



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Pasi Ihainen & Jesse Siipola

PID-KOULUTUSLAITTEISTO

Tekniikka
2020

TIIVISTELMÄ

| | |
|--------------------|-------------------------------|
| Tekijä | Pasi Ihainen ja Jesse Siipola |
| Opinnäytetyön nimi | PID-koulutuslaitteisto |
| Vuosi | 2020 |
| Kieli | Suomi |
| Sivumäärä | 54 + 1 liite |
| Ohjaaja | Juha Nieminen ja Kari Jokinen |

Työn tarkoituksena on rakentaa Vacon Oy Training Centerille koulutuskäyttöön tarkoitettu PID-koulutuslaitteisto. PID-koulutuslaitteiston avulla Vacon Oy:n kouluttajat voivat käytännön tasolla tarjota huoltopartnereille sekä loppuasiakkaille mahdollisuuden tutustua PID-säädön ominaisuuksiin ja oppia taajuusmuuttajan ohjelmointi ja hienosäätö ilmastoinnin ohjaukseen tarkoitettussa laitteistossa. Tavoitteena on myös verrata taajuusmuuttajakäytön tuomia etuja ja energiasäästöjä verrattuna perinteiseen kuristussäädöllä ohjattuun käyttöön. Aiemmin ilmanvaihtokoneistojen säätö toteutettiin pääsääntöisesti kuristussäädöllä, mutta taajuusmuuttajien yleistyminen ja niiden hintatason alentuminen on kasvattanut taajuusmuuttajalla ohjattujen PID-säädettävien käyttöjen määrää viime vuosien aikana. Taajuusmuuttajien yleistyminen ohjauksessa on lisännyt myös aiheeseen liittyvän teknisen tuen tarvetta asiakkaille.

Työ aloitettiin suunnittelupalaverilla tilaajan kanssa, jossa määriteltiin työn laajuus ja arvioitu tuntityömäärä. Seuraavissa palavereissa keskityttiin laitekokonaisuuden ja tulevien hankintojen suunnitteluun. Laitekokonaisuuden hahmotuttua lähdettiin miettimään hankintakanavia ja päädyttiin ottamaan yhteyttä Danfoss Drives Suomen myyntitiimin jakelijaverkostosta vastaavaan henkilöön ja kysymään sitä kautta olisiko mahdollista saada hänen kauttaan apuja hankinnoissa. Jakelijaverkostosta saatiin hyviä opinnäytetyölahjoituksia, esim. Fidelix ja Produal olivat heti avuliaita asian suhteen. Laitehankintojen varmistuttua alkoi varsinainen työn tekeminen, jota tehtiin sitä mukaan kun laitetoimitukset saapuivat ja myös oma työ sen salli. Työ tehtiin työn tilaajan tiloissa, joten työn tekemisen tahtiin vaikutti myös Training Centerissä pidettävien koulutuksien aikataulut.

Työn tuloksissa huomaa selkeästi, että taajuusmuuttajalla ohjattu puhallinsäätö säästää kustannuksissa huomattavasti. Vuosittainen säästö taloudellisesti on merkittävä, kun tarvittavaa ilmamäärää kullekin ajanjaksolle voidaan säätää tarkasti.

ABSTRACT

| | |
|--------------------|--------------------------------|
| Author | Pasi Ihainen and Jesse Siipola |
| Title | PID Training Equipment |
| Year | 2020 |
| Language | Finnish |
| Pages | 54 + 1 Appendix |
| Name of Supervisor | Juha Nieminen and Kari Jokinen |

The purpose of this thesis was to build a PID training demo system for Vacon Ltd Training Center. With the PID training demo system Vacon Ltd Training Center can easily train end-customers and service partners. The aim was also to compare the features and benefits of using the frequency converters compared to traditional control method which is based on choking the airflow. Traditionally the control of the air-flow was made by choking the flow, but nowadays when frequency converter prices has decreased and frequency converter applications are quite common, the use of PID control method has increased. The use of the PID has also increased the need of technical support.

The first meetings were direct planning with the client. In those meetings the setup of the system was planned and defined. After the setup was defined, Danfoss Drives Finland Sales team was contacted to use their contacts to obtain the required equipment.

The results show that the benefit of using a frequency converter on HVAC control is big. Savings per year are high when there is possibility to adjust the level of air-flow precisely.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVALUETTELO

LIITELUETTELO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 9 |
| 2 | PID-KOULUTUSLAITTEISTO..... | 10 |
| 3 | KÄYTETYT LAITTEET..... | 11 |
| 3.1 | KOJA Future 0606..... | 11 |
| 3.2 | Taajuusmuuttajat..... | 12 |
| 3.2.1 | VACON® NXP..... | 12 |
| 3.2.2 | VACON® 100 INDUSTRIAL..... | 13 |
| 3.2.3 | Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102..... | 14 |
| 3.3 | Fidelix FX-Spider-40..... | 15 |
| 3.4 | Paine-erolähetin..... | 16 |
| 3.5 | Ilmamäärälähetin..... | 17 |
| 3.6 | SCHNEIDER ELECTRIC PM3250..... | 18 |
| 4 | KÄYTETYT OHJELMISTOT..... | 19 |
| 4.1 | VACON® NCDrive..... | 19 |
| 4.2 | VACON® Live..... | 20 |
| 4.3 | MCT-10..... | 22 |
| 5 | MEKAANISET MUUTOKSET/TOIMENPITEET..... | 23 |
| 5.1 | Mekaaniseen turvallisuuteen liittyvät asiat..... | 23 |
| 5.2 | Komponenttien asennukset..... | 26 |
| 5.3 | Tuloilman kuristus..... | 27 |
| 5.4 | Anturit (paine tai virtaus)..... | 28 |
| 6 | SÄHKÖISET KYTKENNÄT JA ASENNUKSET..... | 30 |
| 6.1 | Sähköturvallisuuden liittyvät asiat..... | 30 |
| 6.2 | Taajuusmuuttajien kytkennät..... | 30 |
| 7 | FIDELIX FX-SPIDER-40-OHJELMOINTI..... | 33 |

| | | |
|--------|---|----|
| 8 | PID-SÄÄTÄJÄT OLETUSARVOILLA | 38 |
| 8.1 | Taajuusmuuttajien oletusparametrit..... | 38 |
| 8.1.1 | VACON® NXP PID-säätäjä oletusarvoilla | 39 |
| 8.1.2 | VACON® 100 INDUSTRIAL PID-säätäjä oletusarvoilla | 40 |
| 8.1.3 | Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102 PID-säätäjä oletusarvoilla 41 | |
| 9 | SÄÄTÄJIEN VIRITYS ZIEGLER-NICHOLSIN MENETELMÄLLÄ | 42 |
| 9.1 | Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetut parametrit..... | 42 |
| 9.1.1 | VACON® NXP..... | 43 |
| 9.1.2 | VACON® 100 INDUSTRIAL..... | 44 |
| 9.1.3 | Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102..... | 45 |
| 10 | MITTAUKSET..... | 46 |
| 10.1 | Hyötysuhde | 46 |
| 10.1.1 | Taajuusmuuttajakäyttö vs. ”DOL”-käyttö. | 47 |
| 10.2 | Energia | 49 |
| 10.2.1 | Taloudellisuuslaskenta energiasäästönä..... | 50 |
| 11 | DOKUMENTOINTI | 51 |
| 11.1 | Osaluettelo | 51 |
| 11.2 | Harjoitukset..... | 51 |
| 12 | YHTEENVETO JA POHDINTA..... | 52 |
| 13 | LÄHTEET | 54 |

KUVALUETTELO

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Koja Future-ilmanvaihtokone..... | 11 |
| Kuva 2. VACON® NXP..... | 12 |
| Kuva 3. VACON® 100 INDUSTRIAL..... | 13 |
| Kuva 4. Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102..... | 14 |
| Kuva 5. Fidelix FX-Spider-40..... | 15 |
| Kuva 6. Pro dual PEL-M-paine-erolähetin..... | 16 |
| Kuva 7. Pro dual IML-M-ilmamäärälähetin..... | 17 |
| Kuva 8. Schneider-Electric PM3250-tehomittari..... | 18 |
| Kuva 9. NCDrive-työkalun parametrintinäkymä..... | 19 |
| Kuva 10. Live-ohjelmointityökalun parametrinäkymä..... | 20 |
| Kuva 11. Drive Customizer-ohjelmointityökalun perusnäkymä..... | 21 |
| Kuva 12. MCT-10-työkalun parametrinäkymä..... | 22 |
| Kuva 13. Etu- ja takasuojalevyn mallipiirustus..... | 23 |
| Kuva 14. Koja Future-ilmanvaihtokone alkutekijöissään..... | 24 |
| Kuva 15. Kosketussuojalevy 400 mm sivuliittimellä..... | 25 |
| Kuva 16. Komponentit asennettuna paikoilleen..... | 26 |
| Kuva 17. Fläktwoods mittaus- ja säätölaite IRIS 400..... | 27 |
| Kuva 18. Paine- ja ilmamäärämittareiden sijoittelu..... | 28 |
| Kuva 19. Paine- ja ilmamäärämittareiden sijoittelu..... | 28 |
| Kuva 20. Mittausjärjestelyt..... | 29 |
| Kuva 21. VACON® Multiprotocol RS485 OPTC2-kenttäväyläkortti..... | 30 |
| Kuva 22. I/O-kaapeloinnit Pro dual-antureille..... | 31 |
| Kuva 23. Kojevastikkeet..... | 32 |
| Kuva 24. Fidelix FX-Spider-40-käyttöliittymän alusta..... | 33 |
| Kuva 25. Mittausnäkyvät analogisena ja väylälle..... | 34 |
| Kuva 26. Tilanne 1, jossa kerroin 10 ja integrointiaika 10 sekuntia..... | 35 |
| Kuva 27. Tilanne 2, jossa kerroin 1 ja integrointiaika 10 sekuntia..... | 36 |
| Kuva 28. Tilanne 3, jossa kerroin 10 ja integrointiaika 1 sekunti..... | 36 |
| Kuva 29. Tilanteiden 1, 2 ja 3 säätöviestin erot graafisesti Vacon NXP-laitteelle..... | 37 |
| Kuva 30. VACON® NXP parametrit ennen muutoksia..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Kuva 31. Järjestelmän vaste VACON® NXP PID-säätäjän oletusarvoilla. | 39 |
| Kuva 32. VACON® 100 INDUSTRIAL-laitteen PID-säätäjän oletusarvot. | 40 |
| Kuva 33. Järjestelmän vaste VACON® 100 INDUSTRIAL PID-säätäjän oletusarvoilla. | 40 |
| Kuva 34. Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102 PID-säätäjän oletusarvot. | 41 |
| Kuva 35. Järjestelmän vaste VLT® HVAC DRIVE FC-102 PID-säätäjän oletusarvoilla. | 41 |
| Kuva 36. Ziegler-Nichols-menetelmän kertoimet ja kaavat. | 42 |
| Kuva 37. VACON® NXP PID-säätäjän arvot Ziegler-Nichols-menetelmästä. | 43 |
| Kuva 38. Järjestelmän vaste VACON® NXP:n PID-säätäjällä Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetuilla arvoilla. | 43 |
| Kuva 39. VACON® 100 INDUSTRIAL PID-säätäjän arvot Ziegler-Nichols-menetelmästä. | 44 |
| Kuva 40. Järjestelmän vaste VACON® 100 INDUSTRIAL:n PID-säätäjällä Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetuilla arvoilla. | 44 |
| Kuva 41. VLT® HVAC DRIVE FC-102 PID-säätäjän arvot Ziegler-Nichols-menetelmällä tuotettuna. | 45 |
| Kuva 42. Järjestelmän vaste VLT® HVAC DRIVE FC-102:n PID-säätäjällä Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetuilla arvoilla. | 45 |
| Kuva 43. Taajuusmuuttajasäätö vs. kuristussäätö mitatut lukemat. | 47 |
| Kuva 44. Teho virtauksen funktiona. | 48 |
| Kuva 45. Sähkön hinta. | 49 |
| Kuva 46. Esimerkkikuva taloudellisuuslaskennasta. | 50 |

LIITELUETTELO**LIITE 1.** PID Instructions for Danfoss Global Training (Salattu)

1 JOHDANTO

Tilaaaja tälle työlle on Vacon Oy koulutuskeskus (Training Center). Työn tarve on muodostunut vuosien varrella kun PID-ohjatut käytöt ovat yleistyneet maailmalla. Vuonna 2014 Vacon Oyj hallitus suositteli Danfoss Group johtoryhmälle koko Vacon Oyj osakekannan hankkimista, mikä myös toteutui joulukuussa 2014. Vuonna 2015 Vacon Oyj irtautui Helsingin pörssistä ja muutti nimensä Vacon Oy:ksi. Vacon Oy kuuluu nykypäivänä osaksi Danfoss-konsernia. Danfoss-konserni työllistää maailmanlaajuisesti n. 27 000 ihmistä.

