



Mikko Katainen

# Taajuusmuuttajan turvatoimintojen lämpötestaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

11.4.2023

# Tiivistelmä

Tekijä: Mikko Katainen  
Otsikko: Taajuusmuuttajan turvatoimintojen lämpötestaus  
Sivumäärä: 24 sivua  
Aika: 11.4.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Ammatillinen pääaine: Automaatiotekniikka  
Ohjaajat: Design Engineer Samuli Cederström  
Lehtori Jukka Karppinen  
Lehtori Reijo Leinonen

---

Tässä opinnäytetyössä oli aiheena taajuusmuuttajan ohjauskortin ja sille tarjottavan turvaoption lämpötestaus. Toiminnallinen turvallisuus on tärkeä osa taajuusmuuttajien suunnittelua, toteutusta ja toimintaa, ja turvallisen toiminnan testaaminen on välttämätöntä toimivan tuotteen kehitysprosessissa. Työn tavoitteena oli verifioida, että ohjauskortti ja FSPS-21-turvaoptio toimivat oikein lämpötiloissa, joissa niiden luvu- taan toimivan.

Työ toteutettiin sijoittamalla testattavat laitteet olosuhdekaappiin, jonka lämpötilaa muutettiin testilaitteiden käydessä. Testattavalla ohjauskortilla ja turvaoptiolla ohjattiin muokattua taajuusmuuttajaa, johon oli kytketty pieni sähkömoottori. Lämpöajon aikana ohjelmoitavalla logiikkakontrollerilla pyydettiin turvaoption kautta toistuvasti turvatoiminto päälle ohjauskortille. Taajuusmuuttajan toimintaa valvottiin ohjelmallisesti ja mittalaitteella.

Lämpötestin tuloksena todettiin, että ohjauskortti toimi johdonmukaisesti kaikissa halutuissa lämpötiloissa eikä toiminnallinen turvallisuus vaarannu. Ohjauskortin ja turvaoption todettiin toimivan yhdessä halutulla tavalla. Tämä läpäisty olosuhdetesti on osa ohjauskortin tyyppitestiohjelmaa, ja osaltaan välttämätön ohjauskortin tyyppitesti- en läpäisylle.

Opinnäytetyössä käsitellään myös yleisesti toiminnallista turvallisuutta ja olosuhdetestaamista. Molemmat ovat osaltaan erittäin tärkeä osa prosessia, jossa laitteita suunnitellaan ja hyväksytään käyttöön, niin kuluttajille kuin raskaaseen teollisuuteen.

Avainsanat: toiminnallinen turvallisuus, olosuhdetestaaminen, taajuusmuuttaja

---

## Abstract

Author: Mikko Katainen  
Title: Thermal Testing of Safety Functions for Frequency Converter  
Number of Pages: 24 pages  
Date: 11 April 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Electrical and automation engineering  
Professional Major: Automation engineering  
Supervisors: Samuli Cederström, Design Engineer  
Jukka Karppinen, Senior Lecturer  
Reijo Leinonen, Senior Lecturer

---

The topic of this thesis was thermal testing of a frequency converters control board, and the safety option module offered for it. Functional safety is an essential part of the design, implementation and operation of frequency converters, and testing for safe operation is essential in the development process of a functional product. The goal of the work was to verify that the control board and the FSPS-21 safety option work correctly, at the temperatures at which they are promised to work.

The work was carried out by placing the equipment to be tested in an environment cabinet, the temperature of which was changed while the test equipment was running. The control board and safety option under test controlled a modified frequency converter with a small electric motor connected to it. During thermal run, a programmable logic controller, through a safety option, repeatedly requested a safety function on the control board. The operation of the frequency converter was monitored with computer and with a measuring device.

As a result of the thermal test, it was found that the control board worked consistently at all desired temperatures, and functional safety is not compromised. The control board and the safety option were found to work together as desired. This passed environmental test is part of the control board type test program, and in part necessary for passing the type tests of the control board.

The thesis also deals with functional safety and environmental testing in general. Both are a very important part of the process of designing and approving equipment for use, both for consumers and heavy industry.

Keywords: functional safety, environmental testing, frequency converter

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taustaa ja työn tavoite	1
2.1	Yritysesittely ja työn tavoite	1
2.2	Taajuusmuuttaja	2
3	Toiminnallinen turvallisuus	5
3.1	Riskien ja vaarojen arviointi ja tunnistaminen	5
3.2	Riskien vähentäminen	8
3.3	TET eli turvallisuuden eheystaso	10
3.4	Turvatoiminnot	12
4	Olosuhdetestaaminen	15
4.1	Testiympäristö	16
4.1.1	Testilaitteet	16
4.1.2	Testiohjelmat	17
4.2	Työn valmistelu	18
4.2.1	PLC-ohjelma	18
4.2.2	Demosalkku	18
4.2.3	Lämpötila-anturit	20
4.3	Lämpöajot	20
5	Tulosten yhteenveto	22
	Lähteet	24

## Lyhenteet

- FENA-21: Ethernet-adapteri ABB:n taajuusmuuttajille. Tukee PROFINET IO-, Ethernet/IP- ja Modbus TCP -protokollia.
- FSPS-21: PROFIsafe safety functions. Kommunikointimoduuli taajuusmuuttajan ohjausyksikön ja PLC:n välille. Sisältää STO- ja SS1 -toiminnot.
- HTR: *Heat Test Runner*. ABB:n kehittämä ohjelma, jolla ajetaan ja valvotaan erityisesti lämpöajoja ja tallennetaan tietoa mittalaitteilta.
- IGBT: *Insulated Gate Bipolar Transistor*. Eristyshilainen bipolaaritransistori.
- PLC: *Programmable Logic Controller*. Ohjelmoitava logiikkakontrolleri.
- SDI: Safe Direction. Turvallisen suunnan valvonta.
- SIL/TET: *Safety Integrity Level*. *Turvallisuuden Eheystaso*. Vaatimukset laitteen vioittumistodennäköisyydelle.
- SLS: *Safely Limited Speed*. Turvallinen nopeuden rajoitus.
- SS1: *Safe Stop 1*. Turvallinen pysäytys.
- STO: *Safe Torque Off*. Momentin turvallinen irtikytkentä.

# 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä käsitellään turvallisuutta ja olosuhdetestaamista. Turvallisuuden osalta käsitellään erityisesti toiminnallista turvallisuutta, liittyen varsinkin taajuusmuuttajiin. Taajuusmuuttajilla operoidaan monenlaisia koneita ja liikuvia laitteita, joista voi aiheutua merkittävää vaaraa ihmisille, ympäristölle ja kiinteälle omaisuudelle. Lisäämällä laitteisiin turvatoimintoja näitä vaaroja voidaan vähentää huomattavasti.

Olosuhdetestaamisessa tarkoituksena on verifioida, että laite toimii kaikissa olosuhteissa, joissa sitä on tarkoitettu käytettävän. Tässä työssä keskitytään testaamaan lämpötilan vaikutusta laitteiden toimintaan. Testin kohteena on ABB:n ACS880-tuoteperheen kaappikokoisten taajuusmuuttajien ohjauskortti, ja erityisesti sille tarjottava turvaoptio ja sen toiminta ohjauskortin kanssa eri lämpötiloissa.

Työssä tutustutaan myös testilaitteistoon ja testeissä käytettäviin ohjelmistoihin sekä yleisemmin olosuhdetestaamiseen.

