Niiskuskontroll: Välisõhu temperatuuri- ja niiskusekõikumised võivad mõjutada elektroonika töövõimet. Seetõttu tuleb stabiilsete tingimuste säilitamiseks kasutada täiendavaid süsteeme: kütteseadmeid (kui temperatuur langeb alla vastuvõetava taseme, näiteks talvel) ja õhukuivatit.
- Kontroll ja juhtimine. Alternatiivse jahutussüsteemi maksimaalse tõhususe tagamiseks tuleb funktsionaalsus integreerida ja kooskõlastada olemasoleva testi algoritmiga, et tagada optimaalne juhtimine vastavalt jooksvatele tingimustele, nii ilmastikutingimustele kui ka testisüsteemi nõuetele.

Alternatiivse jahutussüsteemi paigaldamine võib oluliselt suurendada konteineri energiatõhusust ja sellise lahenduse rakendamise võimalusele tuleb samuti tähelepanu pöörata.

Samuti tasub mainida mõningaid täiendavaid strateegilisi lahendusi, mis samuti võivad aidata energiatõhusust suurendada. Käesolevas uuringus ei ole autor süvenenud nende põhjalikku käsitlemisse ja analüüsi, vaid on keskendunud lahendustele, mis on otseselt rakendatavad konkreetsete süsteemide, seadmete ja ressursside puhul. Sellest hoolimata väärivad ka need tähelepanu.

Lisa lahenduste hulka kuuluvad: energiatõhusate seadmete kasutamine, soojuse taaskasutamine (soojuse taaskasutamine samas testri süsteemis), tõhus temperatuuri reguleerimine (näiteks arukad andurid või programmeeritavad termostaadid), muutuva sagedusega ajamid (VFD paigaldamine pumpadele ja ventilatsioonisüsteemidele), niiskuse vähendamine tsentraliseeritud kütte- ja jahutussüsteemide abil ning automaatne valgustuse juhtimine.

Oluline on märkida, et need täiendavad lahendusstrateegiad koos juba soovitatud strateegiatega võivad õigesti rakendatuna oluliselt parandada üldist energiatõhusust ja aidata vähendada pikaajalisi energiakulusid.

3.2 Meie lahenduste valik

Teatud probleemide ja ajaliste piirangute tõttu ei ole õnnestunud kavandatavaid muudatusi Daytona 4 testisüsteemis rakendada. Seetõttu keskendutakse edasises arutelus ja lahenduste analüüsis Daytona 3 süsteemile. Järgnevalt jätkub pakutud

lahenduste tõhususe ja nende mõju hindamine energiatarbimisele selles konkreetses süsteemis.

Pärast kõigi võimalike energiätõhususe parandamise ja energiakulude vähendamise võimaluste põhjalikku analüüsi valiti välja kaks peamist lahendust, mis valiti välja nende kohaldatavuse põhjal Daytona 3 süsteemis ja energiatarbimise vähendamise potentsiaali alusel.

1. Isolatsiooni asendamine: Selle lahenduse valimine põhineb asjaolul, et isolatsioon on kriitiline tegur soojuse hoidmisel kabinettides ja mõjutab seega soojuspumpade ja muude seadmete jõudlust. Leiti, et praegune isolatsioon oli aja jooksul kaotanud oma tõhususe, mille tulemuseks olid suured soojuskaod ja vajadus suurendada peatarbijate tööd, et säilitada seatud temperatuur. Isolatsiooni uuendamine tagab parema soojapidavuse, vähendab soojuspumpade ja kütteseadmete koormust ning seega ka energiatarbimist.

2. Testimise algoritmi muutmine: See lahendus valiti praeguse testeri algoritmi ja selle mõju analüüsimisel energiatarbimisele. Märkiti, et kütteseadmed ei tööta piisavalt sujuvalt ja lülituvad liiga tihti sisse ja välja, mis toob kaasa suured energiakahjud. Süsteemis on leitud ka palju puudusi, mis raskendavad kütte- ja jahutusfaaside mõistmist ja seadistamist. Ventilatsioonisüsteemi õhuvoolu juhtimiseks on vaja täiendavaid juhtimissätteid, õhu sissevõtu loogika võiks põhineda välis- ja hoonetemperatuuri võrdlusel ja seeläbi valida, kust on otstarbekam õhku võtta ja kuhu seda välja lasta. Algoritmi optimeerimine võimaldab seadme tööd reguleerida, nii et energia jaotamine süsteemi erinevate komponentide vahel oleks tõhusam ja säästlikum.

Otsustati alustada isolatsiooni uuendamisega, sest see lahendus annab kiireid ja suhteliselt lihtsaid tulemusi, ning alles seejärel jätkata testeri algoritmi optimeerimisega. Nende lahenduste järjestikune rakendamine võimaldab hinnata esimese lahenduse tõhusust ning leida täiendavaid võimalusi algoritmi edasiseks parandamiseks. Kui isolatsiooni uuendamine on lõpule viidud, toimuvad mõõtmised uuesti ja võrreldakse tulemusi eelmiste andmetega, et teha kindlaks energia vähenemise määr. See võimaldab kontrollida valitud lahenduse tõhusust ja teha kindlaks võimalikud sammud edasiseks parandamiseks.

3.3 Tööde teostamine

Selles peatükis vaadeldakse soojusisolatsiooni renoveerimistöode teostamist testimiskabinettides. Kõigepealt tuleb teha vana soojustuse füüsiline ülevaatus, et mõista praegust olukorda ja teha mõõtmisi tulevase soojusisolatsiooni jaoks. Seejärel

tuleks soojuskaameraga teha kabinettidest fotod, et tuvastada peamised soojuslekked kohad. Seejärel valitakse konkreetne soojusisolatsioon ja teostatakse uuendamine.

Need sammud aitavad visandada tööplaani ja viia ülesanne võimalikult tõhusalt lõpule.

3.3.1 Töökeskkonna ülevaade

Nagu varem mainitud, on kabinetide soojusisolatsioonil mõned probleemsed kohad, mis arvatavasti põhjustavad soojuse lekkimist väljapoole. Uksetes, kapide vahelistes seintes on augud, kus jooksevad kaablid, ülemisi ja alumisi kambreid eraldavatel vaheseinadel on kaablite jaoks ettenähtud avad, kuid pärast juhtmistiku paigaldamist ei ole neid auke kunagi suletud. Isolatsioon oli mehaanilise pinge tõttu kahjustatud, vananemine on mõnes kohas mänginud rolli ja soojusisolatsioon oli seinast lahti tulnud või pragunenud ning isolatsiooni kaitsev foolium oli sageli puudu. Näitena on lisatud fotod, mis on võimalik leida osas Lisa (vt. L6, L7, L8, L9, L10).