Danfossin on perustanut Mads Clausen vuonna 1933 Nordborgiin Tanskaan, jossa päämaja edelleenkin sijaitsee. Ensimmäinen kaupallinen tuote oli jäähdytysjärjestelmissä käytettävä paisuntaventtiili. Danfoss on maailman ensimmäinen massatuotantona taajuusmuuttajia valmistanut yritys. Ensimmäinen taajuusmuuttaja oli öljyjäähdytteinen VLT 5, joka tuotiin markkinoille vuonna 1968.

Danfoss-konsernin nykyinen liiketoiminta on jaettu neljään eri liiketoimintayksikköön, jotka ovat Cooling, Heating, Power Solution ja Drives, joista viimeiseen Vacon Oy kuuluu. Vacon Oy:n päätuotteet ovat Vacon brändin taajuusmuuttajat, mutta Danfoss Drives liiketoimintayksikköön kuuluu myös VLT brändin taajuusmuuttajat. Danfoss Drives työllistää n. 4 600 henkilöä maailmanlaajuisesti. Danfoss Drives Vaasan tehdas työllisti n. 600 henkilöä vuonna 2018. Danfoss Drivesilla on 11 tehdasta maailmanlaajuisesti 7 maassa.

Vaasan tehtaalla on edelleen Vacon tuotebrändin suunnittelu, myynti, markkinointi ja valmistus. Danfoss (Vacon Oy) on Vaasan kaupungin viidenneksi suurin työnantaja, kaupungin ollessa suurin.

2 PID-KOULUTUSLAITTEISTO

PID-demolaitteisto rakentuu KOJA Future 0606-puhallinyksikön ympärille. Laitteiston tarkoituksena on tarjota asiakkaille ja partnereille mahdollisuus tutustua Danfossin eri tuotteiden ohjelmointiin ja ominaisuuksiin. Danfossin tuoteportfoliosta laitteistoon valikoitui NXP-, Vacon 100 Industrial- ja VLT FC102-tuotteet. Laitteiston ja taajuusmuuttajien käyttöönoton yhteydessä on asiakkaille mahdollista esitellä ja kouluttaa PC-työkalujen käyttöä.

Laitteistoon asennetaan energiamittausjärjestelmä, jolla voidaan verrata tuotteiden ominaisuuksia keskenään, sekä demonstroida taajuusmuuttajien tuomia etuja suoraan verkkosyötettyyn moottoriin nähden. Osana työtä on myös koulutuksessa käytettävien harjoitteiden suunnittelu ja toteutus. Laitteisto rakennetaan henkilö-, ja sähköturvallisuusmääräyksiä noudattaen.

Laitteiston ohjaus toteutetaan Fidelix FX-Spider-40-masterilla Modbus-väylän yli. Mittausteknisinä antureina käytetään ProDual IML-M- ja PEL-M-antureita, joiden mittaustieto kirjoitetaan väylän yli masterille. Master-yksikkö säätää taajuusmuuttajia väylän yli saamansa mittaustiedon perusteella. Taajuusmuuttajien ilmavirtaus säädölle verrokkina toimii Fläktwoods IRIS-400-virtaussäädin, jonka säätö perustuu ilmavirran kuristamiseen. Virtaussäätimen säätö on toteutettu puhtaasti manuaalisesti, jolloin voidaan helposti näyttää toteen säädön vaikutus ilmamäärän ja säädön vaikuttamattomuus käytettyyn energiaan.

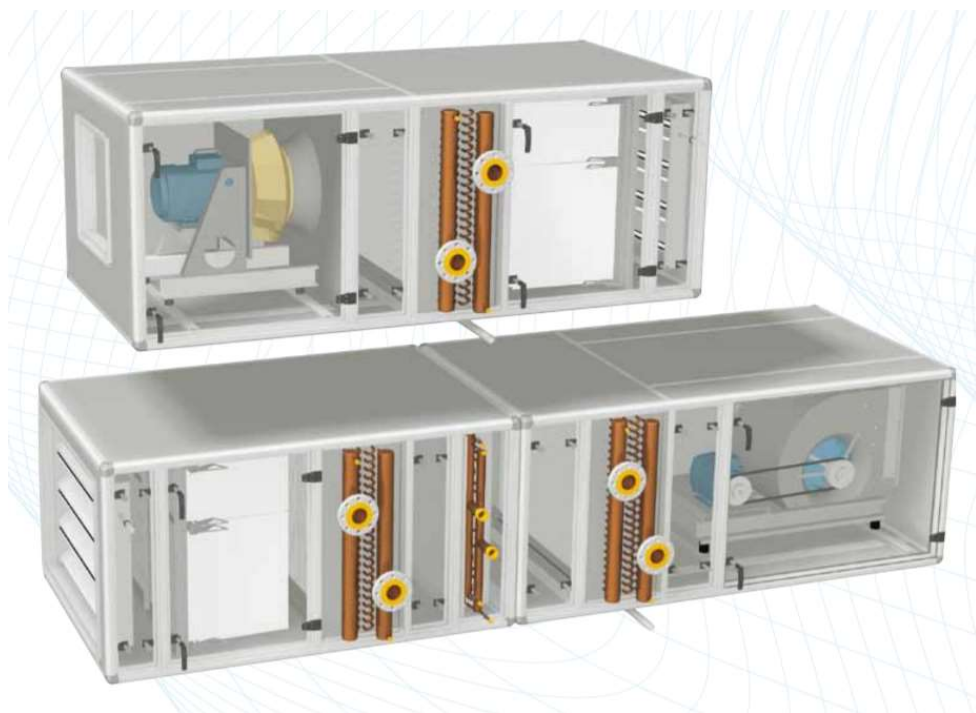
3 KÄYTETYT LAITTEET

3.1 KOJA Future 0606

Työssä käytetään Koja Oy:ltä saatua Future-ilmanvaihtokonesarjan 0606-tuotemallia (**Kuva 1.**). Future-ilmanvaihtokonesarjaa on saatavilla 0,2-40+ m³/s ilmavirtausalueella.

Puhallintyyppiä voidaan valita tapauskohtaisesti sopivin puhallintyyppi seuraavista vaihtoehdoista; keskipakoispuhallin tai taajuusmuuttajaohjattu suorakäyttöinen sekavirtauspuhallin. Keskipakoispuhalltimen tyyppinen ominaisuus on hyvä hyötysuhde ja elinkaarikustannusten optimoimiseksi voidaan yksi konekoko varustaa kolmella erikokoisella puhaltimella. Puhaltimien pyörittämiseen ilmanvaihtokoneessa käytetään normaalia epätahtimoottoria.

Koja Future-ilmanvaihtokonesarja on laajennettavissa useilla erilaisilla lisälaitteoptioilla, kuten äänenvaimentimilla, ilmankostuttimilla ja lämmöntalteenottolaitteistolla. /1/



Kuva 1. Koja Future-ilmanvaihtokone

3.2 Taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttajiksi valikoitui seuraavat Danfoss Drivesin valmistamat tuotteet.

3.2.1 VACON® NXP

VACON® NX-tuotesarjan vaativiin käyttöihin suunnitellut NXP-tuotteet lanseerattiin vuonna 2000. NXP-laitteita on mahdollista ajaa Open- ja myös Closed-loopissa, enkooderituen myötä. VACON® NXP tarjoaa kattavan ja monipuolisen ohjausrajapinnan, laajan ja helposti muunneltavan lisäkorttirepertuaarin ansiosta (**Kuva 2.**).

Monipuolinen kenttäväyläprotokollatuki tekee laitteiden integroimisen osaksi suurempaakin järjestelmää mahdolliseksi. Esimerkkejä tuetuista kenttäväyläprotokollista ovat mm. Profibus sekä ProfiNET, BACNet ja Modbus. Muita mainittavia lisätoimintoja ovat esimerkiksi STO-turvatoiminnot ja ATEX-hyväksytty termistoritulo. Osana VACON® NX-tuotesarjaa myös NXP täyttää ERP2015-direktiivin asettamat energiatehokkuutta koskevat vaatimukset.

VACON® NXP ilmajäähdytteisiä taajuusmuuttajia on saatavilla tehoalueella 0,55 kW–2 000 kW, mutta NXP-taajuusmuuttajia on saatavilla myös nestejäähdytteisinä, joiden tehoalue on 7,5 kW-5 300 kW. VACON® NX-tuoteperheeseen kuuluu myös koteloidut VACON® NXC-taajuusmuuttajat. /2/



Kuva 2. VACON® NXP.

3.2.2 VACON® 100 INDUSTRIAL

VACON® 100-tuotesarja lanseerattiin VACON® NX-tuotesarjan seuraajaksi vuonna 2009. VACON® 100-tuotesarja on saatavilla tehoalueella 0,55kW-800kW.

Tuotesarjan ensimmäinen tuote oli HVAC-markkinoille suunnattu VACON® 100 HVAC. Tuotesarjan seuraavaksi markkinoille tuotu tuote oli VACON® 100 GP (General Purpose), joka sai myöhemmin nimen VACON® 100 INDUSTRIAL (Kuva 3.). Alkuperäisen nimensä mukaisesti VACON® 100 INDUSTRIAL on suunniteltu palvelemaan teollisuutta sen yleisimmissä käyttökohteissa ja sovelluksissa.

VACON® NXP-tuotteen tavoin, VACON® 100 INDUSTRIAL on varustettu monipuolisella ohjausrajapinnalla ja liitettävyydellä. Erillisten kenttäväyläoptioiden lisäksi VACON® 100 INDUSTRIAL on varustettu integroidulla kenttäväylätuella, joka kattaa seuraavat kenttäväyläprotokollat; ProfiNET IO, Ethernet IP, BACNet IP ja Modbus TCP. VACON® NXP-tuotteen tavoin, STO-turvatoiminto ja ATEX sertifioitu termistoritulo on saatavilla myös VACON® 100 INDUSTRIALIIN.

Lisäksi VACON® 100-tuotesarjaan kuuluu VACON® 100 FLOW ja vaativiin oloihin suunniteltu IP66-luokitettu VACON® 100X. /3/



Kuva 3. VACON® 100 INDUSTRIAL.

3.2.3 Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102

VLT® HVAC DRIVE FC-102 tuotiin markkinoille vuonna 2009 ja se on saatavilla tehoalueella 1,1 kW-1400 kW (**Kuva 4.**). VLT® HVAC DRIVE FC-102 on nimensä mukaisesti suunniteltu palvelemaan erityisesti HVAC-sovellusten asettamia vaatimuksia.

Kiinteistöautomaation keskitettyjen ratkaisujen yleistyessä myös vaatimukset toimilaitteiden liitettävyydelle ovat kasvaneet ja tähän HVAC DRIVE vastaa laajalla kenttäväylä- ja liitettävyystuella. HVAC DRIVE tukee myös yleisimpiä HVAC-sovelluksissa käytettäviä moottorityyppejä, muun muassa kestopagneettimoottoreita ja reluktanssimoottoreita.