## 2 Taustaa ja työn tavoite

### 2.1 Yritysesittely ja tavoitteet

ABB Ltd on ruotsalaissveitsiläinen teollisuuskonserni, joka työllistää yli satuhatta henkilöä ja toimii yli sadassa maassa. Vuonna 1988 ruotsalainen ASEA ja sveitsiläinen Brown, Boveri & Cie yhdistyivät muodostaen ABB:n. Yrityksen kotipaikka on Zürichissä, Sveitsissä ja liikevaihto vuonna 2021 oli noin 29 miljardia Yhdysvaltain dollaria [1, s. 5]. ABB Oy, eli ABB:n suomalainen tytäryhtiö, työllistää Suomessa noin viisituhatta henkilöä ja toimii noin 20 paikkakunnalla.

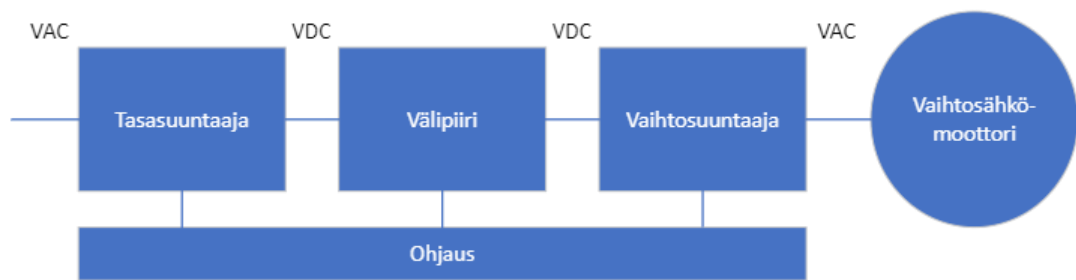
Vuonna 1889 Gottfried Strömberg perusti Helsingissä sähköliikkeen. Tästä yrityksestä kasvoi Oy Strömberg Ab, joka jo 1940-luvulla nousi Suomen kymmenen suurimman teollisuusyrityksen joukkoon. Strömberg kehitti 1960- ja 1970-

luvuilla taajuusmuuttajan ja rupesi valmistamaan niitä Helsingin Pitäjänmäessä. Vaikka Strömberg siirtyi ASEA:n omistukseen vuonna 1986, noin kaksi vuotta ennen kuin ABB syntyi, on taajuusmuuttaja edelleen ratkaiseva osa ABB Motion -yksikön tuottamia sähkökäyttöjä. Taajuusmuuttajia valmistetaan edelleen Pitäjänmäessä, kuten myös moottoreita ja generaattoreita. Myös robottien, moottoreiden, generaattoreiden ja esimerkiksi energianhallintajärjestelmien tuotekehitystä tehdään Pitäjänmäessä. Helsingissä valmistetaan myös Azipod-ruoripotkurijärjestelmiä. Muita toimipisteitä ABB:llä Suomessa on muun muassa Vaasassa, Porvoossa ja Haminassa. [2.]

Työn tavoite on verifioida toiminnalliseen turvallisuuteen liittyvien optiomoduulien toiminta niille määritetyissä lämpöolosuhteissa. ABB tarjoaa näitä optiomoduuleja taajuusmuuttajien ohjauskorttien yhteyteen, ja niiden on toimittava odotetulla tavalla kaikissa luvatuissa olosuhteissa. Verifioimista varten testattavat laitteet pitää sijoittaa olosuhdekaappiin. Ohjauskortin on kuitenkin ohjattava taajuusmuuttajaa, joka ei sijaitse olosuhdekaapissa. Tätä varten rakennetaan testausympäristö, jota voidaan ohjata ja valvoa erikseen valvomosta käsin.

## 2.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajan tarkoitus on muuttaa sähköverkko toiseksi, johonkin nimenomaiseen käyttöön soveltuvaksi sähköverkoksi. Yleisin esimerkki tästä on valtakunnallisen sähköverkon muuttaminen vaihtosähkömoottorille soveltuvaksi sähköverkoksi. Generaattorikäytössä on käytössä samat sähköverkot, mutta tehon suunta vain on generaattorin suunnasta taajuusmuuttajan kautta valtakunnanverkkoon. Sähkömoottorin tai generaattorin ja taajuusmuuttajan muodostama kokonaisuutta kutsutaan sähkökäytöksi. Sähkökäytön yleinen rakenne esitetään kuvassa 1. Sähkömoottorikäytössä taajuusmuuttajalla voidaan ohjata moottorin pyörimisnopeutta erittäin tarkasti. Tarkan kontrollin ansiosta prosesseissa ei ole tarpeellista käyttää esimerkiksi kuristimia tai vaihteistoja. Tämä taas tarkoittaa merkittävää energiansäästöä.



Kuva 1. Taajuusmuuttajan yleinen rakenne ja kytkentä moottoriin.

Taajuusmuuttajalle syötetään verkosta vaihtojännitettä, joka tasasuunnataan tasajännitteeksi. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi diodi- tai tyristorisillalla tai IGBT-pareilla (Insulated Gate Bipolar Transistor, eristyshilainen bipolaaritransistori). Suuritehoisissa laitteissa käytetään yleisesti IGBT-pareja. Tämän jälkeen taajuusmuuttajassa on välipiiri, jolla tasataan syöttöä vaihtosuuntaajalle. Välipiirissä on kuristimia ja kondensaattoreita, joista erityisesti kondensaattorit tasavat tasasuunnattua jännitettä. Välipiiriltä syötetään vaihtosuuntaajaa, jossa nykyisin käytetään erityisesti IGBT-pareja. Vaihtosuunnattua vaihtojännitettä syötetään moottorille.

Jos tasasuuntaus on toteutettu diodi- tai tyristorisillalla, ei taajuusmuuttaja voi syöttää sähköä takaisin syöttävään verkkoon. Jos tällaisessa tilanteessa on tarve jarruttaa moottoria siten, että se toimii generaattorina, on taajuusmuuttajan välipiiriin lisättävä tarvittava määrä jarruvastuksia. Jos sekä tasa- että vaihtosuuntaus on toteutettu IGBT-pareilla, toimii taajuusmuuttaja samalla tavalla molempiin suuntiin, ja moottorin jarruttamisesta syntyvä virta voidaan syöttää takaisin syöttävään verkkoon. Kuvan 2 taajuusmuuttaja on toteutettu identtisillä syöttö- ja invertterimoduuleilla, joiden toiminta riippuu ohjauskortin ohjelmistosta.



Kuva 2. ABB ACS880-37 -kaappiin rakennettu modulaarinen taajuusmuuttaja. Tämän tyyppistä taajuusmuuttajaa ohjataan ohjauskortilla, joka on työssä käsiteltävien olosuhdetestien kohteena. [7.]

Pienitehoiset taajuusmuuttajat ovat yleensä yksittäisiä sähkölaitteita, joissa sekä tasa- ja vaihtosuuntauksen että välipiirien komponentit ovat saman kotelon sisällä. Suuremmilla tehoilla taajuusmuuttajat ovat kaappikokonaisuuksia eli sähkölaitteistoja, joissa eri komponentit on erotettu omiksi yksiköikseen, joita voidaan yhdistää esimerkiksi tehon tarpeen mukaan. Tämän tyyppisiä taajuusmuuttajia ohjataan yleisesti erillisellä ohjauskortilla, tai yksiköllä.

### 3 Toiminnallinen turvallisuus

Toiminnallisen turvallisuuden tarkoituksena on suojata ihmisiä, omaisuutta ja ympäristöä. Toiminnallinen turvallisuus voidaan nähdä toimintamallina, jossa turvajärjestelmän osat, käyttö ja suunnittelu on jaettu järjestelmän elinkaaren mukaan omiksi vaiheikseen. Koneiden turvallisuus perustuu riskien arviointiin, minkä tarkoituksena on määrittää riittävät toimenpiteet laitteen turvalliseen käyttöön.