Samuti võeti vana isolatsiooni mõõtmete ja paigalduskohtade põhjal mõõtmisi, eeldades, et kaabliaukude ja kappide uste detailsemat voorderdamist. Arvutused näitasid, et 8 kapi renoveerimiseks oleks vaja umbes 14 ruutmeetrit isolatsiooni. Tasub märkida, et kuna sagedusmuundureid testitakse paarikaupa kahes kõrvuti asetsevas kabinetis ja nende vahelisele isolatsioonile ei ole mõtet suurt rõhku panna, kuid iga kahe kabineti vahele peab isolatsioon olema hästi installeeritud, sest ka külgedelt võib soojus lekkida. Erilist tähelepanu väärivad ka äärmiste vasakpoolsete ja parempoolsete kabinetide seinad.

3.3.2 Isolatsiooni valik

Kabinetide jaoks õige soojusisolatsioonimaterjali ja parima liimi valimiseks viidi läbi rida katseid, et leida parim kombinatsioon. Uuring viidi läbi Daytona 1 testeriga, kus erinevaid materjale, mis olid liimitud erinevate meetodite ja erinevate liimide abil, katsetati 100 päeva jooksul temperatuuritsüklis 23-85 kraadi. Kasutatud materjalid olid Superwool Plus Paper 5mm ja 3mm ning Kaowool 1260 Paper 8mm. Liimina kasutati kahte proovi Armaflexi ja Cerafelt OG 800. Iga materjali puhul tehti neli katset korraga: iga materjal liimiti kabineti seinale, esimene liim määrati ainult ühele küljele, järgmine proov liimiti mõlemale küljele, samuti teise liimiga (vt. joonis 3.1).

Katse näitas, et Armaflexi liim ei olnud sobiv, kuna see oli liiga viskoosne ja kõvenes liiga kiiresti. Järgmine samm oli materjali valimine, Superwool 8mm otsustati mitte kasutada, sest selle võimalik põlemine põhjustab vähiriski, see tähendab on kantserogeenne. Kahest ülejäänud proovist sellist ohtu ei ole, kuid paigaldamisel tuleb

samuti kanda maski ja kaitseprille. Superwool 3mm osutus liiga õhukeseks ja põles katse käigus ära, mistõttu otsustati kasutada isolatsiooniks Superwool Plus Parer 5mm proovi.



a)

b)

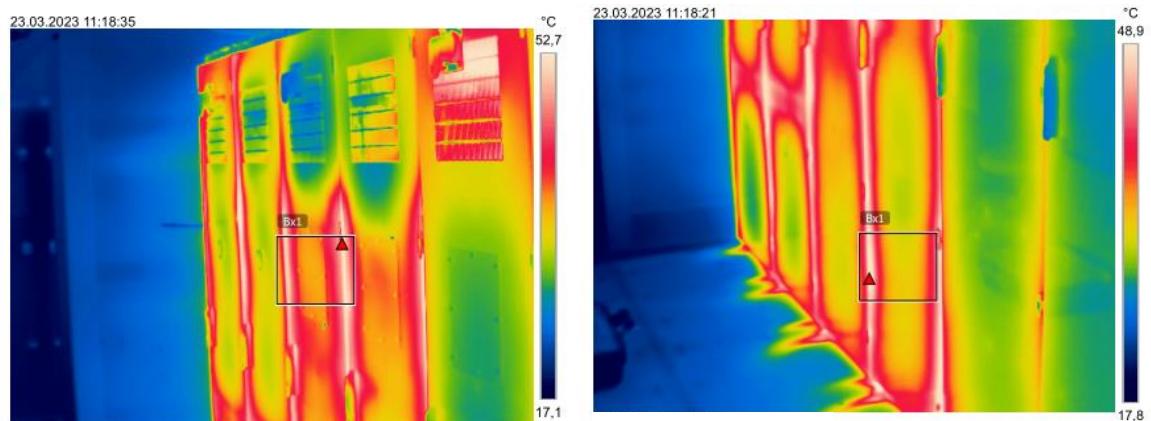
Joonis 3.1 Materjalide proovid konteineris, kus a) proovide paigaldus ja b) proovid pärast testimist.

3.3.3 Isolatsiooni uuendamine

Pärast kabinetide füüsilist ülevaatus osutus õigeks oletus, et isolatsiooniga on tõepoolest probleem.

Selleks, et saada rohkem informatsiooni isolatsiooni seisukorra kohta ja selgitada välja, kus soojust kaotatakse, kasutati soojuskaamerat - nimelt FLIR T440, mis annab kvaliteetset pilti ning laia temperatuurivahemiku informatsiooni soojusjaotuse kohta (antud juhul kabinetide pinnal). Kaamera fotode töötlemiseks ja eksportimiseks kasutasime FLIR Tools tarkvara, mis võimaldab valguse ja värvide reguleerimist ning isegi aruannete koostamist infrapunaga ja ilma infrapunata tehtud piltide kohta.

Soojuskaamera pildid aitasid tuvastada olulise soojuskaduga alasid.



a)

b)

Joonis 3.2 Soojuskaamera abil tehtud kabinetide pildid, kus a) kabinetide ülemine osa b) kabinetide alumine osa.

Termokaamera fotode analüüs näitas, et suurim soojuskadu toimub kabinetide uste juures. Lahtisest soojusisolatsioonimaterjalist tingitud tühimikud nende ümber põhjustasid intensiivset soojuskadu. Seega pöörati soojustuse uuendamisel kõige rohkem tähelepanu just nendele kohtadele, sest piltidel on näha rohkeid soojuskadusid põrandal ja lünki kontorites.

4 TULEMUSTE ANALÜÜS

4.1 Tulemuste võrdlus

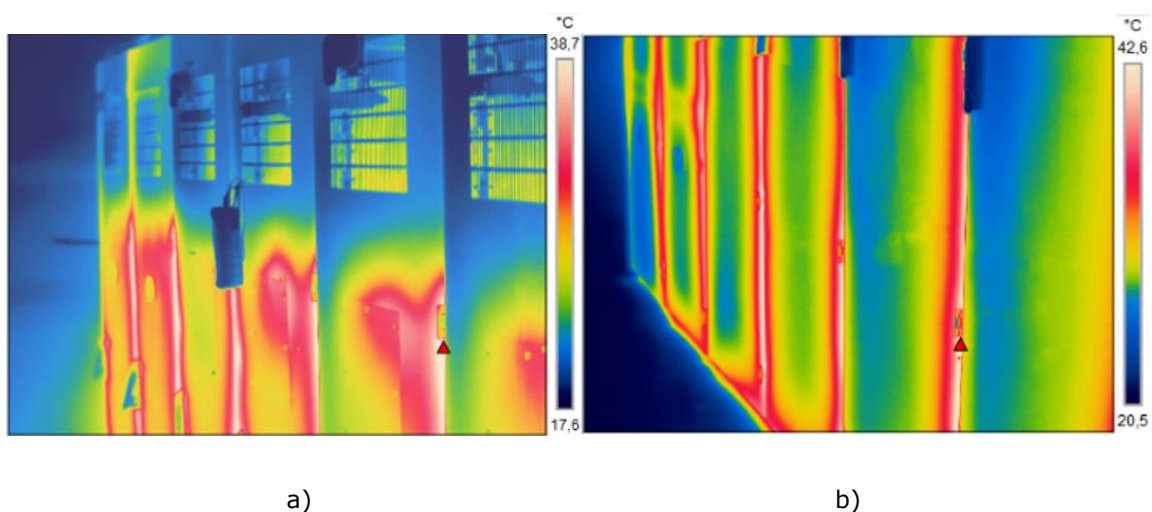
4.1.1 Füüsiline ülevaade

Isolatsiooni uuendamisel keskenduti kõigile eelnevalt uuritud soojuslekkedele. Kaablite kohale paigaldati raudplaadid ja maksimaalse tõhususe tagamiseks paigaldati kummitihendid. Ukse ühenduskohtadesse valati isolatsioonivaht, et tagada parem kaitse soojuslekkede vastu. Kõik tööde tulemused on näha osas Lisad (L11, L12, L13, L14, L15).