VLT® HVAC DRIVE-, kuten myös VACON® 100 INDUSTRIAL-taajuusmuuttajissa on Fire Mode-hätäajotila, joka mahdollistaa varman ja luotettavan toiminnan, esimerkiksi savunpoistopuhallinkäytöissä. Fire Mode-tilassa laite kytkee omat sisäiset suojauksensa pois käytöstä ja pyrkii jatkamaan sille asetettua ajotilaa ja nopeusohjetta niin kauan kuin mahdollista.

HVAC DRIVE tarjoaa myös eritasoisia toiminnalliseen turvallisuuteen liittyviä toimintoja, Safe Torque Off-, Safely Limited Speed- ja Safe Maximum Speed-toiminnot. Lisäoptiona HVAC DRIVE-taajuusmuuttajaan on saatavilla termistorikortti, jossa on ATEX-hyväksytty termistoritulo. /4/



Kuva 4. Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102.

3.3 Fidelix FX-Spider-40

Opinnäytetyössä käytettävä logiikka on Fidelix Oy:n tuote FX-Spider-40 (**Kuva 5.**). FX-Spider-40 alakeskus sisältää 40 integroitua I/O-pistettä ja Modbus RTU RS-485 valmiuden.

FX-Spider on varustettu myös 5,7” kosketusnäytöllä, jota kautta laitetta voi konfiguroida tiettyyn pisteeseen asti ja josta saa myös luettua tiedot graafisessa muodossa. FX-Spider sisältää myös integroidut HTTP- ja FTP-palvelintuet, jolloin laitteen ohjaus ja konfigurointi PC:n selaimen kautta onnistuu helposti.

FX-Spider tukee myös GSM- ja 3G-modeemia etähallintaan, joka onnistuu myös TCP/IP-liittymän kautta. /5/

Fidelix Oy:n toimintatapaan perustuen, FX-Spider toimitettiin Fidelix Oy:ltä perusohjelmoituna tuotteena. Perusohjelmointiin oli konfiguroitu opinnäytetyössä käytettävät taajuusmuuttajat ja anturit valmiiksi, ohjelmointiin tarvittavan työkalun vaatiessa rekisteröitymistä Fidelix Oy:n järjestelmiin. Perusohjelmointi perustui Fidelix Oy:n tukihenkilön kanssa käytyyn puhelinkeskusteluun.



Kuva 5. Fidelix FX-Spider-40.

3.4 Paine-erolähetin

Paine-erolähettimeksi valittiin Produalin valmistamat PEL-M-lähettimet, jotka ovat perinteisen analogialähtökanavan lisäksi myös Modbus-väylään liitettäviä (**Kuva 6.**). PEL-M-lähetin soveltuu IP54 luokituksensa perusteella myös ulkotiloihin asennettavaksi. /6/



Kuva 6. Produal PEL-M-paine-erolähetin.

3.5 Ilmamäärälähetin

Ilmamäärälähtetimiksi valittiin Produalin valmistamat IML-M-tuotteet, jotka ovat perinteisen analogialähtökanavan lisäksi Modbus-väylään liitettäviä lähtetimiä (Kuva 7). /7/



Kuva 7. Produal IML-M-ilmamäärälähetin.

3.6 SCHNEIDER ELECTRIC PM3250

Tässä työssä päätettiin käyttää ulkoista energiamittaria tarkkojen ja luotettavien energiamittaustulosten saavuttamiseksi, varmistaaksemme mitattujen tulosten vertailukelpoisuuden. PM3250-mittariin päädyimme sen Modbus-liitettävyyden vuoksi (**Kuva 8.**) /8/



Kuva 8. Schneider-Electric PM3250-tehomittari.

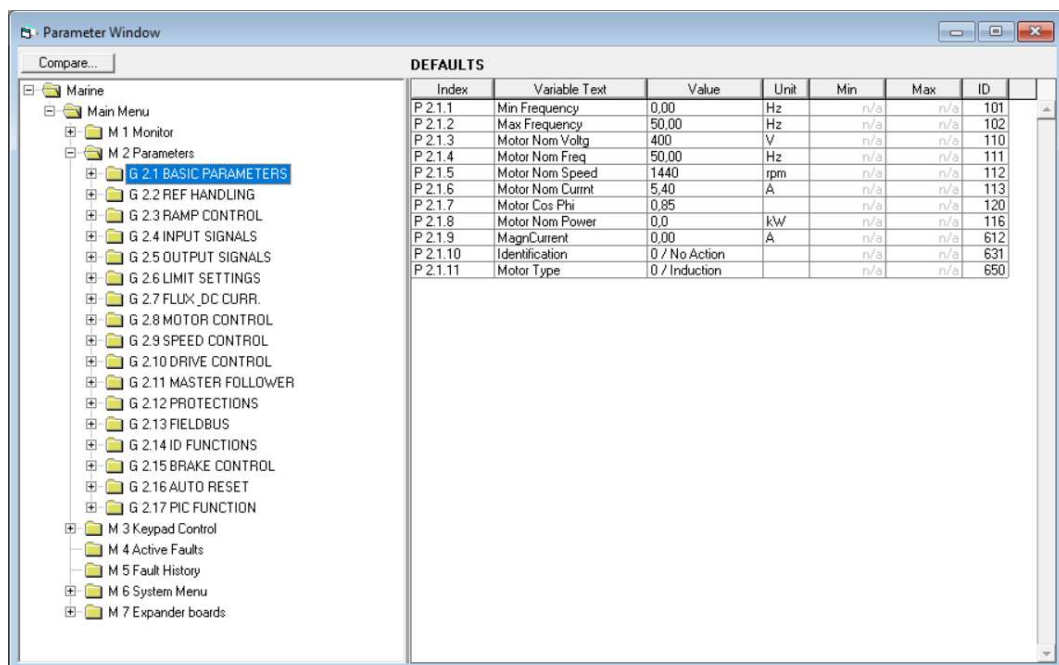
4 KÄYTETYT OHJELMISTOT

4.1 VACON® NCDrive

VACON® NCDrive-työkalu on tehty VACON® NX-tuoteperheen taajuusmuuttajien parametrintia, operointia ja monitorointia varten (**Kuva 9.**). Lisäksi PC-työkalun avulla voidaan laitteista lukea erilaisia diagnostiikkatietoja ja laitteiden tallentamia datalogger-tiedostoja mahdollisten vikatilanteiden yhteydessä.

PC-työkalun avulla voidaan laitteen tilaa ja eri muuttujia seurata Trend recorder-toiminnon avulla reaaliaikaisesti. VACON® NCDrive soveltuu myös offline-työkentelyyn, sillä työkalulla on mahdollista luoda parametritiedostoja etukäteen, kun käytöstä on riittävästi tietoa saatavilla. VACON® NCDrive onkin hyödyllinen työkalu vaativienkin sovellusten käyttöönottojen yhteydessä.

Työkalu on vapaasti ladattavissa Danfossin internetsivuilta ja asennuspakettiin sisältyy myös NCLoad-työkalu, jota käytetään varusohjelmiston tai mahdollisten erikoissovellusten lataamiseksi taajuusmuuttajiin.



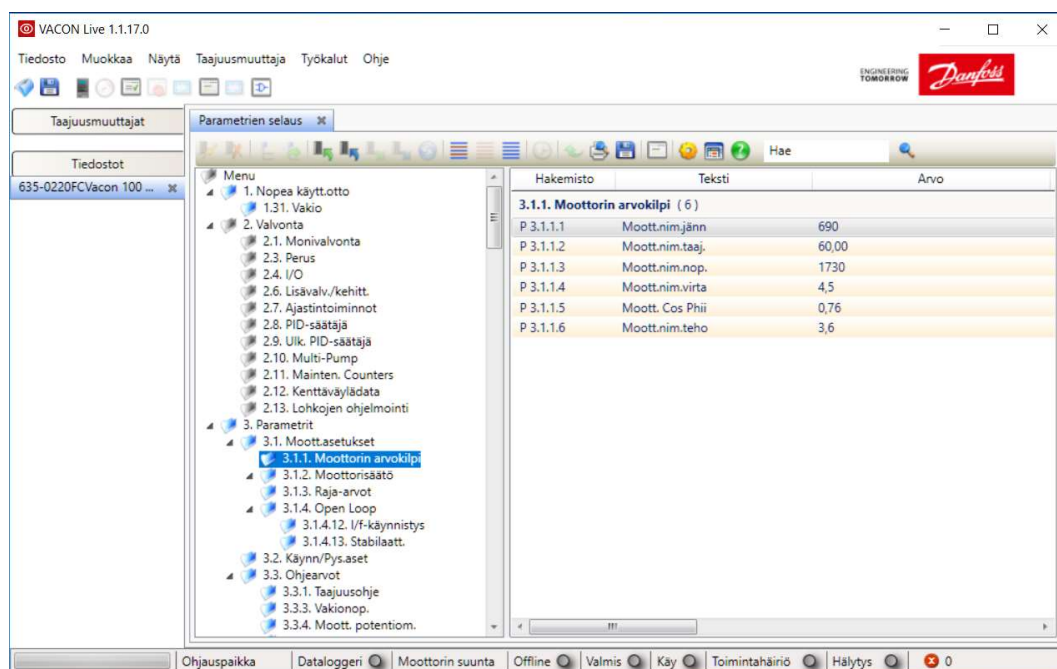
Kuva 9. NCDrive-työkalun parametrintinäkömä.

4.2 VACON® Live

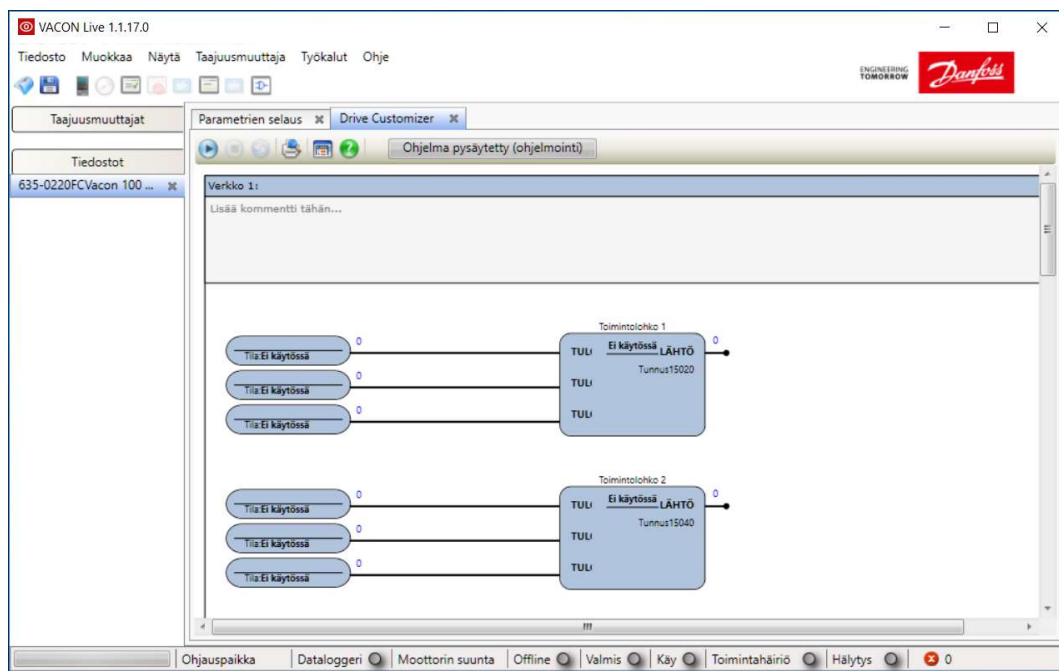
VACON® Live-työkalu on VACON® 20-tuoteperheen ja VACON® 100-tuoteperheen käyttöönottoon, parametointiin, monitorointiin ja diagnosointiin tarkoitettu PC-työkalu (**Kuva 10.**).