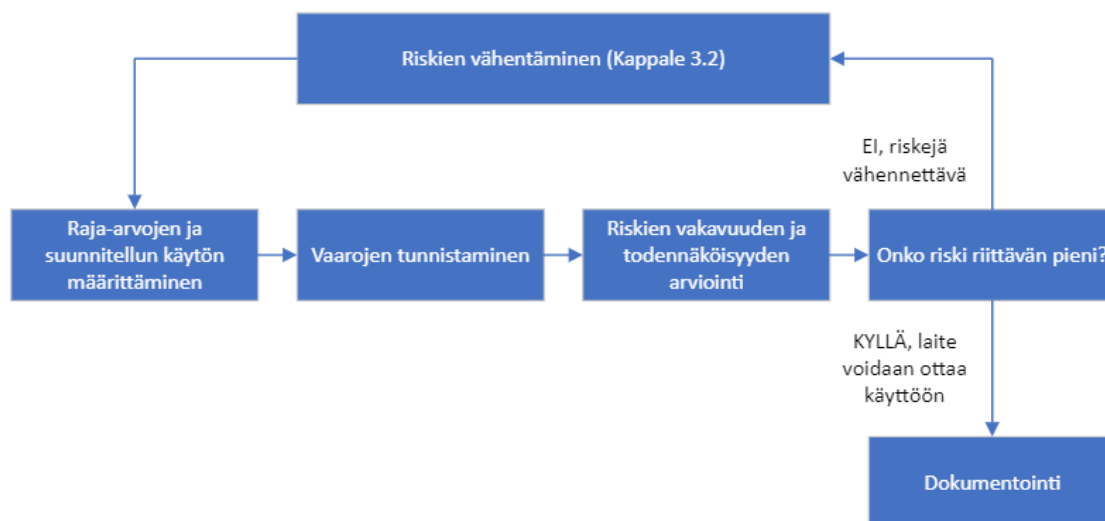
#### 3.1 Riskien ja vaarojen arviointi ja tunnistaminen

Riskejä ja vaaroja arvioitaessa ensimmäisenä määritetään koneen tai laitteen raja-arvot ja suunniteltu käyttö. Rajat on määritetty standardissa EN 12100. [6, s. 18.] Suunniteltu käyttö kuuluu käyttörajoihin, kuten myös laitteen erilaiset toimintatavat. Myös koneen hyödyntäjien kyvykkyys tulee ottaa huomioon käyttörajoja määritettäessä. Jos muiden kuin hyödyntäjien altistumista koneen tai laitteen aiheuttamille vaaroille voidaan kohtuudella ennakoida, on nämä henkilöt myös otettava huomioon käyttörajoja määritettäessä. [6, s. 18.]

Käyttörajojen ohella tulee määrittää tilarajat. Tilarajoihin kuuluvat liikkeen laajuus, konetta tai laitetta käyttävien henkilöiden vaatima tila, ihmisen vuorovaikutus ja kone-tehonsyöttö-rajapinta [6, s. 19]. Huomioon on otettava myös aikarajat, joita ovat laitteen tai sen osien tarkoitettu käyttöikä ja suunnitellut huoltovälit [6, s. 19]. Standardin [6, s. 19] mukaan on myös otettava huomioon muut raja-arvot, joista esimerkkeinä on materiaalien ominaisuudet sekä puhtaanapitoon ja ympäristöön liittyvät raja-arvot [6, s. 19].

Esimerkkinä rajoista taajuusmuuttaja yleisimmin pyörittää sähkömoottoria, mutta tuon moottorin vaikutus voi esimerkiksi liukuhihnalla ulottua kymmenien metrien päähän. Moottorin liikuttama teollisuusrobotti voi liikkua ulottuvuutensa verran mihin suuntaan tahansa. Raja-arvoja määritettäessä on otettava huomioon jokainen paikka, johon laitteen on mahdollista kohdistaa voimaa. Myös kohtuullisesti ennakoitavissa oleva väärinkäyttö tulee ottaa huomioon raja-arvoja

määrittäessä. Kuvassa 3 on esitetty riskien ja vaarojen tunnistamiseen ja vähentämiseen käytetty prosessi vaiheittain.



Kuva 3. Riskien ja vaarojen tunnistaminen ja arviointi.

Raja-arvojen määrittämisen jälkeen pitää tunnistaa, minkälaisia vaaroja laite tuottaa. Vaarat tulee tunnistaa koko laitteen elinkaaren ajalta. Laitetta suunniteltaessa pitää huomioida ihmisen vuorovaikutus laitteen kanssa ja siitä aiheutuvat vaarat. Ihmisen vuorovaikutuksella laitteen kanssa tarkoitetaan kaikkia normaaleja toimia, joita laitteen käyttäjä tekee. Normaaleja toimia ovat esimerkiksi laitteen käynnistäminen, pysäyttäminen, asetusten tekeminen ja kunnossapito. [6, s. 20.]

Vaaroja tunnistettaessa tulee huomioida myös laitteen toimitilat, joihin kuuluu laitteen normaali toiminta ja laitteen epänormaali toiminta [6, s. 20]. Epänormaali toiminta voi johtua esimerkiksi vikaantumisesta, sähkökatkosta, suunniteluvirheestä tai ulkoisista häiriöistä tai olosuhteista. Kolmantena asiana vaarojen tunnistamisessa tulee ottaa huomioon käyttäjän tarkoittamaton käyttäytyminen [6, s. 21]. Tämä tarkoittaa käytännössä käyttäjän virheitä, kuten refleksinomaisia reaktioita laitteen liikkeeseen tai ääneen, huolimattomuusvirheitä ja laitteen

hallinnan menetystä. Standardin [6, s. 21] mukaan myös kohtuudella ennakoitavissa oleva laitteen väärinkäyttö tulee huomioida vaaroja tunnistettaessa.

Seurausten perusteella vaarat luokitellaan neljään tasoon taulukon 1 mukaan. Vakavuustaso yksi tarkoittaa esimerkiksi pientä haavaa tai ruhjetta, jotain, joka voidaan hoitaa paikan päällä laastarilla tai jääpussilla, mutta henkilö palautuu normaaliin työkuuntoon.

Taulukko 1. Onnettomuuden seurauksien vakavuustasot [3, s. 27].

Seuraukset	Vakavuustaso
Kuolema, näön tai raajan menetys	4
Palautumaton, sormen menetys	3
Palautuva, sairaanhoito	2
Palautuva, ensiapu	1