Iga ruumi soojusisolatsiooni uuendamiseks kulus umbes kaks nädalat.

4.1.2 Termokaamera pildid

Pärast soojusisolatsiooni väljavahetamist tehti termokaameraga uuesti pilte, et uurida, kas kontoritest on muutunud soojuslekked.

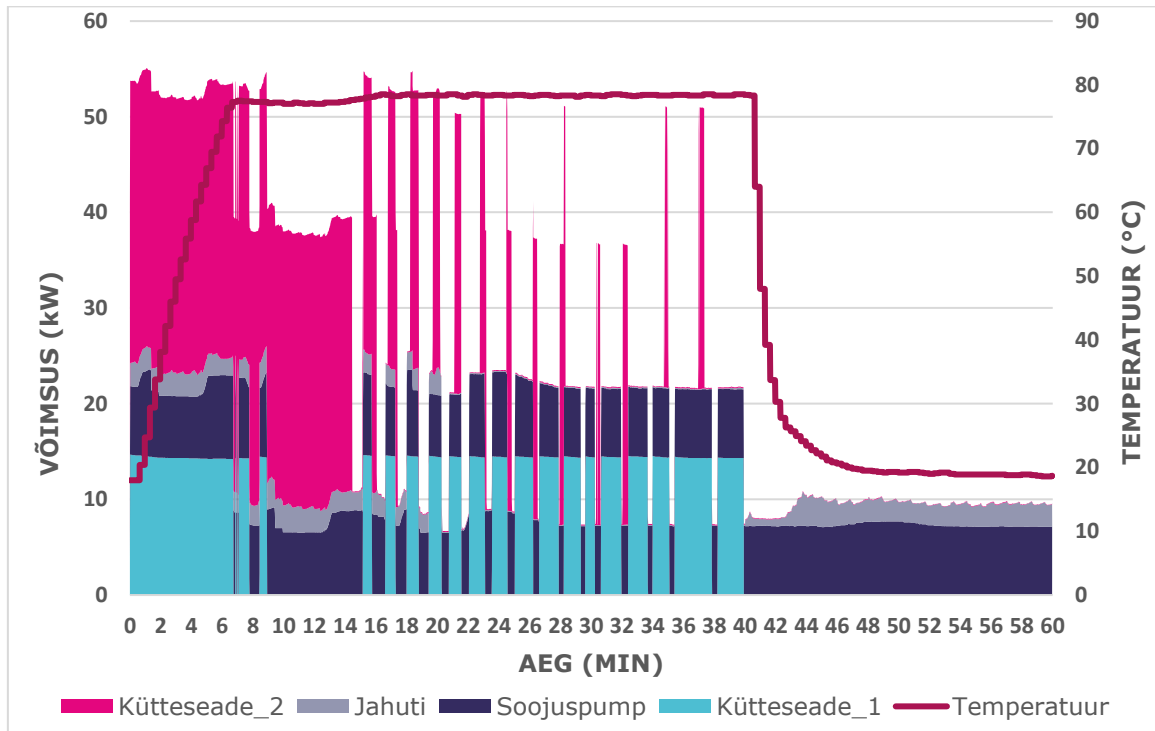


Joonis 4.1 Soojuskaamera abil tehtud kabinetide pildid, kus a) kabinetide ülemine osa b) kabinetide alumine osa.

Nagu on näha fotodel, kus a) kujutab kabinetide ülaosa ja b) kabinetide alaosa, on temperatuuripiik kahel fotol pärast soojusisolatsiooni uuendamist märgatavalt madalam kui eelmistel fotodel (vt. joonis 3.2). Suurt lekkeid põrandal ei ole enam näha ja kabinetide uste vahelised lekkeid ei ole enam nii tugevad, mis näitab soojustuse renoveerimise lahenduse positiivseid tulemusi.

4.1.3 Mõõtmised pärast isolatsiooni vahetust

Testi kabinettide soojusisolatsiooni renoveerimistöde lõpetamise käigus mõõdeti tarbijate energiatarbimist energiaanalüsaatoriga, mis võimaldas võrrelda tulemusi enne ja pärast selle lahenduse rakendamist.



Joonis 4.2 Daytona 3 testimise termotsükkel pärast isolatsiooni uuendamist. (1 tund)

Antud graafik näitab süsteemi peamiste tarbijate, näiteks 2 kütteseadme osa, jahuti, soojuspumba või kliimaseadme elektritarbimist, samuti temperatuuri graafikut mõõtmise ajal. Võrreldes eelmise graafikuga (vt joonis 321), on näha mõningaid positiivseid muutusi: kütteseadme võimsam osa (28 kW) töötab nüüd 15 minutit ilma väljalülitamata, võrreldes varasema 30 minutiga, ja väiksem osa töötab 10 minuti asemel 7 minutit; muutus nende töös on märgatav ka temperatuurigraafikul: kütmine on palju kiirem ja tõhusam ning juba 16. minutil saavutab temperatuur soovitud väärtuse 80 kraadi Celsiuse järgi, varasema 28 minuti asemel ja säilitab selle, lülitades edasise kütmise sisse. Siiski tuleb märkida, et jahutusprotsess on veidi aeglasem, kuid sellest hoolimata on soovitud temperatuur 20 kraadi stabiilsem ja selle väärtusele lähemal. Isolatsiooni uuendamise kõige olulisem mõju on olnud soojuspumbale: selle energiatarbimine on vähenenud umbes 3 korda, mis mõjub energiatarbimise pildile tervikuna väga positiivselt. Külmi energiatarbimine on suurenenud, mis on kliimamuutuse tagajärg, sest ilmastikutingimused on muutunud soojemaks kui eelmise graafiku tarbimise mõõtmise ajal.

4.1.4 Energiatarbimise võrdlus

On aeg hinnata tehtud muudatuste tulemusi. Energiatarbimise arvutused tehti järgmiselt: kuna tarbimisandmed võeti iga sekundi järel ja tsükkel kestab 1 tund, siis on olemas 3600 võimsuse väärtust kilovattides, need väärtused tuleb summeerida ja jagada 3600-ga, nii saadakse testeri tarbimine kilovatt-tundides.

Tabel 4.1 Energiatarbimise võrdlus.