Livellä voidaan toteuttaa kaikki samat perustoiminnot kuin NCDrive-työkalulla ja siinä on sisäänrakennettu Drive Customizer-ohjelmointityökalu, jolla voidaan tehdä monipuolisesti muutoksia laitteen toimintoihin (**Kuva 11.**). Ohjelmointityökalu antaa käyttäjälle vapauden ohjelmoida kymmentä eri toimintalohkoa.

Työkalu on vapaasti ladattavissa Danfossin internetsivuilta ja asennuspakettiin sisältyy myös VACON® Loader-työkalu, jota käytetään varusohjelmiston tai mahdollisten erikoissovellusten lataamiseksi taajuusmuuttajiin.



Kuva 10. Live-ohjelmointityökalun parametrinäkymä.



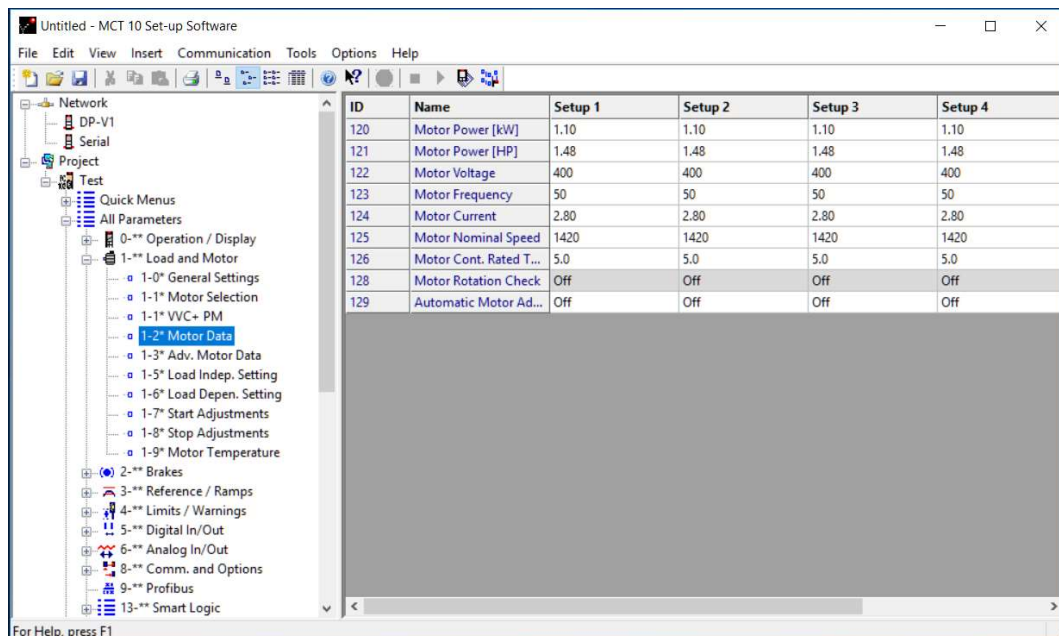
Kuva 11. Drive Customizer-ohjelmointityökalun perusnäkö.

4.3 MCT-10

VLT[®] Motion Control Tool MCT-10 on Danfoss VLT-tuotteiden parametointiin, monitorointiin ja hallintaan tarkoitettu PC-työkalu (**Kuva 12.**).

Työkalulla on mahdollista lukea laitteesta erilaisia diagnostiikkatietoja, kuten aktiiviset hälytykset ja varoitukset sekä vikahistoria.

MCT-10-työkalu soveltuu myös offline-työskentelyyn ja sillä on mahdollista luoda projektikohtaisia parametritiedostoja jo ennen varsinaista käyttöönottilannetta, kunhan saatavilla on riittävän kattavat lähtötiedot, esimerkiksi moottorin arvokilpi-tiedot ja ohjaustapa sekä siihen liittyvät kytkennät.

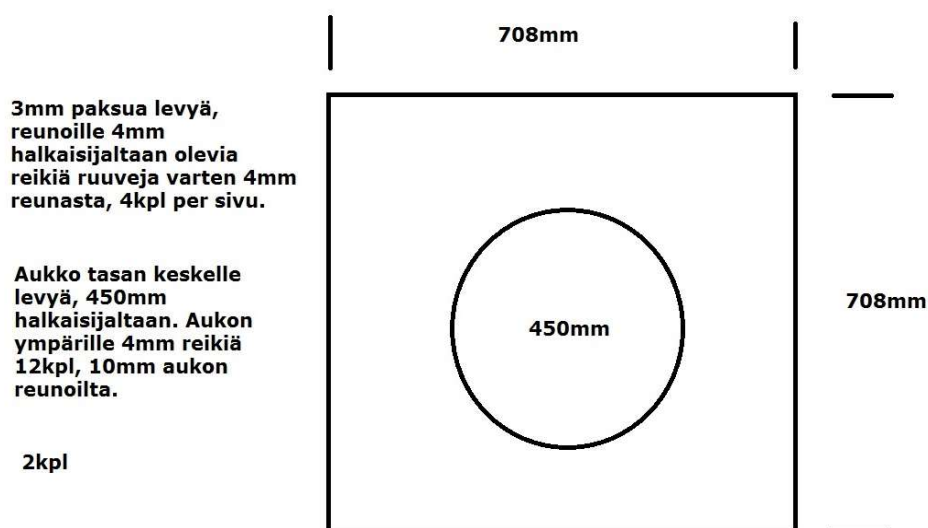


Kuva 12. MCT-10-työkalun parametrinäkömä.

5 MEKAANISET MUUTOKSET/TOIMENPITEET

5.1 Mekaaniseen turvallisuuteen liittyvät asiat

Kosketussuojat tilattiin Evomech nimiseltä vaasalaiselta yritykseltä omiin piirustuksiin perustuen (**Kuva 13.**). Kosketussuojat toimivat samalla myös 400 mm ilmanvaihtokanavan tasopinnalle tarkoitettujen sivuliittimien kiinnityspisteinä (**Kuva 15.**).



Kuva 13. Etu- ja takasuojalevyn mallipiirustus.



Kuva 14. Koja Future-ilmanvaihtokone alkutekijöissään.



Kuva 15. Kosketussuojalevy 400 mm sivuliittimellä.

Koulutuslaitteisto suojattiin yläpuoliselta ja sivulta tapahtuvalta suunnalta kehikolla, joka estää tahattoman kosketuksen jännitteisiin osiin. Tämäkin tilattiin samaiselta yritykseltä omaan piirustukseen perustuen.

5.2 Komponenttien asennukset

Koska kyse on demolaitteistosta, jonka pääasiallinen tehtävä on partnereiden ja asiakkaiden kouluttaminen laitteiden PID-säätäjien käyttöönottoon ja työn tilaajan omat tilat asettavat tiettyjä rajoituksia, laitteet integroitiin ilmastointikoneeseen itseensä, eikä em. syistä katsottu tarpeelliseksi rakentaa laitteille, eikä muille komponenteille erillistä keskusta. Myös kun kyseessä on käyttöönottoon perehdyttävä laitteisto, tehtiin kaikki asennukset kiinteiksi, eikä esimerkiksi anturien kytkentöjen muutoksille rakennettu pikaliittimillä tapahtuvia asennuksia (**Kuva 16.**).

Taajuusmuuttajat asennettiin noudattelemalla valmistajan antamia asennussuosituksia ja asennuksissa otettiin huomioon suositetut ilmavälit, asennusetäisyydet ja asennustapa. Kaikkien laitteiden osalta todettiin vaakatasoon tapahtuva asennus hyväksyttäväksi.

Asennuksen järjestyksen ja ulkoasun siisteyden vuoksi päätettiin asentaa laitteistoon myös johtokourut kaapeloinnin helpottamiseksi ja pieniä yksittäisiä komponentteja, kuten johdonsuojakatkaisijoita ja DC-jännitelähdettä varten myös DIN-kisko.



Kuva 16. Komponentit asennettuna paikoilleen.

5.3 Tuloilman kuristus

Koja Future-ilmanvaihtokoneen prosessisuureen säätövirheen luomiseksi käytettiin Fläktwoods valmistamia mittaus- ja säätölaite IRIS-400-sulkupeltejä imu- ja poistopuolella (**Kuva 17**). Säätö tapahtuu mekaanisesti. Mallistossa on myös moottorikäyttöinen IRIS-M-sarja ja IRIS-S-sarja, jotka soveltuvat haponkestävyyttä vaativiin kohteisiin.



Kuva 17. Fläktwoods mittaus- ja säätölaite IRIS 400.

5.4 Anturit (paine tai virtaus)

Ilmamäärämittaukseen ja paine-eromittaukseen liittyen, antureiden asennus toteutettiin kuvien 18 ja 19 mukaisella sijoittelulla.



Kuva 18. Paine- ja ilmamäärämittareiden sijoittelu.



Kuva 19. Paine- ja ilmamäärämittareiden sijoittelu.

Ilmamäärän ja paine-erojen mittauksia varten tuotiin mittauslaitteistosta muoviletkut kiinteästi IRIS 400 sulkupeltien keskelle (**Kuva 20.**). Tällä pyritään välttämään mittaukselle aiheutuvia vääristymiä, jotka johtuvat sulkupeltien aiheuttamasta vastapaineesta ja päästään myös sulkupeltien asennosta riippumatta aina keskeiseen positioon. Koeajovaiheessa letkut olivat kiinnitettyinä IRIS 400-sulkupeltien kiinteissä mittauspisteissä, mutta aika nopeasti totesimme niiden paikkojen vääristävän ilmamäärän mittausta pellin aiheuttaman vastapaineen takia.



Kuva 20. Mittausjärjestelyt.

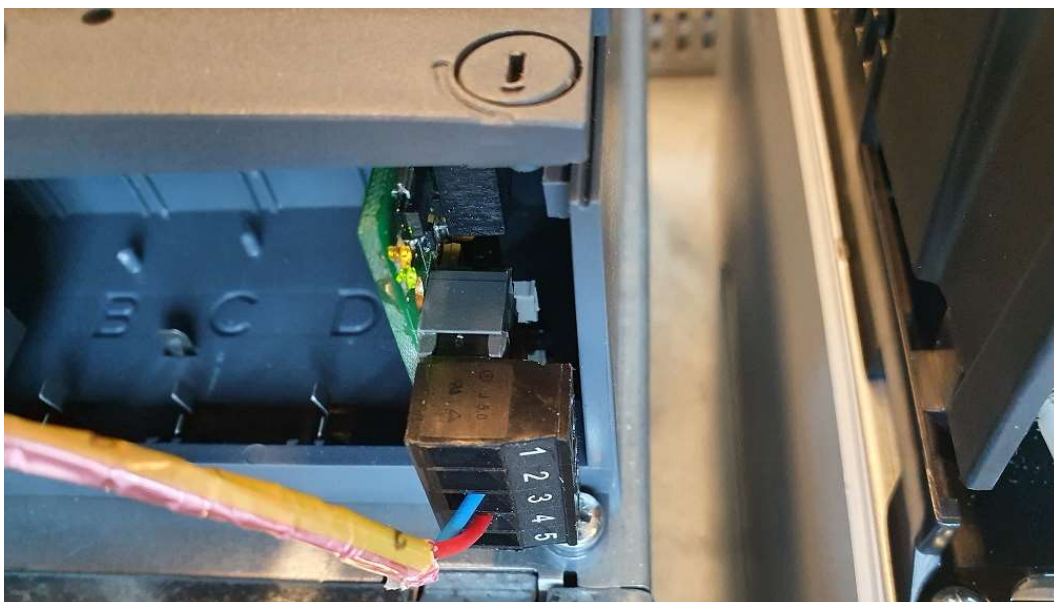
6 SÄHKÖISET KYTKENNÄT JA ASENNUKSET

6.1 Sähköturvallisuuden liittyvät asiat

Koska laitteisto tulee koulutuskäyttöön, täytyi siitä tehdä kosketussuojaukseltaan sellainen, että myös maallikot voivat toteuttaa harjoitteet turvallisesti. Kaikki jännitteiset osat, niin pienjännitteelliset, kuin myös pienoisjännitteelliset, on kosketussuojattu. Laitteisto ja harjoitukset on suunniteltu niin, että kosketussuojauksia ei ole harjoitusten aikana tarpeen poistaa.