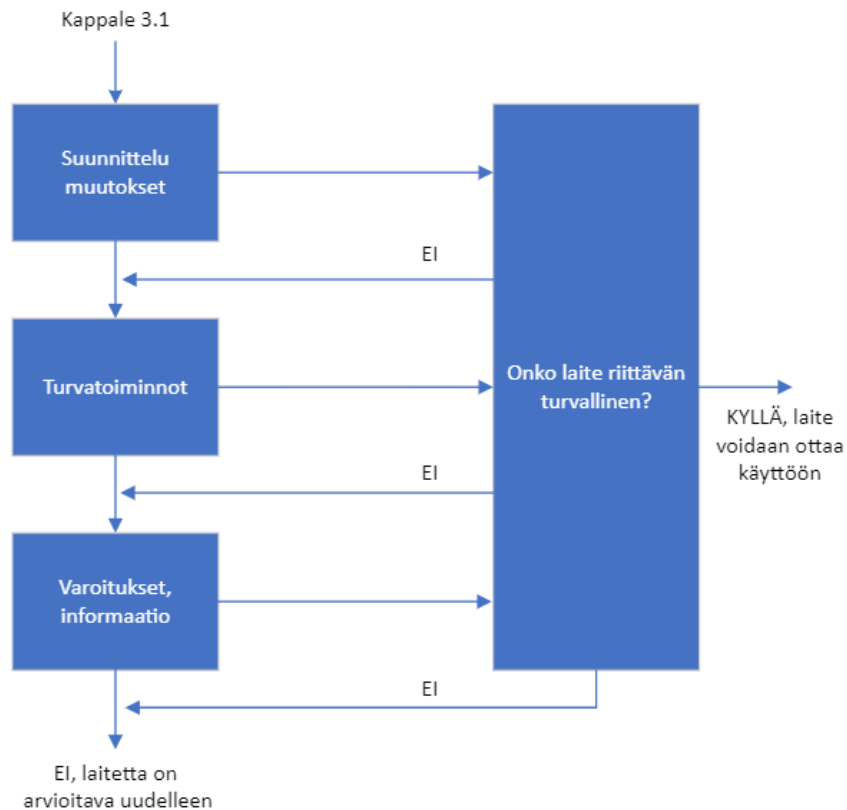
Vakavuustaso kahdesta henkilö edelleen hoidon jälkeen palautuu normaaliin työkuuntoon, mutta vammaa varten joudutaan hakeutumaan sairaanhoidon piiriin. Vakavuustaso kahden vammoja voi olla esimerkiksi luunmurtumat, ommeltavat haavat ja isompien nivelten sijoiltaan meneminen. Vakavuustaso kolmen seurauksena on palautumaton ruumiinvamma kuitenkin sillä edellytyksellä, että henkilön toimintakyky ei oleellisesti heikkene. Esimerkkinä tästä on erityisesti sormen menettäminen. Jos henkilö kuitenkin menettää esimerkiksi etusormen ja peukalon, vakavuustason voidaan olettaa nousevan tasolle neljä. Vakavuustasolla neljä vamma vaikuttaa oleellisesti henkilön toimintakykyyn. Esimerkiksi näön tai raajan menetys kuuluu luokkaan neljä samoin kuin henkilön menehtyminen. [3, s. 27.]

Vaaran vakavuuden ohella pitää arvioida, kuinka usein tai kuinka todennäköisesti vamman aiheuttama onnettomuus tapahtuu [3, s. 27]. Tähän vaikuttaa esimerkiksi se, kuinka usein laitetta käytetään. Jos käyttö on jatkuvaa, voidaan olettaa, että onnettomuuksia tapahtuu useammin, kuin jos laitetta käytetään harvemmin. Toki voidaan ajatella, että harvoin käytettyä laitetta ei ehkä osata käyttää riittävän hyvin, ja tämä aiheuttaa ylimääräistä riskiä. Kun on arvioitu

riskien vakavuus ja todennäköisyys, voidaan päättää, onko laitteen aiheuttama riski riittävän pieni, että sitä voidaan turvallisesti operoida. Jos todetaan, että laite aiheuttaa vaaraa joko ihmisille, materiaaleille tai ympäristölle, pitää asiaan puuttua.

### 3.2 Riskien vähentäminen

Kun laitteen on todettu aiheuttavan riskin ympäristöönsä, pitää tätä riskiä pyrkiä vähentämään. Kuvassa 4 on esitetty riskien vähentäminen vaiheittain. Ensimmäiseksi tulee miettiä, voiko laitteen suunnitella, esimerkiksi rakenteen tai koteloinnin puolesta, uudelleen, ja näin poistaa riski [6, s. 27]. Sähköturvallisuutta parannettaessa on usein varsin yksinkertaista estää jännitteisten osien kosketaminen koteloimalla kyseiset osat. Moottorin pyörivän akselin voi helposti koteloida, ja vaihteistot ovat monesti jo rakenteensa puolesta suljettuja. Jos laitteeseen tehdään muutoksia turvallisuuden parantamiseksi, voidaan laitteen riskit arvioida uudelleen. Jos laite todetaan muutoksilla riittävän turvalliseksi, ei muita toimenpiteitä asian suhteen tarvita. [6, s. 27.]



Kuva 4. Riskien vähentämisen vaiheet.

Usein moottori kuitenkin liikuttaa laitetta tai laitteistoa, jota ei voida suunnitella suljetuksi kokonaisuudeksi. Tällöin tarvitaan standardin [6, s. 27] mukaan suojausteknisiä toimenpiteitä. Käytännössä tämä tarkoittaa turvatoimintoja. Erilaisiin käyttöihin tarvitaan erilaisia toimintoja. Taajuusmuuttajissa käytetään turvatoimintoja, jotka voivat esimerkiksi rajoittaa moottorin pyörimisnopeutta. Laitteen huoltoa varten voi olla esimerkiksi tarpeen vain rajoittaa kierrosnopeutta puoleen normaalista. Tätä ei kuitenkaan voi tehdä pelkästään laitteen nopeusohjetta muuttamalla, jos laitteen suurempi pyörimisnopeus aiheuttaa vaaraa esimerkiksi huoltohenkilöstölle. Tällöin nopeutta on rajoitettava turvatoiminnolla, joka valvoo taajuusmuuttajaa eikä anna moottorin pyörimisnopeuden nousta yli sallitun rajan.

Yleinen turvatoiminto on laitteen sammutus, jos esimerkiksi turva-automaatio havaitsee henkilön laitteen turva-alueella. Esimerkiksi sähköjen katkaiseminen laitteesta ei kuitenkaan aina ole erityisen turvallinen tapa sammuttaa laite. Moottorikäytöissä moottorin akseli voidaan pysäyttää joko ohjatusti, tiettyä ramppia käyttäen tai päästämällä akseli vapaasti pyörimään. Jos ihmishenki on vaarassa, yleensä pyritään pysäyttämään laitteen liike mahdollisimman nopeasti. Jos laitteen massa on kuitenkin huomattavan suuri, voi nopea jarrutus aiheuttaa itsessään vaaran ja erityisesti rikkoa laitteen. Akselin vapauttaminen momentittomaan tilaan on yleensä laitteelle hellävaraista. Vapaasti pyörien suuri massa pysähtyy hitaasti, voidaan puhua jopa tunneista. Näin pitkien katkosten välttämiseksi laitteet pysäytetään hallitusti moottorilla jarruttamalla.

Kun laitteeseen on yhdistetty halutut turvatoiminnot, arvioidaan jälleen, onko laite riittävän turvallinen otettavaksi käyttöön. Jos arvioidaan, että riskejä on vielä olemassa, täytyy niihin edelleen puuttua [6, s. 27]. Jos laitteen läheisyydessä työskennellään, riskipaikkoja voidaan merkitä esimerkiksi varoituskyltein. Myös valoilla ja äänimerkeillä voidaan varoittaa käyttäjää, esimerkiksi liikkuvasta tai liikkeelle lähtevästä laitteesta. Lisäksi kattavat työohjeet ja koulutus ovat keinoja vähentää onnettomuusriskiä. Jos näidenkin toimenpiteiden jälkeen riskejä arvioitaessa todetaan, että laitteeseen ja sen käyttöön liittyy sietämättömiä riskejä, on laitteen käyttöä ja raja-arvoja mietittävä uudelleen.

### 3.3 TET eli turvallisuuden eheystaso

TET eli SIL (safety integrity level, englanninkielinen lyhenne on yleisesti käytössä myös suomenkielisissä teksteissä) on neliportainen luokitus, jolla määritetään vähimmäisvaatimus turvallisuuden tasolle, kun on määritetty laitteen tai laitteiston aiheuttamien riskien ja vahinkojen suuruus [3, s. 26–27]. TET määritellään aina joka toiminnolle erikseen, ei koko järjestelmälle kerralla. Turvajärjestelmän on vähennettävä riskiä sitä enemmän, mitä suurempi laitteen aiheuttama riski ja siitä aiheutuva vahinko on.