	Tarbimine enne isolatsiooni uuendamist	Tarbimine pärast isolatsiooni uuendamist
Kütteseade(14kW), kW·h	3,37	6,18
Kütteseade(28kW), kW·h	18,28	9,68
Soojuspump, kW·h	18,38	7,43
Jahuti, kW·h	1,60	1,52
Kokku, kW·h	41,63	24,82

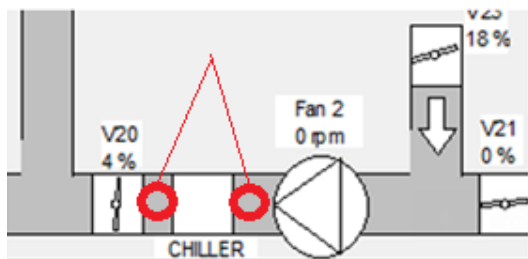
Seega võib järeldada, et soojusisolatsiooni uuendamise tulemusena suurenes väikese kütteseadme tarbimine 2 korda, samas kui võimsama kütteseadme tarbimine vähenes 2 korda, soojuspumba või kliimaseadme tarbimine vähenes 2,5 korda ja jahuti tarbimine vähenes ebaoluliselt. Testimissüsteemi tarbijate kogu energiatarbimine töötunni kohta vähenes 1,68 korda, see tähendab 60% võrra, mis on selle uuringu jaoks hea tulemus.

4.2 Edasised tegevused

Teostati oluline muudatus sagedusmuunduri testimissüsteemis, nimelt võeti kasutusele uus soojusisolatsioon ja selle parem paigutus, analüüsides soojuslekkekohti, mis kahtlemata mängis olulist rolli kogu süsteemi tõhususes. Täiendused ei lõpe siinkohal, sest nende jaoks on alati võimalusi, järgnevalt vaadeldakse konkreetseid samme, mis oleksid samuti kasulikud kõnealuste sageduskonverterite katsesüsteemide energiatarbimise optimeerimiseks, mis ainult täiendavad käesolevas töös valitud süsteemi täiustamise lahendust.

Esimene asi, mis tekitas kohe rahulolematust, oli jahutuselemendi töö reguleerimine. Kuna on olemas ainult ligikaudne temperatuur, kus võetakse õhku, tekitab see mitmeid probleeme. Kui tester töötab, ei saa isegi täpselt öelda, kas jahuti töötab või mitte, ja kui jahuti töötab, siis kui tõhusalt ta oma tööd igal ajahetkel teeb.

Lahenduseks on paigaldada jahutusseadme sisse- ja väljavoolule täiendavad temperatuuriandurid. Kõige sagedamini kasutatakse selleks otstarbeks PT100-andureid, mida saab lugeda PLC-ga ja mille näidud on piisavalt täpsed. Paigaldades andurid joonisel 4.3 näidatud viisil, annaks see täpsema pildi jahuti toimimisest süsteemis, võimaldades vajaliku temperatuuri seadistada vastavalt vajadusele ja jahutit õigeaegselt hooldada.



Joonis 4.3 Daytona 3 süsteemi skeemist võetud jahuti osa.

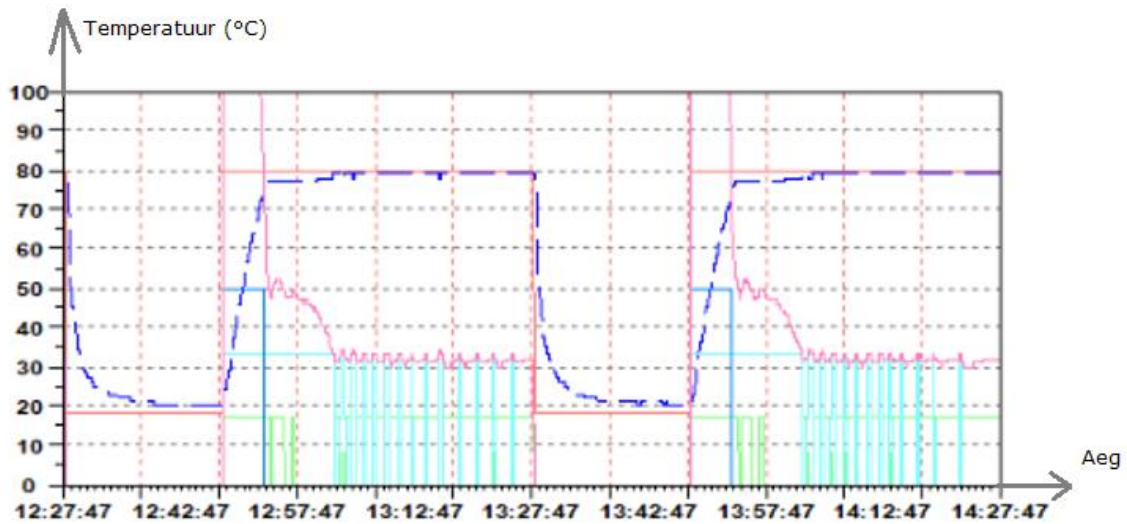
Teine samm on muuta kütteseadmete tööd. Kütteseadme ja selle võimsustasemetega reguleerimine seisneb temperatuuri erinevuse väärtuse reguleerimises, see näitaja kirjeldab, kui palju erineb praegune temperatuur nõutavast temperatuurist. Kui näitaja väärtus (roosa liin vt. joonis 4.4) on suurem kui 50 kraadi kuni 999, lülituvad mõlemad kütteseadme osad sisse, tagades kabinettide kiireima kütmise, näiteks kohe jahutusfaasi lõpus. Seejärel tõmbub temperatuur aeglaselt küttefaasi jaoks vajalikule 80 kraadile ja kütteelemendi mõlemad osad lülituvad üksteisest eraldi sisse: kui temperatuuride vahe näitaja väärtus on 33-49 kraadi, lülitub sisse võimsam osa (28kW), kui temperatuuride vahe näitaja väärtus on 21-32 kraadi, siis lülitub sisse ainult väike osa (14kW). Kui näitaja vahe on kõrgem, siis kütteseadmeid ei tööta.

Mida kauem kestab küttefaas, seda rohkem soojendavad ja varustavad end soojusega sagedusmuundurid, seda vähem on vaja kütteseadme abi.

Isolatsiooni parandamise järgne graafik näitab (vt. joonis 4.4), et mõlemad kütteseadme osad kipuvad sageli sisse ja välja lülituma, mis samuti põhjustab tarbetut energiatarbimist, ning graafik näitab ka seda, et mida kauem töötavad sagedusmuundurid, seda harvem lülitub sagedusmuundurite soojus sisse, mis on tingitud sagedusmuundurite omast soojusest. Ideaalis peaks süsteem põhinema sellel omadusel. Kütteseadme osad ei ole seotud vasakpoolse temperatuuriskaalaga.