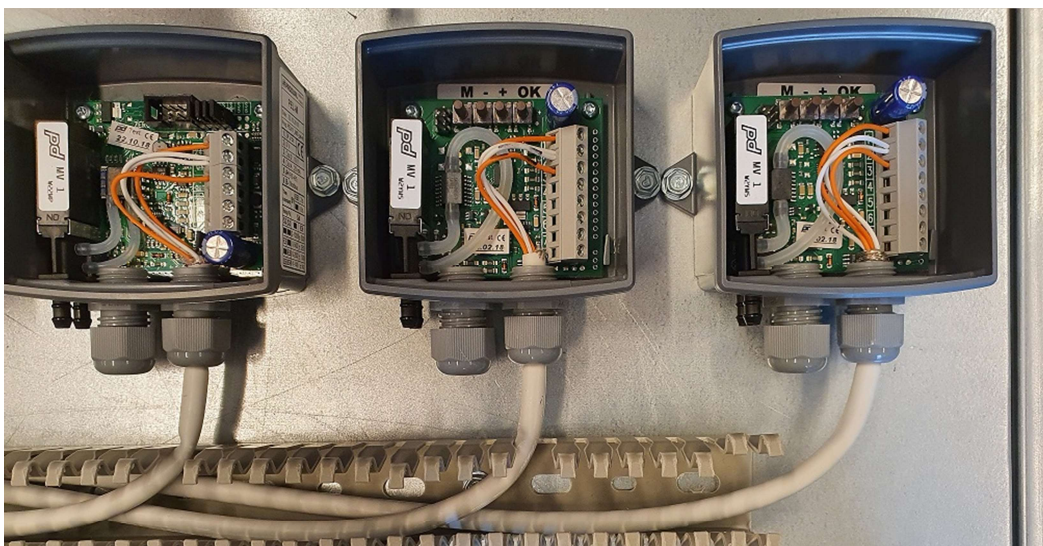
6.2 Taajuusmuuttajien kytkennät

Taajuusmuuttajista ensimmäisenä asennettiin VACON® NXP, jonka asennus Modbus-väylään oli todella helppoa ja vaivatonta, kuten myös VACON® 100 INDUSTRIAL-taajuusmuuttajan asennus. Myöhemmässä vaiheessa kohtasimme pieniä haasteita väyläyhteyttä muodostettaessa väärinkäytösten uhriksi joutuneen VACON® Multiprotocol RS485 OPTC2-kenttäväyläkortin kanssa (**Kuva 21**). Uuden kortin myötä ongelmat poistuivat. Väyläkaapelina käytettiin NOMAK 2x2x0,5+0,5-kaapelia, ja JAMAK 4x2x0,5+0,5-kaapelia.



Kuva 21. VACON® Multiprotocol RS485 OPTC2-kenttäväyläkortti

Kenttäväyläkytkentöjen lisäksi rinnalle rakennettiin I/O-ohjauksen mahdollistavat kytkennät ja ne liitettiin taajuusmuuttajien ohjausrajapintaan siten, että jokaiselle laitteelle tuodaan sekä ilmamäärän mittaukseen, että paine-eron mittaukseen perustuvat mittaustiedot 0-10V jänniteviestinä (**Kuva 22.**). Näin käyttöönottoilanteita silmällä pitäen, voidaan laitteiden sisäisten PID-säätäjien käyttöönottoa harjoitella tuotesarjakohtaisesti ja prosessisuurekohtaisesti. Näin voidaan koulutettavalle henkilöstölle kattavasti esittää eri tuotteiden PID-säätäjien ominaisuuksia ja samalla esittää yleisimpien säätösuureiden, kuten ilmamäärän säätöön liittyviä lainalaisuuksia. I/O-kaapeloinnissa käytettiin NOMAK 2x2x0,5+0,5-kaapelia.



Kuva 22. I/O-kaapeloinnit Prodeal-antureille.

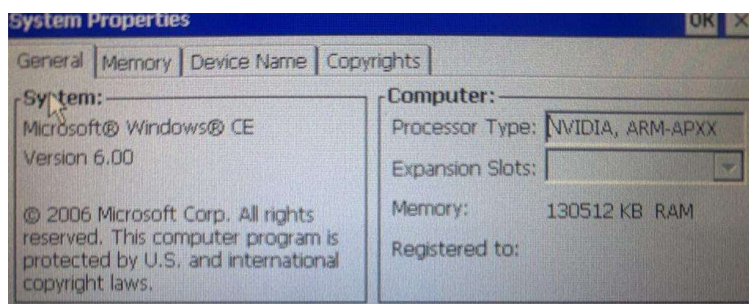
Taajuusmuuttajien syöttöpuolen kytkennät toteutettiin Vaasan SLO:lta hankituilla 16A kojevastikkeilla (**Kuva 23.**). Taajuusmuuttajien lähtöpuolen kytkennät toteutettiin MCMK-kaapelilla, myös 16A voimavirtaliitoksia hyväksikäyttäen, koska tilaajan toiveena oli saada nopea ja selkeä liitettävyys laitteiden vaihdon yhteydessä.



Kuva 23. Kojevastikkeet.

7 FIDELIX FX-SPIDER-40-OHJELMOINTI

Fidelix FX-Spider-40-laitteessa on kosketusnäyttö, josta perusohjelmointi voidaan myös toteuttaa. Fidelix FX-Spider-40 käyttö perustuu integroituun HTTP- ja/tai FTP-palvelimeen. Fidelix FX-Spider-40 peruskäyttöliittymän alustana toimii Microsoft® Windows® CE Ver.6.00 (**Kuva 24.**). Käyttökokemuksen helpottamiseksi selainpohjainen käyttö on suositeltavaa.



Kuva 24. Fidelix FX-Spider-40-käyttöliittymän alusta.

Fidelix FX-Spider-40 toimitettiin meille valmiiksi perusohjelmoituna perustuen meiltä tulleeseen informaatioon ja toimitettiin ilman lisenssipohjaista ohjelmointityökalua, joten itse laitteen ohjelmoinnissa huomattujen virheiden korjaamiseen tarvitsimme toimittajalta teknistä tukea. Onneksemme paikallisen toimiston henkilö oli todella avulias ja kävi tekemässä tarvittavat muutokset perusohjelmointiin, koska projekti oli täysin pysähdyksissä rajoitteiden johdosta.

Pääsyy projektin pysähtymiseen oli, että alkuperäisellä ohjelmoinnilla mittaukset tuotiin Fidelix FX-Spider-40:lle analogisina signaaleina, vaikka alun perin tarkoitus oli tuoda mittaustiedot Modbus-väylää pitkin. Perusohjelmointiin lisättiin myöhemässä vaiheessa Modbus-väylän kautta toimitetut mittaustiedot.

Nykyisessä ja viimeisimmässä mallissa on mahdollista käyttää sekä analogista, että digitaalista (väylä) mittaustietoa riippuen halutusta käyttöönottotilanteen simuloinnista (**Kuva 25.**).



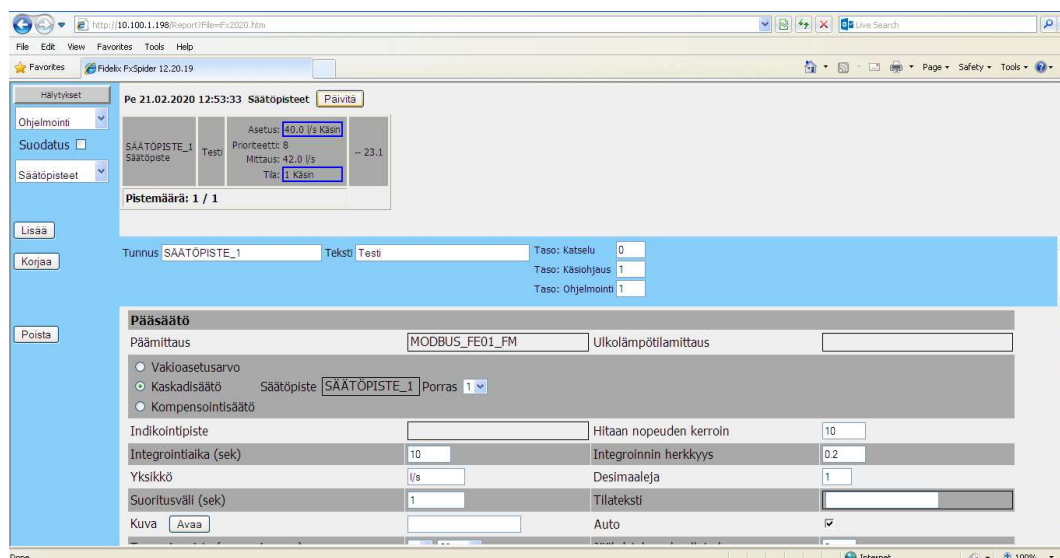
Kuva 25. Mittausnäkömät analogisena ja väylälle.

Fidelix FX-Spider-40-käyttöliittymä ei ollut tuttu, joten liikkeelle täytyi lähteä perusasioista. Fidelix FX-Spider-40 käyttöönotto tuotti hieman hankaluuksia jokseenkin puutteellisen käyttömanuaalin takia.

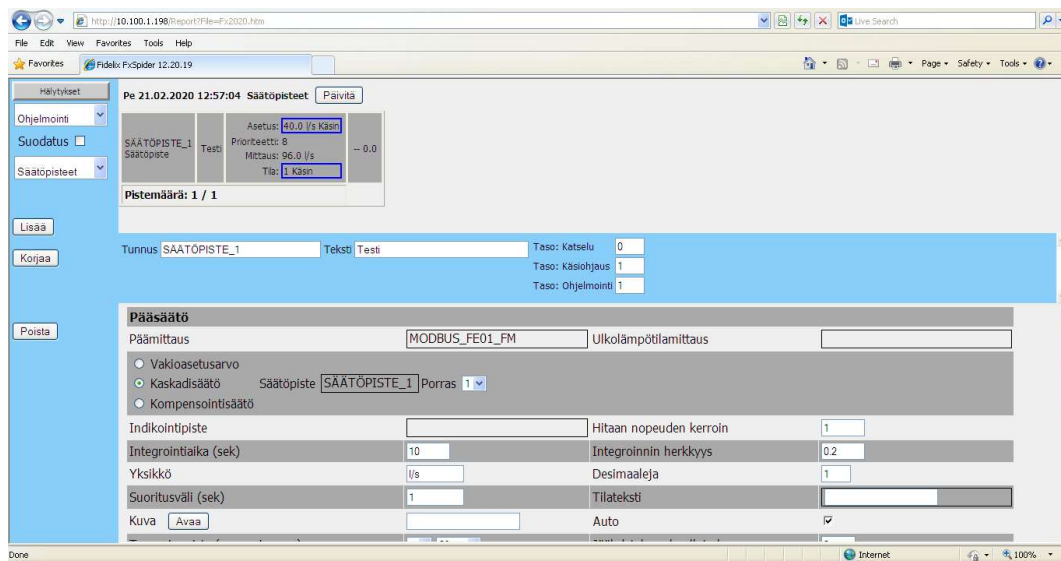
Mittauspisteiden luonti tuotti hieman haasteita ja myös Proidualin Modbus-aloitusrekisterin ilmoitusmalli sekaannutti asioita. Koska Fidelix FX-Spider-40-tuotteesta ei ollut aiempaa kokemusta, manuaaliin ja käyttöliittymään tutustumiseen käytettiin huomattavan paljon tunteja, että laitteen ja käyttöliittymän ominaisuudet tulisivat tutuksi. Fidelix FX-Spider-40:ssa käytetyt P- ja I-osiin viittaavat termistöt eivät olleet meille tuttuja. Fidelix FX-Spider-40 ilmaisee nämä ilmeisesti omalla termistöllään.