TET-luokitusta määritettäessä otetaan huomioon kolme seikkaa eli taajuus, todennäköisyys ja välttäminen (taulukko 2). Tämä tarkoittaa, että määritetään, kuinka usein laite aiheuttaa vaaraa käyttäjälleen, ja tällä perusteella lasketaan kahdesta viiteen pistettä TET-luokitukselle. Sitten määritetään, kuinka todennäköisesti vaara konkretisoituu, ja tästä saadaan yhdestä viiteen pistettä TET-luokitukselle. Tämän jälkeen määritetään, kuinka todennäköisesti laitteen aiheuttaman vaaran voi välttää. Tästä TET-luokituksella lasketaan yksi, kolme tai viisi pistettä lisää.

Taulukko 2. TET-luokan kolme määrittävää tekijää [3, s. 27].

Taajuus		Todennäköisyys		Välttäminen	
≤tunti	5	Erittäin korkea	5		
>1 tunti ≤ päivä	5	Todennäköinen	4		
>päivä ≤ 2 viikkoa	4	Mahdollinen	3	Mahdotonta	5
>2 viikkoa ≤ 1 vuosi	3	Harvinainen	2	Mahdollista	3
>1 vuosi	2	Merkityksetön	1	Todennäköistä	1

Näiden kolmen tekijän pistemäärän yhteen laskemalla saadaan turvallisuuden eheystasolle luokka. Tästä luokasta ja onnettomuuden seurauksien vakavuustasosta määritetään TET-luokka taulukon 3 mukaan. Tätä luokkaa tulee käyttää kyseisellä turvatoiminnolla.

Taulukko 3. Turvallisuuden eheystason määrittäminen, vaakarivillä luokka ja pystyrivillä seurauksien vakavuustaso [3, s. 27].

Vakavuus- taso	Luokka				
	3-4	5-7	8-10	11-13	14-15
4	TET2	TET2	TET2	TET3	TET3
3			TET1	TET2	TET3
2				TET1	TET2
1					TET1

Vaikka onnettomuuden seuraukset olisivat melko vakavia, esimerkiksi tasolla kolme, voidaan turvatoiminnot jättää pois, jos onnettomuus on tarpeeksi

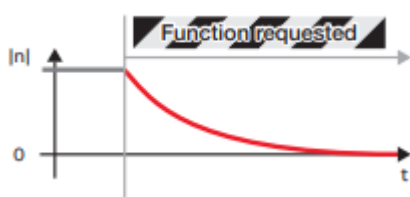
epätodennäköinen ja onnettomuuden välttäminen on todennäköistä. Turvallisuuden eheystason määrittäminen on esitetty standardissa EN 62061 [3, s. 12].

### 3.4 Turvatoiminnot

Taajuusmuuttajakäytöissä turvatoiminnot rajoittavat moottorin akselin pyörimistä joko säätämällä moottorin pyörimisnopeutta tai momenttia. Niillä voidaan estää moottorin akselia lähtemästä pyörimään, pysäyttää akselin liike tai rajoittaa akselin nopeutta tai pyörimissuuntaa. Seuraavassa osiossa käsitellään tarkemmin taajuusmuuttajien yleisimpiä turvatoimintoja.

#### STO

STO (Safe torque off) eli momentin turvallinen irtikytkentä on hyvin yleinen turvatoiminto. Kun STO aktivoidaan, moottorilta poistetaan turvallisesti momentti, jolloin moottori pysähtyy joko vapaasti pyörien tai moottorin pyörittämän laitteen jarruttamana. Kuvassa 5 on esitetty laitteen kierrosnopeuden lasku. STO-toiminto myös estää laitteen ennalta-arvaamattoman käynnistymisen. STO on hyvin perustavaa laatua oleva turvatoiminto, ja se löytyykin useimmiten taajuusmuuttajista sisäänrakennettuna toimintona.

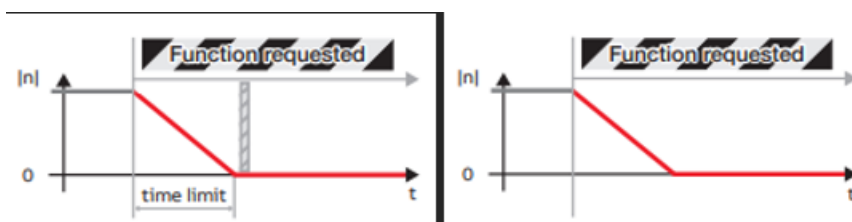


Kuva 5. STO-toiminnon hidastuskäyrä [3, s. 15].

#### SS1

Toinen yleinen turvatoiminto on SS1 (Safe stop 1) eli turvallinen pysäytys. SS1-toiminnosta on olemassa kaksi eri versiota, SS1-t eli aikavaltvottu pysäytys, ja SS1-r eli rampivalvottu pysäytys. Molemmat versiot esitetään kuvassa 6. SS1-t

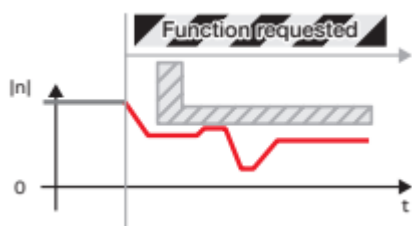
valvoo, että moottori on ohjattu haluttuun nopeuteen määrättyssä ajassa. Tämän jälkeen toiminto ohjaa STO:n päälle, jotta estetään tahaton uudelleenkäynnistyminen. SS1-r valvoo, että moottorin hidastamisessa käytetty ramppiohjaus toteutuu ja kytkee STO:n. Esimerkiksi kytketyn laitteen massa voi vaatia tietyn hidastuvuuden käyttämistä, ja ramppiohjattuna tuodaan laite turvallisesti pysähdyksiin.



Kuva 6. SS1-toiminnot, vasemmalla SS1-t ja oikealla SS1-r [3, s. 15].

## SLS

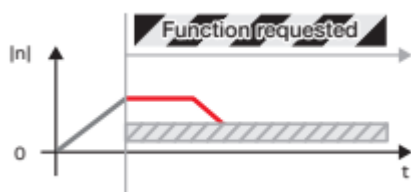
SLS (Safely-limited speed) eli turvallisesti rajoitettu nopeus on turvatoiminto, jolla rajoitetaan laitteen pyörimisnopeutta, kuten kuvassa 7. SLS-toiminnolla voidaan estää esimerkiksi käyttäjän tai ohjelmiston virheitä, jotka voisivat nostaa moottorin pyörimisnopeuden liian suureksi. SLS-toiminto estää moottoria ylittämästä asetettua pyörimisnopeutta, mutta ei pysäytä moottoria.



Kuva 7. Moottori voi pyöriä eri nopeuksilla, mutta SLS toiminto estää nopeutta nousemasta asetettua rajaa korkeammaksi [3, s. 16].

## SDI

SDI (Safe direction) tarkoittaa turvallisen suunnan valvontaa. Kuvassa 8 esitetty SDI-toiminto estää moottorin akselia pyörimästä väärään suuntaan.



Kuva 8. Turvallisen suunnan valvonta havainnollistettuna [3, s 16].