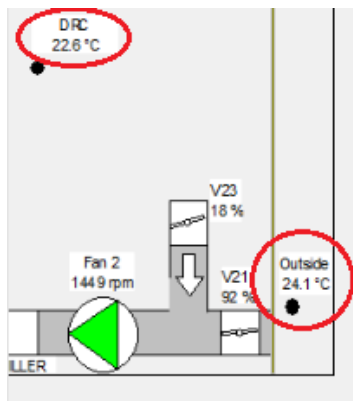
Selleks, et vähendada kütteseadme lülitussagedust ja seega ka eeldatavat energiatarbimist, tuleb üle vaadata kütteseadme võimsuse lülitusloogika. Tuleks katsetada temperatuuri erinevuse piirväärtuste reguleerimist, klappide avamist ja sulgemist, kütteseadme osade vahetamist või isegi kütteseadme taimeri

seadistamist, mille järel temperatuur jõuab soovitud väärtuseni ja kõik kütteseadmed võivad välja lülituda, säilitades temperatuuri sagedusmuundurite poolt tekitatud soojuste juures.



Joonis 4.4 Daytona 3 algoritmi loogika töö visualiseerimine CodeSys-is, kus näidatud temperatuuri liin (sinine), temperatuuri vahe näitaja (roosa liin), väiksema kütteseadme osa (roheline liin) ja suurema kütteseadme osa (helesinine liin).

Tähelepanu väärrib ka paar täiendust testimiskabinettide ventilatsiooni juhtimisse. Idee seisneb selles, et võrrelda temperatuuri väljaspool ja seespool DRC-d ning võtta kõrgemat temperatuuri küttefaasiks ja madalamat temperatuuri jahutusfaasiks (vt. joonis 4.5). Siiski tuleb silmas pidada, et rõhulanguse vältimiseks hoones tuleks püüda säilitada loogika, et kui õhk võetakse tänavalt, siis juhitakse see väljapoole; kui see võetakse RDC-st, siis juhitakse see RDC-sse. Näiteks talvel, jahutustsükli ajal, on mõistlikum võtta tänavalt juba jahutatud õhku ja lasta kuum õhk DRC-sse, soojendades seda, sest kütet ei ole ette nähtud. Arvestades, et väljas on miinustemperatuur, võtaks õhu sissevõtmine aega umbes viis minutit, mille jooksul ei oleks rõhulangus märgatav, kuna DRC-s on ka kanalid üleliigse õhu jaoks. Ja suvel, kuna hoone ise on sageli kuumem kui õues, kuna kõik testitavad moodulid tekitavad soojust, on mõistlik võtta õuest õhku ja lasta see ka sinna.



Joonis 4.5 Daytona 3 süsteemi skeemist võetud osa, kus on võimalik näha temperatuuri väärtusi õues ja hoones.

Selle ventilatsioonisüsteemi loogika rakendamiseks tuleks süsteemi klapid seadistada nii, et need töötaksid DRC-süsteemi kindlaksmääratud temperatuuri alusel, näiteks 25 kraadi, kuni selle temperatuuri saavutamiseni peaks kuum õhk sisenema hoonesse kütmise eesmärgil, kui vajalik temperatuur on saavutatud, tuleks üleliigne õhk väljutada väljapoole. Selle lahenduse seadistamise eest vastutavad ventiilid V17, V21, V22, V23. Neid juhib PLC ja lihtne kood on kirjutatud CodeSySis.

Nende täienduste sisseviimisel süsteemi oleks seda lihtne seadistada ja jälgida, kasutada tõhusalt ära jääsoojust ning see oleks rohkem energiasäästlikum.

KOKKUVÕTE

Käesolev bakalaureusetöö keskendub energiatarbimise optimeerimisele ABB sagedusmuundurite testimissüsteemides. Töö eesmärk oli uurida võimalikke lahendusi ja nende rakendamise samme testimissüsteemides, et vähendada testrite energiatarbimist.

Töös käsitleti üksikasjalikult töökindluse ja testimise mõisteid, testimise eesmärke ja meetodeid, uuriti ettevõtte enda spetsiifilist keskkonda ja sagedusmuundurite testimissüsteemi peamisi komponente.

Seejärel uuriti erinevate testisüsteemide energiatarbimist, et leida käesoleva töö jaoks sobivad muutuste leidmiseks ja rakendamiseks sobiv keskkond. Selgitati välja peamised energiatarbimise tarbijad ja uuriti nende omadusi. Samuti tehti nende mõõtmised ja koostati ettekujutus kõnealuste testimissüsteemide energiatarbimisest.

Selgitati välja võimalikud lahendused selle ettevõtte jaoks ja käsitleti neid põhjalikult, valiti välja lahendus - testimiskabinettide soojusisolatsiooni uuendamine ning kirjeldati selle süsteemi rakendamise protsessi. Kirjeldati soojusisolatsiooni uuendamise rakendamise tingimusi, valiti sobiv soojusisolatsioon ja arutati teostatud tööde põhiaspekte.

Lõpuks uuriti süsteemis tehtud muudatuste tulemusi, võrreldi tulemusi süsteemi uute mõõtmistega ning tehti detailsed ettepanekud süsteemi toimivuse täiustamiseks. Lisaks järeldati, et süsteemi energiatõhusus paranes ühe temperatuuritsükli jooksul 60% võrra, mis on käesoleva töö eesmärgi positiivne tulemus.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] <https://new.abb.com/drives/highlights-and-references/reliability-for-speed-drives> [Kasutatud 24.02.2023]

- [2] <https://new.abb.com/drives/highlights-and-references/why-do-variable-speed-drives-fail-and-how-do-we-test-them> [Kasutatud 24.02.2023]

- [3] <https://www.energy.gov/eere/uniform-methods-project-determining-energy-efficiency-program-savings>, 2018
Saadaval: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70472.pdf>
[Kasutatud 08.03.2023]

- [4] <https://www.energy.gov/eere/uniform-methods-project-determining-energy-efficiency-savings-specific-measures>, 2017 [Kasutatud 08.03.2023]

- [5] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9836924>, 2017
[Kasutatud 16.03.2023]

- [6] Raamat „Practical Reliability Engineering 5th Edition” – Patrick D.T. O`Connor, Andre Kleyner, 2012
Saadaval: <https://www.technicalbookspdf.com/practical-reliability-engineering-fifth-edition-patrick-d-t-o-connor-andre-kleyner/> [Kasutatud 30.03.2023]

- [7] Tehniline teatis „Reliability Test Methods”– Andreas Mueller , 2020
(Siseallikas ABB) [Kasutatud 16.03.2023]

- [8] <https://www.fluke.com/en-us/product/electrical-testing/power-quality/434-435>
[Kasutatud 16.03.2023]