Aikamme asian parissa vietettyämme löysimme termin ”Hitaan nopeuden kerroin”, jota muuttelemalla alkoi prosessin säätö toimimaan halutulla tavalla ja pysyi vakaana. Muutamien tuntien jälkeen alkoi muodostua kuva millaisilla arvoilla prosessi voisi toimia parhaimmillaan.

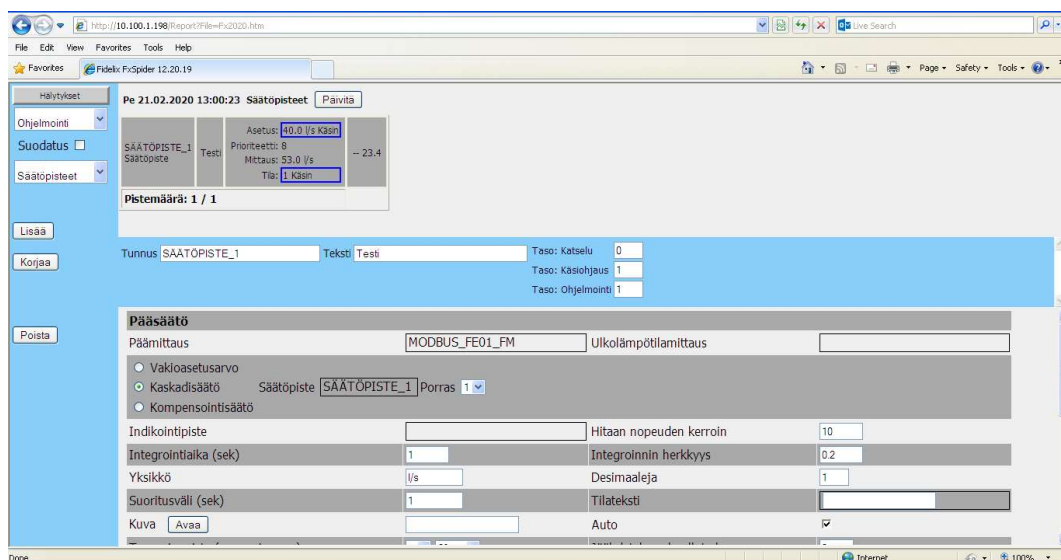
Kuvissa 26-28 on esitetty tehdyt muutokset asetteluihin. Kuvassa 29 näkyy selkeästi hitaan nopeuden kertoimen vaikutus VACON® NXP-laitteen säätöviestiin.



Kuva 26. Tilanne 1, jossa kerroin 10 ja integrointi-aika 10 sekuntia.



Kuva 27. Tilanne 2, jossa kerroin 1 ja integrointi-aika 10 sekuntia.



Kuva 28. Tilanne 3, jossa kerroin 10 ja integrointi-aika 1 sekunti.



Kuva 29. Tilanteiden 1, 2 ja 3 säätöviestin erot graafisesti Vacon NXP-laitteelle.

8 PID-SÄÄTÄJÄT OLETUSARVOILLA

8.1 Taajuusmuuttajien oletusparametrit

Taajuusmuuttajien perusparametointi aloitettiin tehdasasetuksista. Laitteissa on olemassa tehdasoletukset, jotka moottorin kilpitietojen osalta on sidottu laitteen tehoon, ja nämä oletukset laitteissa ovat yleisimpien moottoreiden nimellisarvoja. Ohjaukseen liittyvät oletusparametrit ovat samat, laitteen tehosta riippumatta. Sovelluskohtaisia eroja toki löytyy. Esimerkiksi VACON[®] NXP-laitteessa ohjaus tapahtuu oletuksena suoralla taajuusohjeella, joka annetaan jänniteviestinä. Koska demolaitteistossa käytetään myös laitteiden sisäisiä PID-säätäjiä, tulee laite parametroida siten, että laitteelle annetaan asetusarvo, jota verrataan analogiatuloon tuotun mittausarvoon. Mittausarvon, asetusarvon ja lopulta näiden eroarvon (PID-virhearvo) avulla saadaan PID-lähdölle arvo, joka laitteen sisäisessä laskennassa muutetaan taajuusohjeeksi.

Kuten aina, PID-säätäjän oletusarvot ovat hyvät oletamat ja aika hyvin sopivatkin johonkin kevyempään prosessiin, esim. IV-käyttöön sellaisenaankin. Kuitenkin oletusarvoilla prosessi on kohtalaisen ärhäkkä ja ei välttämättä sovi ko. prosessin säätämiseen vaan vaatii hienosäätöä. Isot raskaat prosessit, kuten pumppuasemat, vaativat aika rauhallisen säädön, koska raskaassa prosessissa täytyy ottaa huomioon myös mekaaniset rasitukset eri tavalla kuin kevyen mekaniikan ohjauksessa.

Seuraaviin alaotsikoihin olemme koonneet laitteiden käyttöönottovaiheeseen liittyvät tärkeimmät parametrit PID-säätäjän osalta, eikä tässä käsitellä muita tehdasasetuksiin tehtäviä muutoksia, kuten moottorin arvokilpitietojen muutoksia.

8.1.1 VACON® NXP PID-säätäjä oletusarvoilla

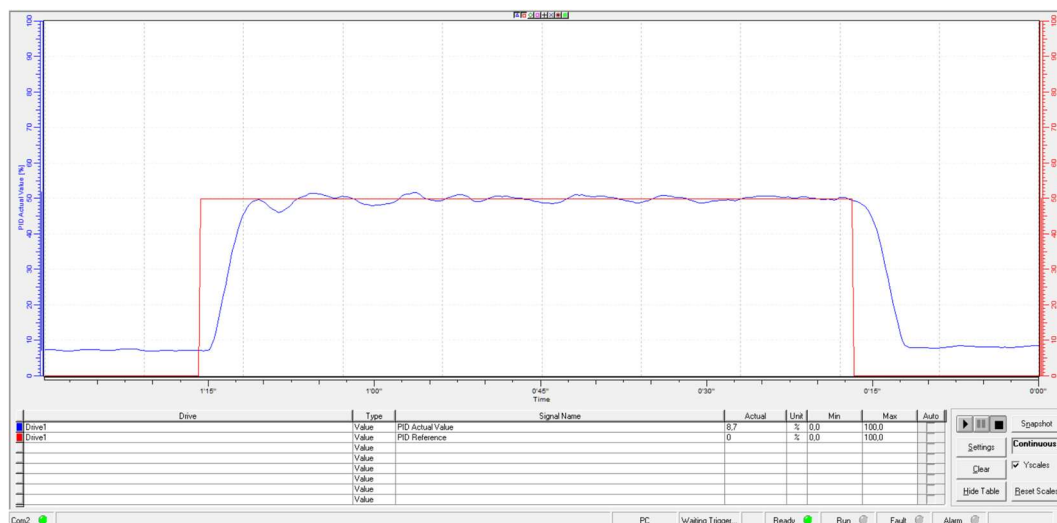
VACON® NXP ajettiin aluksi tehdasasetuksilla, että saadaan vertailupohja tuleville Ziegler-Nicholsin-menetelmällä saaduille säätäjän arvoille (**Kuva 30.**).

| | | | | | | |
|----------|------------------|-------|---|------|--------|-----|
| P 2.1.12 | PID-Contr Gain | 100,0 | % | 0,0 | 1000,0 | 118 |
| P 2.1.13 | PID-Contr I Time | 1,00 | s | 0,00 | 320,00 | 119 |
| P 2.1.14 | PID-Contr D Time | 0,00 | s | 0,00 | 100,00 | 132 |

Kuva 30. VACON® NXP parametrit ennen muutoksia.

Kuva ajosta oletusarvoisilla parametreilla, joissa on pyydetty 50 %:n asetusarvoa parametrilla P3.4 PID-ohjearvo, ID167. Kuten kuvasta 31 näkee, VACON® NXP:n tehdasasetteluarvot ovat säätäjän kannalta jo varsin kelvolliset arvot, eikä takaisinkytkennässä näy esimerkiksi merkittävää asetusarvon ylitystä.

Huomion arvoista kuvaajassa ja myöhemmässä vertailussa Ziegler-Nichols-menetelmällä saatuihin säätäjän arvoihin on, että tehtaan oletusarvoilla laite toimii PI-säätäjänä. Myöhemmin esitetyillä Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetuilla arvoilla laite toimii PID-säätäjänä.



Kuva 31. Järjestelmän vaste VACON® NXP PID-säätäjän oletusarvoilla.

8.1.2 VACON® 100 INDUSTRIAL PID-säätäjä oletusarvoilla

VACON® 100 INDUSTRIAL-laitteen PID-säätäjän tehdasasetteluarvot ovat vastaavat kuin edellisessä kohdassa nähdyt VACON® NXP:n tehdasasetteluarvot (Kuva 32).

| Index | VariableText | Value | Min | Max | Unit |
|---------------------------------|------------------|--------|------|---------|------|
| 1.34. PID Control (10) | | | | | |
| P 1.34.1 | Gain | 100,00 | 0,00 | 1000,00 | % |
| P 1.34.2 | Integration Time | 1,00 | 0,00 | 600,00 | s |
| P 1.34.3 | Derivation Time | 0,00 | 0,00 | 100,00 | s |

Kuva 32. VACON® 100 INDUSTRIAL-laitteen PID-säätäjän oletusarvot.

Kuva järjestelmän vasteesta oletusarvoisilla parametreilla, jossa on pyydetty 1250 l/s:n (50 %:n) asetusrvoa parametrilla P3.13.2.1 Keypad SP 1, ID167.

Kuten kuvasta 33 näkee, PID-säätäjän tehdasasettelut eivät ole huonot arvot, vaan säätäjä toimii melko stabiilisti, eikä siinä näy juuri lainkaan asetusrvon ylitystä.



Kuva 33. Järjestelmän vaste VACON® 100 INDUSTRIAL PID-säätäjän oletusarvoilla.

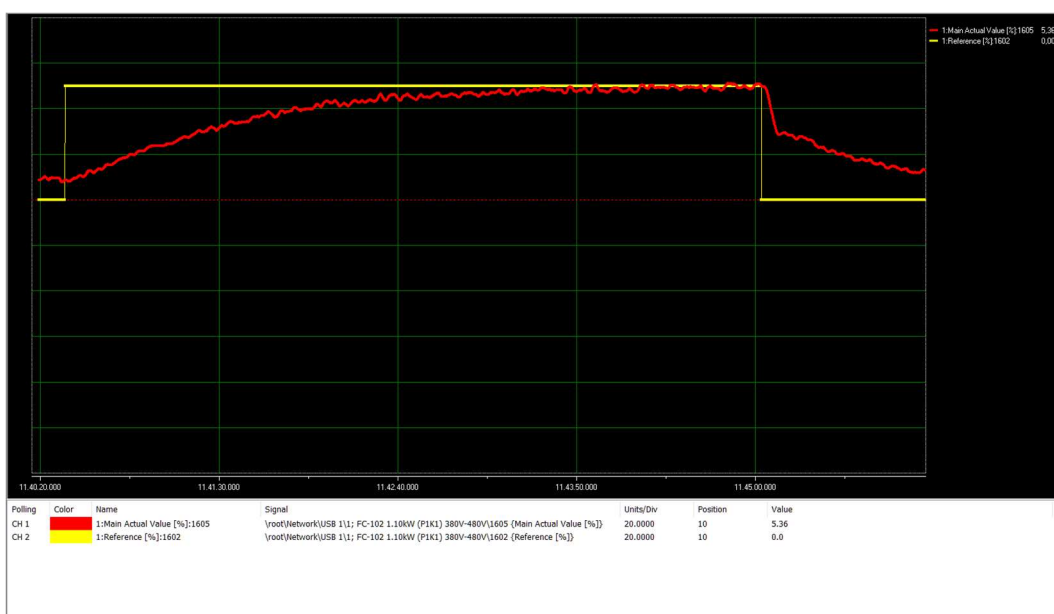
8.1.3 Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102 PID-säätäjä oletusarvoilla

Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102 oletusarvot poikkeavat merkittävästi molempien Vacon-brändin taajuusmuuttajien PID-säätäjien oletusarvoista. Tämä on ymmärrettävää, sillä verokkilaitteet on suunniteltu eri tuotekehitysyksikössä ja yhtiössä. (Kuva 34.).

| | | | | | | |
|------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 2093 | PID Proportional Gain | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | |
| 2094 | PID Integral Time | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | s |
| 2095 | PID Differentiation Time | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | s |

Kuva 34. Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102 PID-säätäjän oletusarvot.