### Hätäpysäytys

Hätäpysäytys on turvatoiminto, jota ohjataan mekaanisesti joko painikkeella tai esimerkiksi turva-aidassa olevalla portilla. Hätäpysäytyksen on ohitettava kaikki muut toiminnot riippumatta siitä, miten laitetta ohjataan. Hätäpysäytetty laite ei saa käynnistyä missään tilanteessa, vaikka hätäpysäytykseen käytetty kytkin palautetaan normaaliin tilaan. Kytkimen palauttaminen normaaliin tilaan mahdollistaa laitteen hallitun uudelleenkäynnistyksen. Pysäytysluokka määrittelee, miten laite pysähtyy. Standardin SFS-EN 60204-1:2018 [4, s. 47] mukaan hätäpysäytykseen tulee käyttää joko luokan 0 tai 1 pysäytystä:

- Pysäytysluokka 0 tarkoittaa, että moottorilta katkaistaan välittömästi sähkönsyöttö. Tämä vastaa toiminnaltaan STO-toimintoa.
- Pysäytysluokka 1 tarkoittaa, että moottorin pyörimisnopeus tuodaan hallitusti nolnaan ja kytketään sähkönsyöttö moottorilta vasta moottorin pysähtyttyä. Kattegoria yhden hätäpysäytys vastaa toiminnaltaan SS1-toimintoa.

Poikkeustilanteissa voi olla kuitenkin tarpeellista käyttää pysäytysluokkaa 2 myös hätäpysäytykseen. Tämä tarkoittaa, että laitteilta ei missään vaiheessa poisteta tehoa. Toiminnon pitää kuitenkin olla valvottu, ja riskienarvioinnissa on

täytynyt todeta, että muunlainen pysäyttäminen aiheuttaa ylimääräisiä riskejä.  
[4, s. 47–48.]

Hätäpysäytys ei poista koko laitteelta sähkönsyöttöä, vaan hallintalaitteet voidaan pitää päällä. Hätäseis-toiminto taas katkaisee sähkön koko laitteelta, eikä mahdollista esimerkiksi moottorin hidastamista hallitusti. Hätäseis-toimintoa ohjataan usein normaalin kytkimen lisäksi esimerkiksi palonilmaisimella.

## 4 Olosuhdetestaaminen

Olosuhdetestaamisella varmistetaan, että testattavat laitteet toimivat niissä olosuhteissa, joissa niiden luvataan toimivan. Myös erilaisten olosuhteiden vaikutusta laitteen kestävyyteen ja käytettävyyteen testataan. Suureita, joita olosuhdetesteissä käytetään, ovat esimerkiksi lämpötila, ilmankosteus, ilmanpaine ja säteilyn intensiteetti. Ulkokäytössä olevat laitteet ovat usein alttiita korroosiolle, esimerkiksi UV-säteilyn tai syövyttävien aineiden takia. Ulko-olosuhteita voidaan helpoimmillaan testata yksinkertaisesti jättämällä testattava laite ulos, olosuhteiden armoille. Tällöin testiolosuhteet ovat varsin huonosti kontrolloitavissa, eikä testattaville laitteille asetettuja olosuhderajoja välttämättä saavuteta lainkaan.

Tuotteilla, laitteilla ja komponenteilla on valmistajan määrittelemät rajat käyttöolosuhteille. Olosuhdetesteissä voidaan joko määrittää näitä rajoja tai testata jo aiemmin määritettyjen rajojen oikeellisuutta. Olosuhdetestejä suoritetaan usein erilaisissa tarkoitukseen suunnitelluissa tiloissa tai erillisissä kaapeissa tai kammioissa. Näissä voidaan luoja rajatussa tilassa halutut olosuhteet, esimerkiksi lämpötila välillä  $-80\dots 150$  °C tai ilmankosteus nollan ja sadan prosentin välille. Tuotteen tai laitteen käyttöolosuhteiden rajojen testaamista varten tarvitaan näitä, esimerkiksi huomattavasti normaalista huoneenlämmöstä poikkeavia, olosuhteita.

Esimerkiksi UV-säteilyn vaikutusta laitteeseen tai komponenttiin testataan altistamalla se selvästi suuremmalle määrälle säteilyä kuin normaalisti auringosta osuisi kappaleeseen. Laitetta voidaan myöskin altistaa syövyttävälle kaasulle tai

nesteille suuremmilla pitoisuuksilla kuin normaaleissa olosuhteissa todellisuudessa tapahtuisi. Näin saadaan ainakin teoriassa testattua miten laite reagoi pidemmällä aikavälillä kyseisiin olosuhteisiin. Muita olosuhdetestattavia tekijöitä on esimerkiksi ilmvirtausten, ja niiden mukana lentävien partikkeleiden, ja tärinöiden vaikutus testattavaan laitteeseen. Myös laitteen testaaminen sähkömagneettisen säteilyn yhteensopivuuden kannalta on erittäin tärkeää.

## 4.1 Testiympäristö

### 4.1.1 Testilaitteet

Tässä työssä käsiteltävä olosuhdetesti suoritettiin laitteistolla, joka kasattiin ja konfiguroitiin erityisesti tätä testiä varten. Testiä hallittiin kannettavalla tietokoneella, ja käytössä oli alla lueteltu laitteisto.

- Arctestin valmistama ARC-500-olosuhdekaappi jonka lämpötila-alue on  $-40 \dots 125 \text{ C}^\circ$ , ja ilman suhteellinen kosteus voidaan asettaa välille  $20 \dots 95 \%$ . Kaappiin voidaan ohjelmoida lämpötilasykli, jossa kaappi pitää asetetun lämpötilan asetettuna aikana.
- Testattava ohjauskortti ohjaa taajuusmuuttajaa, joka tässä testissä on muokattu ABB ACS880-01. Taajuusmuuttaja on integroitu demosalkkuun, joka on ABB:n kehittämä väline nimenomaan erilaisia testaustarpeita varten. Demosalkussa on myös noin 0,2 kW:n sähkömoottori ja tarvittava kaapelointi, jotta se toimii sähkökäyttönä. Ulkoista ohjauskorttia varten käytetään muokattua ohjelmaa ja valokuituyhteyttä, joilla demosalkun oma invertterin ohjaus ohitetaan.
- Demosalkkuun on myös yhdistetty ohjelmoitava logiikkakontrolleri eli PLC (Programmable Logic Controller). Testissä käytetty PLC on ABB:n AC500-S.

- Lämpötiloja mitataan itsetehdyillä lämpöantureilla, ja niiden data luettiin Agilentin 34972ALXI-dataloggerilla. Agilent lukee jännitettä, joten siihen voidaan kytkeä suoraan myös tarvittavia jännitemittauksia.

#### 4.1.2 Testiohjelmat

Testattavaa ohjauskorttia ohjattiin tietokoneelta, ja käytössä oli alla luetellut ohjelmat:

- HTR (Heat Test Runner) on ABB:n testausta varten kehittämä ohjelma, jolla voidaan antaa ohjauskortille esimerkiksi käynnistyspyyntöjä ja nopeusohjeita. HTR:llä myös tallennettiin dataloggerin mittaukset ja tarpeelliset parametrit ohjauskortilta, esimerkiksi moottorin pyörimisnopeus.
- Drive Composer Pro on ABB:n ohjelma, jolla voidaan ohjata ja valvoa taajuusmuuttajia. Myös Drive Composerista tallennettiin tapahtumaloki.
- Drive Composerin tapahtumalokin tallentamisessa hyödynnettiin Microsoft Power Automate -ohjelmistoa. Power Automaten Desktop-sovellus ohjelmoitiin HTR-syklien ajoittamana kopioimaan Drive Composerin tapahtumaloki erilliseen tiedostoon. Power Automate osaa esimerkiksi tarkkailla tietokoneen ruudulle ilmestyvää kuvaa tai tekstiä ja sen havaittuaan suorittaa ohjelmoidut vaiheet. Drive Composerin tapahtumaloki tallennettiin viemällä hiiren kursori tapahtumalistan päälle, maalattiin kaikki tapahtumat ja kopioitiin ne erilliseen tekstitiedostoon.
- Lisäksi turva-PLC:tä ohjattiin ABB:n Automation Builder -ohjelmalla. Kun ohjauskortissa on käytössä FSPS-21, pyydetään PLC:ltä haluttua turva-toimintoa, ja se välittyy ohjauskortille PROFI-safe-väylää pitkin.