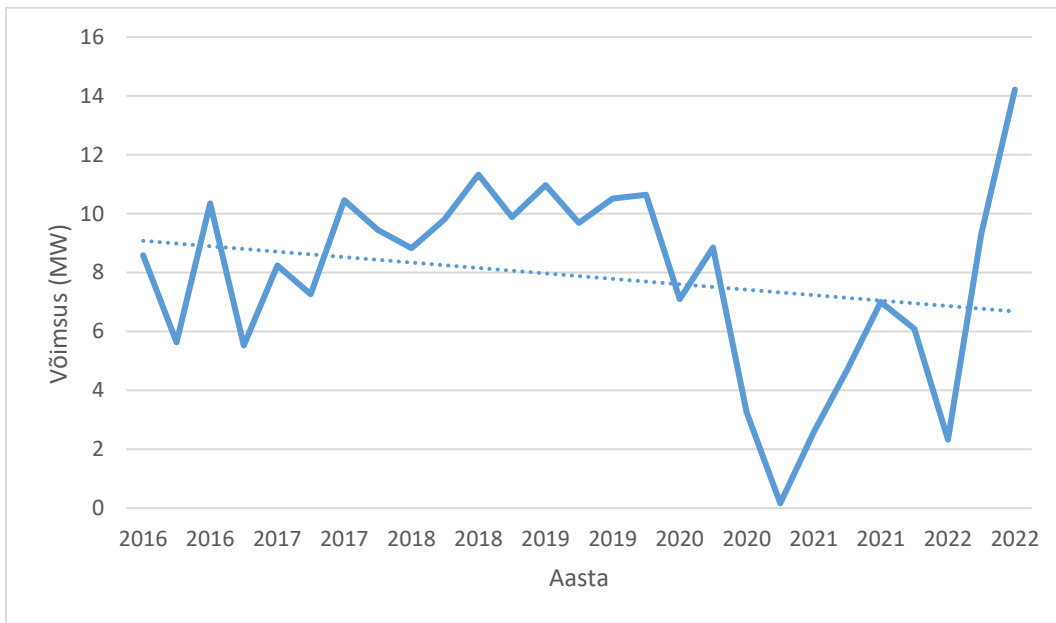
- [9] <https://www.tequipment.net/FLIRT440.html> [Kasutatud 02.04.2023]

- [10] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919303514>, 2021
[Kasutatud 30.03.2023]

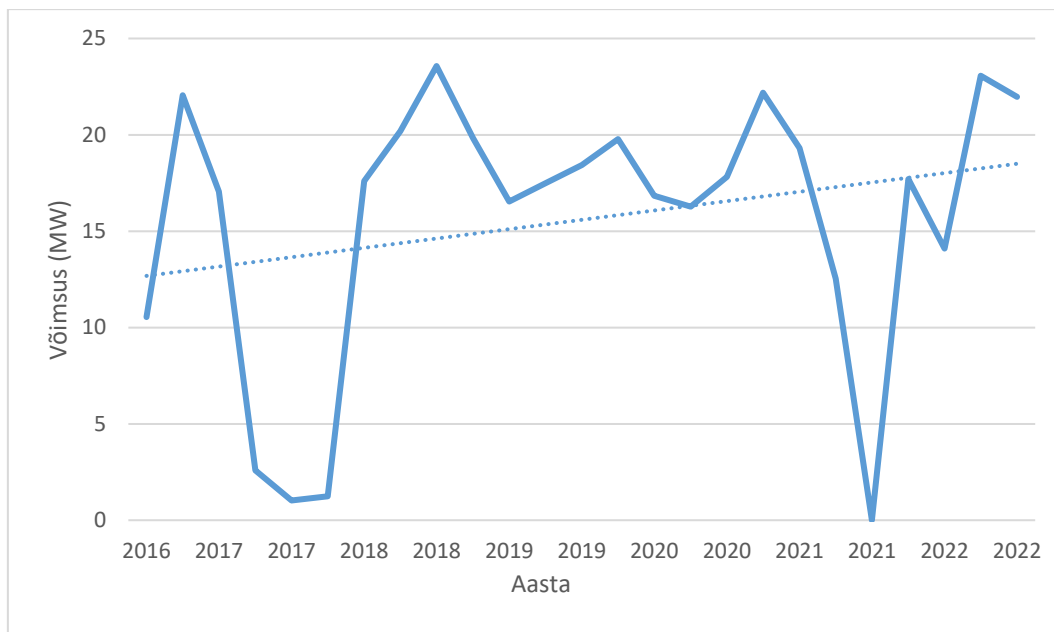
- [11] <https://www.kdmsteel.com/electrical-enclosure-insulation/#:~:text=in%20electrical%20enclosure-,What%20is%20the%20Best%20Material%20for%20Thermally%20Insulated%20Electrical%20Enclosure,a%20thermally%20insulated%20electrical%20enclosure.> , 2019 [Kasutatud 30.03.2023]
- [12] https://www.researchgate.net/publication/224258647_System-level_reliability_testing_a_frequency_converter_with_simultaneous_stresses [Kasutatud 16.03.2023]
- [13] <https://drives.ru/stati/chastotnye-preobrazovateli/> [Kasutatud 30.03.2023]
- [14] http://www.ceneast.com/wp-content/uploads/2020/09/Books/Textbook_Energy_efficiency_in_engineering_systems_KSTU_RU.pdf, 2014 [Kasutatud 10.04.2023]
- [15] Raamat „Reliability Engineering Handbook“ – Dimitri B. Kececioglu Saadaval: <https://ndesoneandik.files.wordpress.com/2012/04/dimitri-kececioglu-reliability-engineering-handbook-vol-1.pdf>, 2012 [Kasutatud 10.04.2023]
- [16] <https://library.abb.com/r?cid=9AAC910006&q=Test%20systems> (Siseallikas ABB) [Kasutatud 08.03.2023]
- [17] <https://magazine.neftegaz.ru/articles/avtomatizatsiya/549699-optimizatsiya-energopotrebleniya-i-kachestva-produktsii-tehnologii-modelirovaniya-ot-yokogawa/>, 2020 [Kasutatud 30.03.2023]
- [18] <https://insideplus.abb.com/ee?searchQuery=drives%20testing> (Siseallikas ABB) [Kasutatud 30.03.2023]
- [19] <https://www.sofeast.com/knowledgebase/why-product-reliability-testing-is-a-must-during-product-design-podcast/> (Podcast) [Kasutatud 25.03.2023]
- [20] <https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/energy-performance-monitoring-and-optimization-2022>, 2022 [Kasutatud 05.04.2023]