Kuten tehtaan oletusarvoista jo voidaan päätellä, on PI-säätäjän asettelu varsin hidas. Oletusarvoilla suoritettu koeajo ja siitä otettu kuvaaja vahvistaa päätelmän. Kuvaajasta voidaan havaita, että järjestelmän takaisinkytkentä saavuttaa asetusarvon vasta n. 3,5-4 minuutin kuluttua siitä, kun asetusarvoksi on asetettu 50 %. (Kuva 35.).



Kuva 35. Järjestelmän vaste VLT® HVAC DRIVE FC-102 PID-säätäjän oletusarvoilla.

9 SÄÄTÄJIEN VIRITYS ZIEGLER-NICHOLSIN MENETELMÄLLÄ

9.1 Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetut parametrit

Tehtaan oletusarvoilla tehtyjen koeajojen jälkeen ryhdyttiin säätäjien P-, I- ja D-arvoja virittämään Ziegler-Nicholsin menetelmällä. Menetelmän perusteet opiskeltiin Aalto University Wiki-sivustolta. /9/

Kaikille taajuusmuuttajille tehtiin värähtelykoe, jossa laitteet aseteltiin toimimaan ensin pelkkänä P-säätäjänä. Ziegler-Nicholsin-menetelmässä säätäjän vahvistusta kasvatetaan, kunnes säädetyin suuren takaisinkytkentäsignaali alkaa oskilloimaan. Kaikkien tutkittavien taajuusmuuttajien P-säätäjien vahvistusta kasvatettaessa huomattiin, että ne kaikki alkoivat oskilloimaan n. 160 %:n vahvistuksella, joten tätä käytettiin lähtöarvona myöhemmin tapahtuvassa laskennassa, jossa lasketaan PID-säätäjille arvot laitekohtaisesti. Kun vahvistus joka saa takaisinkytkentäsignaalin oskilloimaan harmonisesti vakioamplitudilla on selvillä, voidaan siitä määrätä kaksi termiä; kriittinen vahvistus K_{pkr} ja kriittinen jaksonaika T_{kr} . Kriittinen vahvistus on se vahvistuksen arvo, jolla takaisinkytkentäsignaali saavutti oskillointipisteen, eli tässä tapauksessa 160 %, ja kriittinen jaksonaika on oskilloivan takaisinkytkentäsignaalin jaksonaika, joka tässä tapauksessa oli 4,66 s. Kuvassa 36 näkyvät kertoimet, joilla edellä mainittuja termejä kertomalla saadaan kunkin säätäjän tapauksessa arvot P-, I- ja D-osille.

| Säädin | K_p | T_I | T_D |
|--------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| P | $0,5 \cdot K_{pkr}$ | - | - |
| PI | $0,455 \cdot K_{pkr}$ | $0,85 \cdot T_{kr}$ | - |
| PID | $0,6 \cdot K_{pkr}$ | $0,5 \cdot T_{kr}$ | $0,12 \cdot T_{kr}$ |

Kuva 36. Ziegler-Nichols-menetelmän kertoimet ja kaavat.

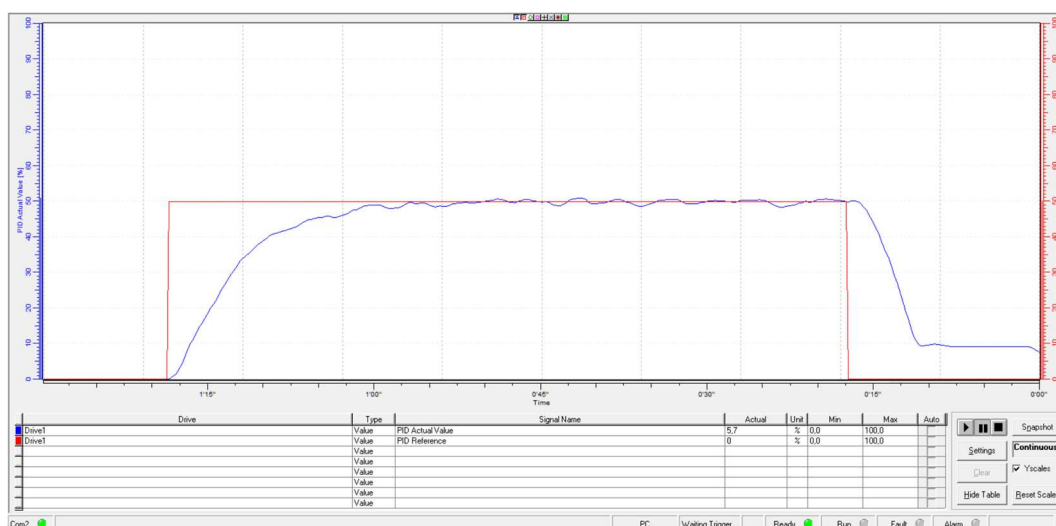
9.1.1 VACON® NXP

VACON® NXP:n PID-säätäjälle määriteltiin kuvan 36 kertoimien ja edellä tehdystä askelkokeesta saatujen termien tulona kuvassa 37 näkyvät arvot P-, I- ja D-osille (Kuvat 36-37.). Tässä siis tulee huomata, että oletusasetuksilla laite toimii PI-säätäjänä, mutta nyt laskettiin Ziegler-Nicholsin menetelmällä uudet PID-säätäjän arvot.

| | | | | | | |
|----------|------------------|------|---|------|--------|-----|
| P 2.1.12 | PID-Contr Gain | 96,0 | % | 0,0 | 1000,0 | 118 |
| P 2.1.13 | PID-Contr I Time | 2,35 | s | 0,00 | 320,00 | 119 |
| P 2.1.14 | PID-Contr D Time | 0,56 | s | 0,00 | 100,00 | 132 |

Kuva 37. VACON® NXP PID-säätäjän arvot Ziegler-Nichols-menetelmästä.

Kuvasta 38 nähdään järjestelmän vaste, kun PID-säätäjälle on asetettu Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetut säätäjän arvot. Kun edellä mainittuja säätäjän arvoja verrataan VACON® NXP:n oletusarvoihin, voidaan olettaa, että säätäjä on hitaampi, sillä vahvistus on aavistuksen pienentynyt ja vastaavasti integrointiaika on kasvanut. Tämän kuva 38 vahvistaa, sillä aika, joka kuluu asetusarvon askelmaisesta noususta siihen, että takaisinkytkentä saavuttaa 50 %:n asetusarvon, on kasvanut 5 sekunnista noin 25 sekuntiin.



Kuva 38. Järjestelmän vaste VACON® NXP:n PID-säätäjällä Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetuilla arvoilla.

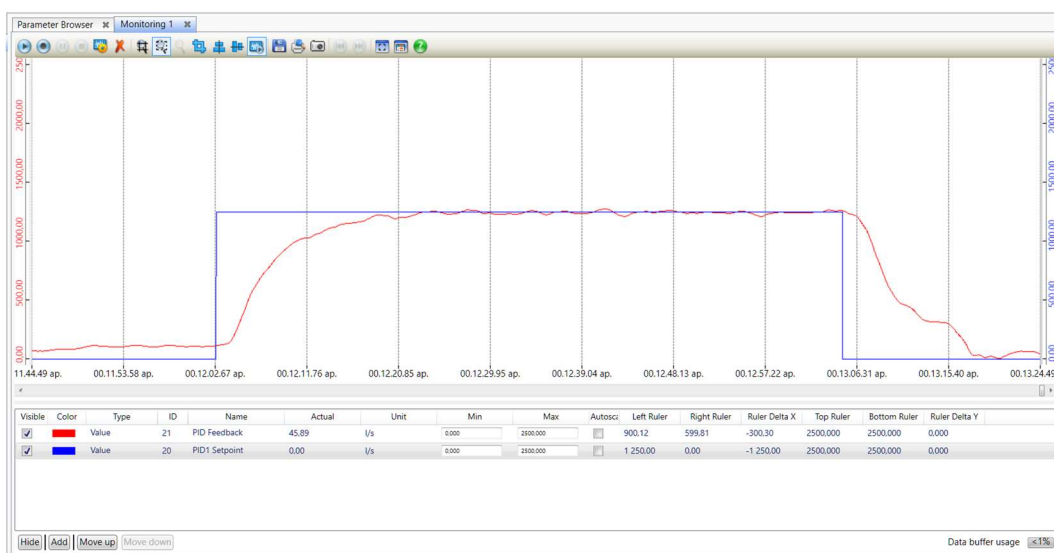
9.1.2 VACON® 100 INDUSTRIAL

VACON® 100 INDUSTRIAL-laitteen PID-säätäjälle, siis käytettiin samoja arvoja kuin muillekin laitteille, koska värähtelykokeesta saadut kriittinen vahvistus K_{pkr} ja kriittinen jaksonaika T_{kr} olivat kaikkien laitteiden värähtelykokeissa vastaavat. VACON® NXP:n tavoin, myös VACON® 100 INDUSTRIAL toimii oletusasetuksilla PI-säätäjänä, mutta nyt laitteelle on tuotettu Ziegler-Nicholsin menetelmällä arvot PID-säätäjälle (Kuva 39.).

| Index | VariableText | Value | Min | Max | Unit |
|---------------------------------|------------------|-------|------|---------|------|
| 1.34. PID Control (10) | | | | | |
| P 1.34.1 | Gain | 96,00 | 0,00 | 1000,00 | % |
| P 1.34.2 | Integration Time | 2,35 | 0,00 | 600,00 | s |
| P 1.34.3 | Derivation Time | 0,56 | 0,00 | 100,00 | s |

Kuva 39. VACON® 100 INDUSTRIAL PID-säätäjän arvot Ziegler-Nicholsin menetelmästä.

Kuvasta 40 voimme huomata, että säätäjä on hidastunut aivan kuten hidastui VACON® NXP:kin edellisessä kohdassa. Takaisinkytkentä saavuttaa tässäkin 50 %:n (1250 l/s) asetusravon noin 25 sekunnissa, kun se oletusarvoilla saavutti asetusravon, jo noin 5 sekunnissa. Pysyvän tilan stabiilisuus on hivenen parantunut.



Kuva 40. Järjestelmän vaste VACON® 100 INDUSTRIAL:n PID-säätäjällä Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetuilla arvoilla.