## 4.2 Työn valmistelu

### 4.2.1 PLC-ohjelma

FSPS-21 on ABB:n optiomoduuli, joka asennetaan suoraan ohjauskortilla olevaan laajennuspaikkaan. Se ohjaa STO-jännitettä, jonka ohjauskortti välittää tehoasteelle. FSPS-21:n avulla STO- ja SS1-turvatoimintoja voidaan ohjata PROFIsafe väylän yli. Ohjaamista varten tarvitaan PLC ja PLC:tä varten ohjelma. Testissä käytössä oli ABB:n turva-PLC AC500-S. Sille tehtiin ohjelma ABB:n Automation Builder -ohjelmistolla. Kyseisessä ohjelmistossa PLC:ltä lähtevään PROFIsafe-viestiin on määritelty kuvan 9 mukaisesti bitit, jotka ohjaavat STO- ja SS1-t-pyyntöjä kuvan mukaisesti.

F-Output data				
Type	Octet	Bit	Name	Description
Unsigned8 (used as bits)	0	0	STO_request	1=Activate STO function, 0=Deactivate STO
		1	SS1-t_request	1=Activate SS1-t function, 0=Deactivate SS1-t

Kuva 9. Bitit, jotka on määritelty STO- ja SS1-t toiminnolle [5, s. 145].

Logiikkaohjelmaan ohjelmoitiin pyyntö SS1-t- toiminnolle. Tätä ohjattiin hyödyntäen visuaalista käyttöliittymää. Visuaaliseen käyttöliittymään päädyttiin, koska käytössä oli Power Automate tallentamassa Drive Composerin tapahtumalokia. Power Automaten koodiin lisättiin jakso, jolla käyttöliittymään ohjelmoitua nappia painettiin oikealla hetkellä.

### 4.2.2 Demosalkku

Kuvassa 10 on esitetty demosalkku, joka on ABB:n tuotekehitykseen valmistettu testilaite. Se sisältää taajuusmuuttajan ja sähkömoottorin. Se toimii 230 V:n

jännitteellä, ja sillä voi ajaa moottoria täysin samalla tavalla kuin vastaavalla ABB:n kaupallisella ACS880-taajuusmuuttajalla. Testiä varten kytkettiin demosalkkuun ulkoinen ohjaukskortti, joka on tarkoitettu isommille modulaarisille taajuusmuuttajille. Ulkoisen ohjaukskortin kytkemistä varten demosalkku tarvitsee muokatun ohjelman ja muokatun optiomoduulin kuituyhteydelle. Kun laitteet on konfiguroitu oikein, voi ulkoisella ohjaukskortilla hallita demosalkun taajuusmuuttajan invertterin toimintaa.



Kuva 10. Demosalkku. kuvassa näkyy AC500-S-logiikkakontrolleri, ACS880-01-taajuusmuuttaja ilman etukuoria ja sähkömoottori, johon on kytketty enkooderi.

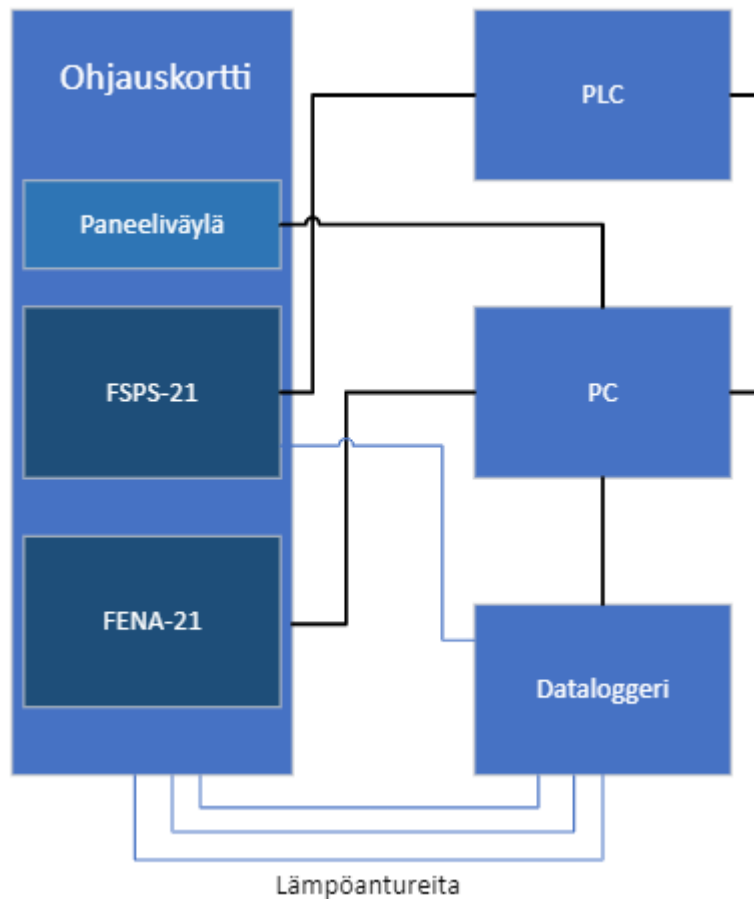
### 4.2.3 Lämpötila-anturit

Lämpötilojen mittaamista varten tarvitaan lämpötila-antureita eli lämpökarvoja. Lämpökarvat valmistetaan käsin ohuesta, kaksijohtimisesta kaapelista, jonka johtimet on eristetty toisistaan. Johtimien päät juotetaan joko yhteen tai tarvittavan kokoiseen messinkilevyyn. Lämpötiloja mitattiin näillä antureilla ohjauskortin halutuista komponenteista ja sisäilmasta.

Lämpökarvojen asentamista varten testattava ohjauskortti piti purkaa osiin. Antureiden tulisi vaikuttaa mahdollisimman vähän ohjauskortin komponenttien normaaliin lämmönjohtumiseen, etteivät anturit muuta testitulosta. Tämä asetti haasteita antureiden koon ja asettelun suhteen, ja antureista pitikin tehdä erityisen pieniä. Lisäksi mitattiin FSPS-21-moduulin sisälämpö ja olosuhdekaapin ilman lämpötila kolmesta kohdasta. Lämpökarvat kytkettiin Agilent 34972ALXI -dataloggeriin. Loggeri vastaanottaa jännitetiedon lämpökarvoilta ja välittää tiedot lähiverkossa halutuille laitteille. HTR lukee tiedon lähiverkosta ja tallentaa tiedon lämpöajon aikana.