LISAD

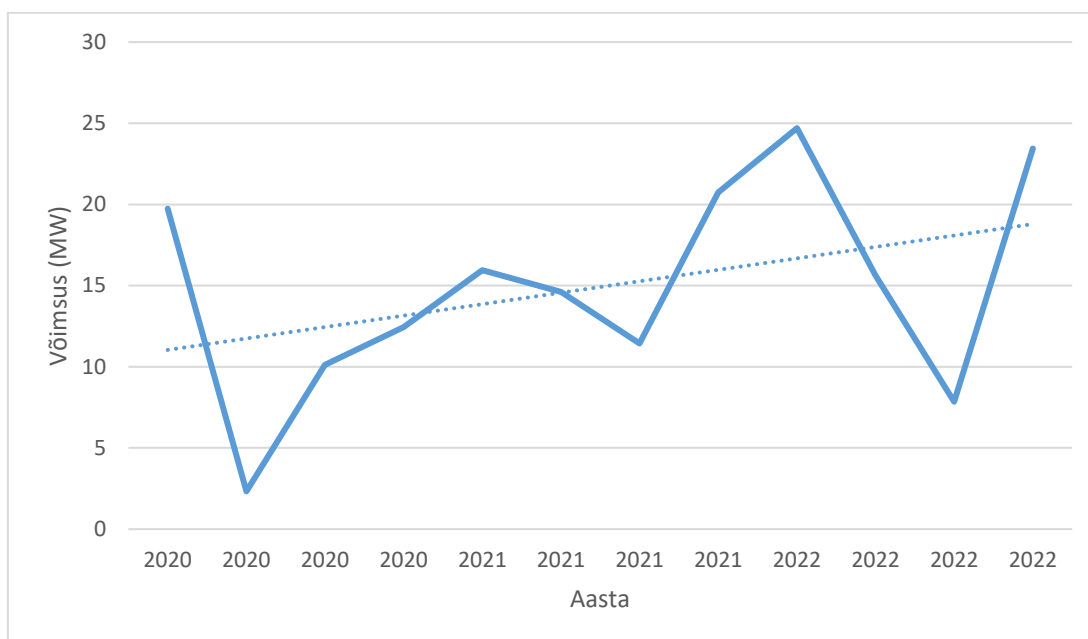
Lisa 1 Testeri „Daytona 2“ energiatarbimine aastatel 2016-2022



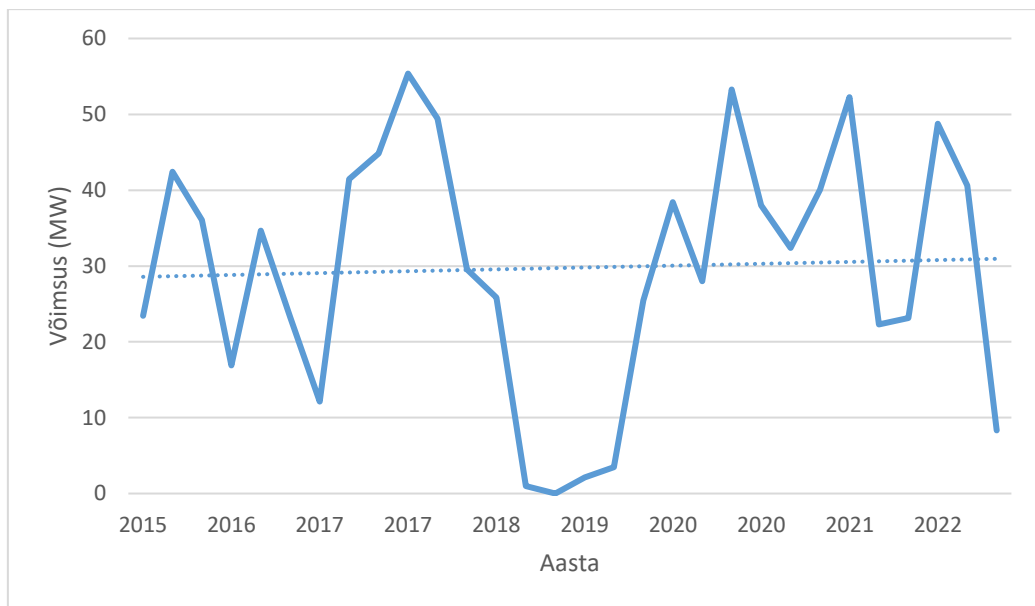
Lisa 2 Testeri „Daytona 3“ energiatarbimine aastatel 2016-2022



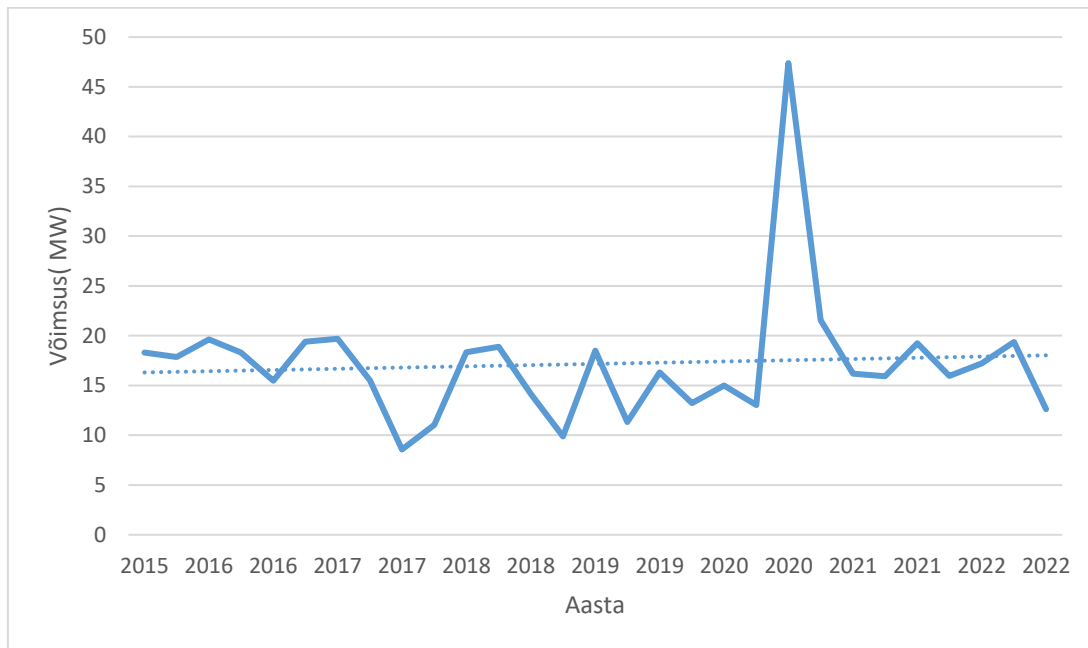
Lisa 3 Testeri „Daytona 4“ energiatarbimine aastatel 2020-2022



Lisa 4 Testeri „Miami“ energiatarbimine aastatel 2015-2022



Lisa 5 Testeri „Coral“ energiatarbimine aastatel 2015-2022



Lisa 6 Testeri „Daytona 3“ kabinettt



Lisa 7 Testeri „Daytona 3“ kabineti ülemine osa



Lisa 8 Testeri „Daytona 3“ kabineti ülemine osa



Lisa 9 Testeri „Daytona 3“ kabineti ülemine osa



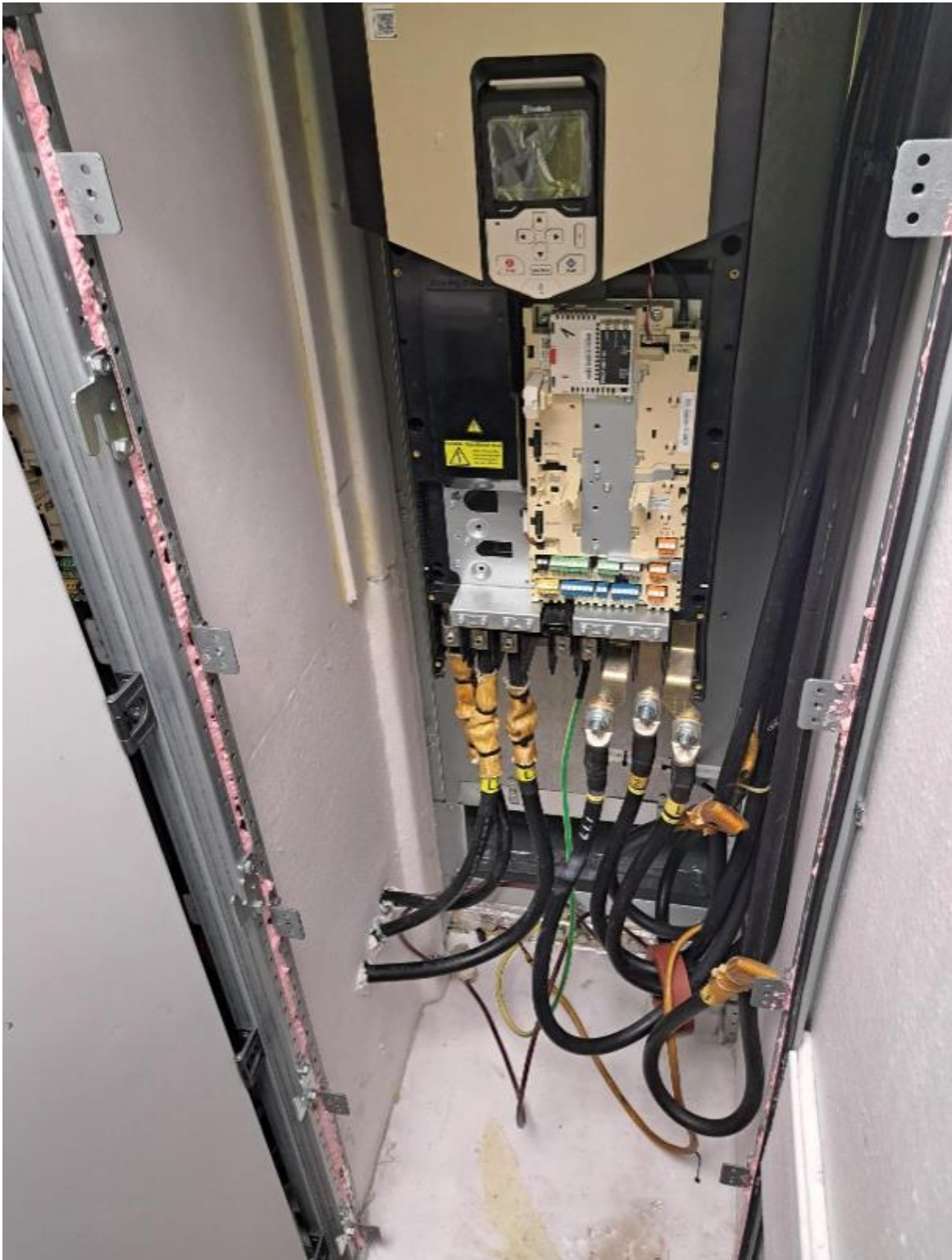
Lisa 10 Testeri „Daytona 3“ kabineti ülemine osa



Lisa 11 Testeri „Daytona 3“ uuendatud kabinet



Lisa 12 Testeri „Daytona 3“ uuendatud kabineti ülemine osa



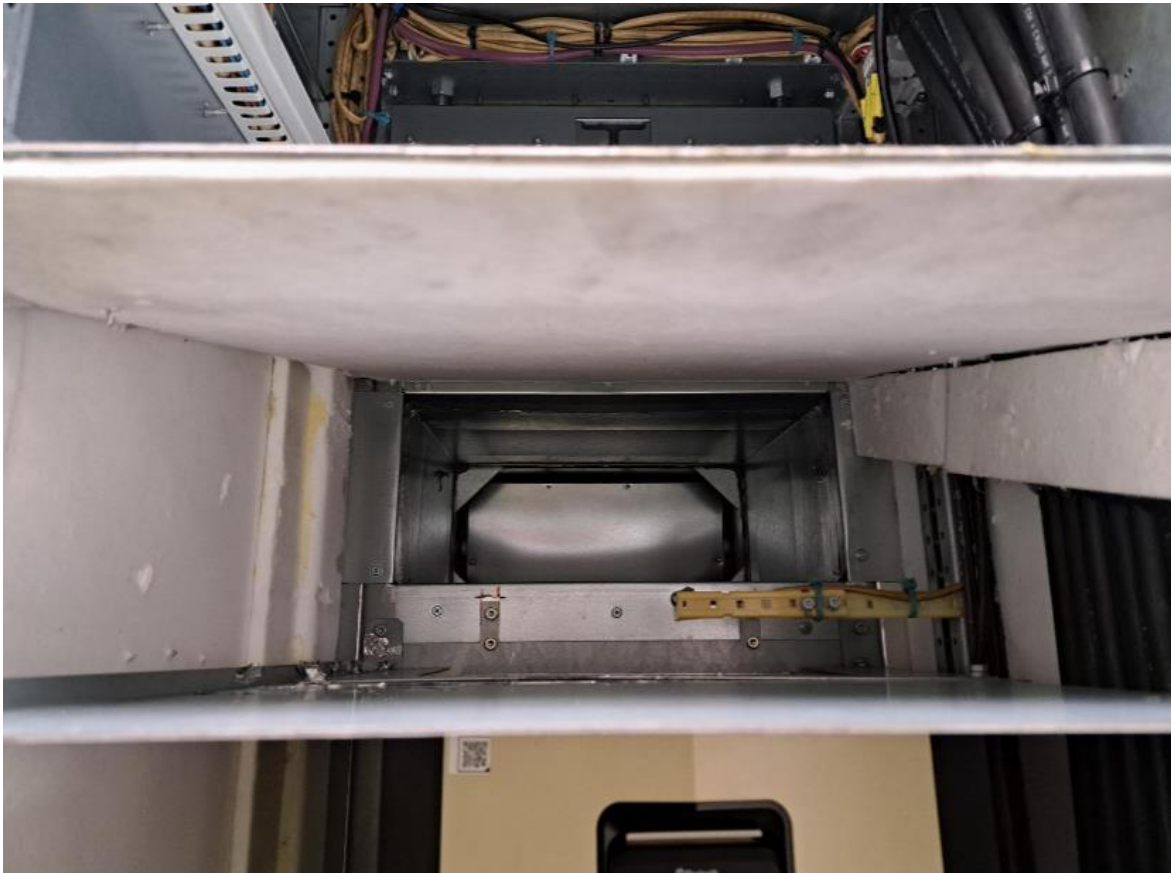
Lisa 13 Testeri „Daytona 3“ uuendatud kabineti ülemine osa



Lisa 14 Testeri „Daytona 3“ uuendatud kabineti ülemine osa



Lisa 15 Testeri „Daytona 3“ uuendatud kabineti ülemine osa



Lisa 16 Testimissüsteem „Daytona 3“



Lisa 17 Testimissüsteem „Daytona 4“