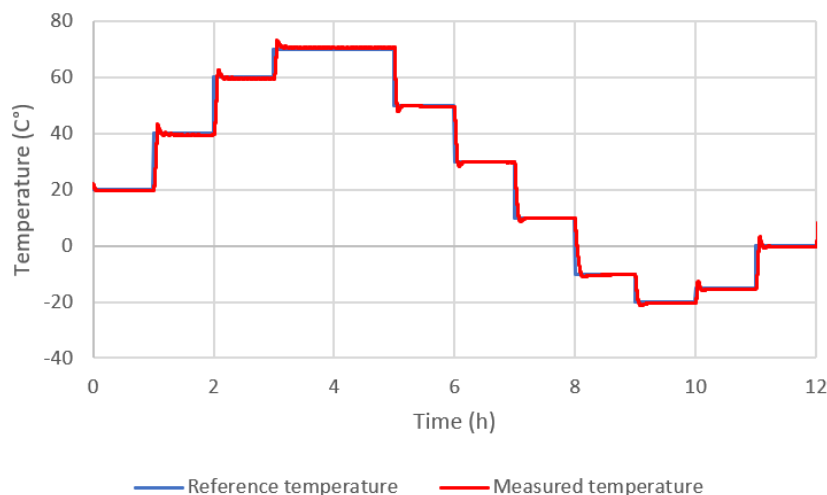
### 4.3 Lämpöajot

Tässä opinnäytetyössä käsitelty lämpöajo tehtiin, jotta voitiin verifioida FSPS-21-moduulin toiminta kyseisen ohjauskortin kanssa niille määritetyissä käyttölämpötiloissa. Testiä varten piti konfiguroida laitteet toimimaan samassa lähiverkossa, joka on esitetty kuvassa 11. Lisäksi HTR vaatii suoran paneeliyhteyden, joka on ABB:n käyttämä ohjauspaneeli, joka on yhteydessä ohjauskorttiin Ethernet-kaapelilla. Paneeli voidaan kytkeä tietokoneeseen USB-kaapelilla ja sen kautta hallita taajuusmuuttajaa etänä. Lähiverkkoyhteys ohjauskorttiin luotiin käyttämällä FENA-21-optiomoduulia, joka on ABB:n tarjoama Ethernet-adapteri. Lähiverkkoon kytkettiin myös Agilent-dataloggeri lämpötilojen valvontaa varten sekä turva-PLC, jotta PLC:tä voitiin myös ohjata PC:n kautta.



Kuva 11. Työkaluverkko yksinkertaistettuna.

HTR konfiguroitiin toistamaan sekvenssiä, jossa se ensimmäisenä tyhjentää ohjauk kortin muistista tapahtumat ja poistaa mahdolliset virheilmoitukset. Tämän jälkeen HTR antaa moottorille nopeusohjeen 1000 rpm ja odottaa moottorin kiihtymistä. Moottorin kiihdyttyä haluttuun nopeuteen PLC saa HTR:ltä syötteen, jonka perusteella PLC pyytää SS1-t-toiminnon päälle. SS1-t-toiminto ajaa moottorin aikarampilla pysähdyksiin. Tämän jälkeen HTR poistaa virheilmoituksen, jonka hätäpysäytys oli aktivoinut, ja antaa moottorille nopeusohjeen -1000 rpm, eli ajetaan moottoria vastakkaiseen suuntaan. Moottorin kiihdytettyä PLC pyytää taas SS1-t-toiminnon päälle, ja moottori ajetaan aikarampilla pysähdyksiin. Tämän jälkeen Power Automate kopioi ohjauk kortin tapahtumat erilliseen tiedostoon. Koko HTR-sekvenssi kesti noin kuusi minuuttia, ja kuvassa 12 esitetty lämpöajo kesti 24 tuntia.



Kuva 12. Testissä käytetty lämpösykli, sinisellä asetettu lämpötila ja punaisella kaapin ilmasta mitattu lämpötila.

Kuvassa esitettynä ensimmäiset 12 tuntia lämpöajosta. Toinen puolikas ajosta oli identtinen ensimmäisen kanssa. Lämpökaapin ajama sykli asetettiin lämpökaapille sen omaa ohjauspaneelia hyödyntäen.

HTR asetettiin tallentamaan paitsi lämpötilat testin aikana myös muut tarpeelliset taajuusmuuttajan ja moottorin arvot. Mittauksessa oli mukana esimerkiksi moottorin nopeus, virta ja momentti. Myös niin tasasähkön kuin moottorille menevän vaihtosähkön jännite mitattiin. Tämän lisäksi tarkkailtiin useita taajuusmuuttajan toimintaan ja toiminnalliseen turvallisuuteen liittyviä status- ja toimintasanoja, jotka kertovat erilaisten toimintojen tilasta. HTR luki myös Agilentin kautta taajuusmuuttajalle menevää STO-jännitettä, josta voidaan päätellä STO-toiminnon tila kullakin hetkellä.

## 5 Tulosten yhteenveto

Testin tuloksena saatiin verifioitua, että FSPS-21-optiomoduuli toimii suunnitellusti ohjauskortin kanssa lämpötiloissa, joissa niiden luvataan toimivan. Drive Composerin tapahtumalokista kopioidut tapahtumat siirrettiin Excelliin analysoitavaksi ja todettiin, että jokaisella ajettulla syklillä ohjauskortti indikoi samat tapahtumat. Testilaitte siis toimi johdonmukaisesti ja oikein koko testin ajan. Testi oli

osa laajempaa kokonaisuutta, jossa testattiin myös muita turvaoptiomoduuleja ja muita turvatoimintoja.

Ongelmalliseksi testissä osoittautui erityisesti tietokoneohjelmien yhteensovittaminen. Taajuusmuuttajan toimintojen ohjaaminen HTR-ympäristössä toimii yksinään varsin hyvin. Kun samaan yhteyteen joudutaan yhdistämään myös PLC-ohjaus ja Drive Composerin ohjaaminen Power Automatella, tulee kokonaisuudesta sekava. Myös testin läpisaattamisen luotettavuus kärsi usean ohjelman yhteistoiminnasta. Tulevaisuudessa vastaavissa testeissä kannattaisi miettiä, voisiko toimintoja eri ohjelmista yhdistää. HTR vaatii toimiakseen melko työlään Excel-taulukon käsittelemistä ja pikkutarkkaa bittien asettelemista. Power Automate tuo visuaalisemman ratkaisun ohjaamiseen, ja sen ohjelmoiminen on verrattain helppoa. Painikkeiden käyttäminen näytöllä on kuitenkin melko kömpelöä, ja ohjelma kärsii helposti esimerkiksi Windowsin ilmoitusikkunoista.

Testissä oli myös valmiiksi mukana PLC, jota voisi hyödyntää taajuusmuuttajan ohjaamiseen. Ohjauskortissa on digitaalisia tuloja ja lähtöjä sekä releitä, joiden kautta taajuusmuuttajan toimintoja voisi ohjata myös PLC-ohjelmalla. PLC-ohjelmointi vaatii jonkin verran osaamista, eikä yksittäistä testiä varten sen opetteleminen välttämättä ole tarkoituksenmukaista. Jos testattavaa on enemmän, tulisivat PLC:n hyödyt varmasti esille. Erityisesti näiden useiden ohjelmien käytöstä opittiin, että asioita voi tehdä eri tavoilla, ja tulevaisuudessa varmasti kannattaa miettiä, miten testejä operoidaan.

## Lähteet

- 1 ABB Group Annual report 2021. 2021. Zürich. ABB.
- 2 ABB:stä lyhyesti. Verkkoaineisto. ABB. <<https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>>. Luettu 10.1.2023.
- 3 Technical guide No.10 Functional safety. 2017. Helsinki. ABB.
- 4 SFS-EN 60204-1:2018. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset. 2018. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 5 FSPS-21 PROFIsafe safety functions module. Käyttöohje. 2021. Helsinki. ABB.
- 6 SFS-EN ISO 12100. Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskien arviointi ja riskien pienentäminen. 2010. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 7 ACS880-37. Verkkoaineisto. ABB. <https://new.abb.com/drives/low-voltage-ac/industrial-drives/acs880-single-drives/acs880-37>. Luettu 5.4.2023.