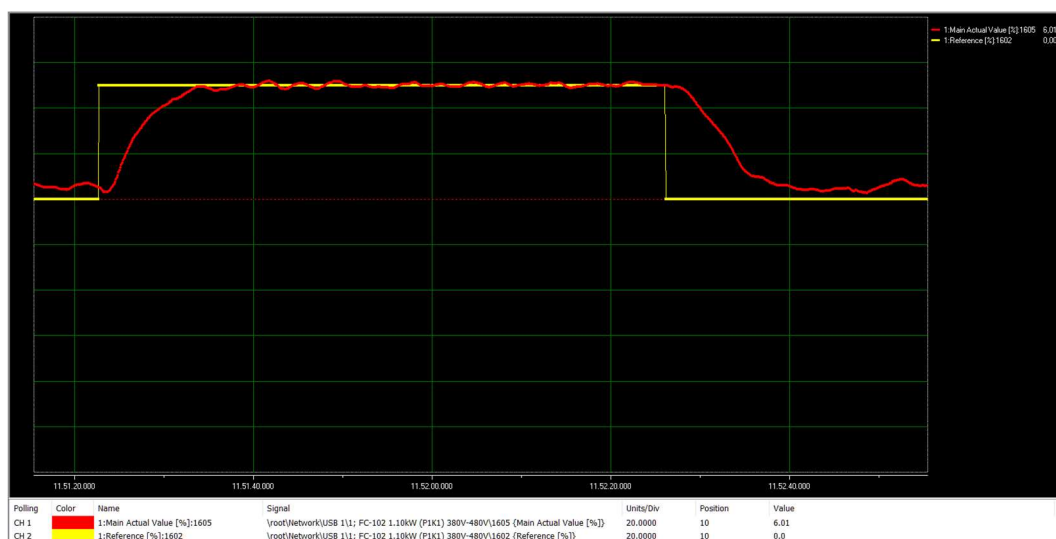
9.1.3 Danfoss VLT® HVAC DRIVE FC-102

Muiden edellä tutkittujen taajuusmuuttajien tapaan, myös VLT® HVAC DRIVE FC-102-laitteelle aseteltiin samat PID-säätäjän P-, I- ja D-osien arvot. Värähtelykokeesta saadut tulokset olivat likimäärin samat, ainoastaan kriittisen jaksonajan osalta nähtiin jaksojen välillä jonkinlaista hajontaa. Tämä hajonta kuitenkin poistui, kun oskilloinnin annettiin jatkua pidempään ja kriittinen jaksonaika saavutti harmonisen pisteen jääden n. 4,7 sekunnin mittaiseksi. (Kuva 41.).

| | | | | | | |
|------|--------------------------|------|-------|-------|-------|---|
| 2093 | PID Proportional Gain | 0.96 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | |
| 2094 | PID Integral Time | 2.35 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | s |
| 2095 | PID Differentiation Time | 0.56 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | s |

Kuva 41. VLT® HVAC DRIVE FC-102 PID-säätäjän arvot Ziegler-Nichols-menetelmällä tuotettuna.

Kuten kuvasta 42 voimme todeta, säätäjän voidaan todeta olevan yhteneväinen edellä tutkittujen laitteiden kanssa. Asetusarvo nostetaan 50 %:iin, kuten aikaisemmissakin kohdissa, ja se saavutetaan n. 20 sekunnissa, eli hieman verrokkejaan nopeammin. Kun verrataan tuloksia laitteen oletusarvoihin, voidaan todeta säätäjän nopeutuneen reilusti. Oletusarvoilla järjestelmän vaste oli varsin pitkä, ja säätäjä saavutti asetussarvon vasta noin 3,5-4 minuutin kuluttua asetussarvon askelmaisesta noususta.



Kuva 42. Järjestelmän vaste VLT® HVAC DRIVE FC-102:n PID-säätäjällä Ziegler-Nicholsin menetelmällä tuotetuilla arvoilla.

10 MITTAUKSET

10.1 Hyötysuhde

Laitteiston hyötysuhteita nopeussäädön ja kuristussäädön välillä verrattiin laskennallisesti. Nopeussäädetyin laitteiston laskennallista hyötysuhdetta määritettäessä otettiin huomioon taajuusmuuttajan, moottorin ja puhaltimen hyötysuhteet. Taajuusmuuttajan hyötysuhde vaihtelee kuormituksen ja nopeuden mukaisesti, pääsääntöisesti siten, että pienemmillä kuormilla ja nopeuksilla saavutetaan hieman huonompia hyötysuhdearvoja. Näin ollen lähempänä nimellistä kuormitusta ja nopeutta saavutetaan paras mahdollinen hyötysuhde. Vastaavasti kuristussäädön laskennallista hyötysuhdetta määriteltäessä otettiin huomioon moottorin ja puhaltimen hyötysuhde.

Alla laskettu nopeussäädetyin laitteiston hyötysuhde 50% kuormalla ja 50% nopeudella nimellisestä. Tätä merkitään tunnuksella $h_{SC50\%}$.

$$\eta_{SC50\%} = \eta_{FC} * \eta_M * \eta_F = 0,96 * 0,828 * 0,692 = 0,55 \quad (1)$$

Alla laskettuna nopeussäädetyin laitteiston hyötysuhde 100% kuormalla ja 100% nopeusohjeella nimellisestä. Tätä merkitään tunnuksella $h_{SC100\%}$.

$$\eta_{SC100\%} = \eta_{FC} * \eta_M * \eta_F = 0,98 * 0,828 * 0,692 = 0,56 \quad (2)$$

10.1.1 Taajuusmuuttajakäyttö vs. ”DOL”-käyttö.

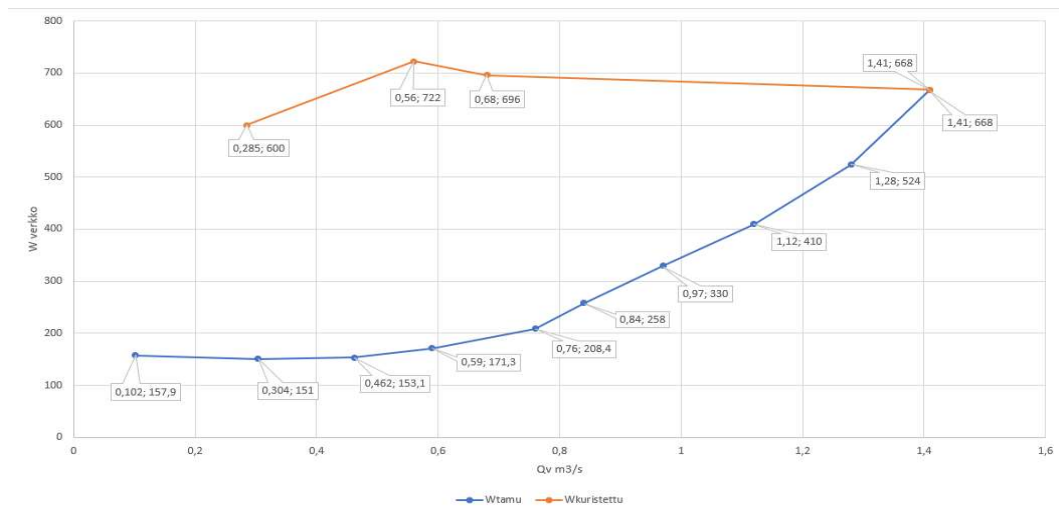
Testiajot suoritettiin siten, että ensin ajettiin taajuusmuuttajalla ohjattuna IRIS-400-peltien asennolla 0 eli täysin auki 5Hz pykälässä aina 50Hz asti, jolla saimme mallinnettua eri asetuksilla saatavat ilmvirtauksien määrät. Pro dual IML-M oli säädetty k-arvoltaan vastaamaan IRIS-400 mukana tullutta k-arvo taulukkoa.

Tämän jälkeen ajoimme taajuusmuuttajalla 50Hz nopeussäätönä, jolla simuloimme suorasyöttöä kuristussäädössä. Vertailua varten kirjjasimme tulokset alla olevan kuvan 43 mukaisesti. Exceliä hyväksikäyttäen laskimme arvot myös puhaltimen kokonaishyötyteholle P_{tF} , siipipyöräteholle P_R ja moottorin akseliteholle P_M .

| V100 ohjaus | pelti 0 | Hz | W | VA | A | PF | l/s | m3/s | l/s laskettu | l/s ero | Pa diff | odual k-arvo | db | PtF | PR | PM |
|-------------|---------|----|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------------|---------|---------|--------------|----|-------|-------|-------|
| | | 5 | 157,9 | 225,2 | 0,321 | 0,701 | 102 | 0,102 | 135,4 | 33,4 | 0,7 | k=131 r=0,2 | 55 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| | | 10 | 151 | 214,4 | 0,303 | 0,705 | 304 | 0,304 | 335,7 | 31,7 | 4,3 | k=131 r=0,2 | 60 | 1,3 | 1,9 | 1,9 |
| | | 15 | 153,1 | 219 | 0,311 | 0,699 | 462 | 0,462 | 511,9 | 49,9 | 10 | k=131 r=0,2 | 57 | 4,6 | 6,7 | 6,8 |
| | | 20 | 171,3 | 245 | 0,348 | 0,699 | 590 | 0,59 | 667,4 | 77,4 | 17 | k=131 r=0,2 | 57 | 10,0 | 14,5 | 14,8 |
| | | 25 | 208,4 | 295,6 | 0,42 | 0,705 | 760 | 0,76 | 841,1 | 81,1 | 27 | k=131 r=0,2 | 62 | 20,5 | 29,7 | 30,3 |
| | | 30 | 258 | 365,5 | 0,519 | 0,706 | 840 | 0,84 | 1023,8 | 183,8 | 40 | k=131 r=0,2 | 66 | 33,6 | 48,6 | 49,5 |
| | | 35 | 330 | 455 | 0,644 | 0,724 | 970 | 0,97 | 1167,3 | 197,3 | 52 | k=131 r=0,2 | 68 | 50,4 | 72,9 | 74,4 |
| | | 40 | 410 | 551 | 0,78 | 0,745 | 1120 | 1,12 | 1373,6 | 253,6 | 72 | k=131 r=0,2 | 71 | 80,6 | 116,5 | 118,9 |
| | | 45 | 524 | 684 | 0,966 | 0,766 | 1280 | 1,28 | 1518,6 | 238,6 | 88 | k=131 r=0,2 | 74 | 112,6 | 162,8 | 166,1 |
| V100 Suora | pelti 0 | 50 | 668 | 863 | 1,215 | 0,774 | 1410 | 1,41 | 1720,8 | 310,8 | 113 | k=131 r=0,2 | 76 | 159,3 | 230,2 | 234,9 |
| V100 Suora | pelti 4 | 50 | 696 | 895 | 1,266 | 0,778 | 680 | 0,68 | 842,3 | 162,3 | 98 | k=68 r=0,145 | 77 | 66,6 | 96,3 | 98,3 |
| V100 Suora | pelti 6 | 50 | 722 | 922 | 1,301 | 0,83 | 560 | 0,56 | 770 | 210 | 207 | k=38 r=0,115 | 78 | 115,9 | 167,5 | 170,9 |
| V100 Suora | pelti 8 | 50 | 600 | 783 | 1,116 | 0,769 | 285 | 0,285 | 407,2 | 122,2 | 320 | k=16 r=0,075 | 78 | 91,2 | 131,8 | 134,5 |

Kuva 43. Taajuusmuuttajasäätö vs. kuristussäätö mitatut lukemat.

Tehdyistä mittauksista suoritimme alla olevan kuvaajan, jossa näkyy teho virtauksen funktiona (**Kuva 44.**). Graafin pystyakselilta voidaan helposti havainnoida taa-juusmuuttajakäytöllä saavutetut hyödyt.



Kuva 44. Teho virtauksen funktiona.

10.2 Energia

Energialaskujen perusteena käytettiin Vaasan Sähkön hinnastosta saatavaa 3x16A kWh hintaa, joka tarkistushetkellä oli 12.07 snt/kWh (alv 24 %) (**Kuva 45.**). Perusmaksuihin tai muihin ei kiinnitetty mitään huomiota, koska ne ovat samat ja niillä ei ole vaikutusta laskennan tulokseen./10/



**VAASAN
SÄHKÖ**

SÄHKÖENERGIAN JA SIIRTOPALVELUN HINNASTO
1.4.2019 ALKAEN

| YLEISSÄHKÖ | | Sähköenergia- maksu (alv 0 %) | Siirtopalvelu- maksu (alv 0 %) | Sähköenergia- maksu (alv 24 %) | Siirtopalvelu- maksu (alv 24 %) | Sähkövero luokka I (alv 24 %) | Maksut yhteensä (alv 24 %) |
|--------------------------|---------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| | | (1) | | (1) | | | |
| Perusmaksu | | | | | | | |
| 1 x 16 A... 35 A | €/kk | 2,82 | 4,84 | 3,50 | 6,00 | | 9,50 |
| 3 x 16 A... 25 A | €/kk | 2,82 | 7,55 | 3,50 | 9,36 | | 12,86 |
| 3 x 35 A | €/kk | 2,82 | 10,64 | 3,50 | 13,19 | | 16,69 |
| 3 x 50 A... 63 A | €/kk | 2,82 | 17,42 | 3,50 | 21,60 | | 25,10 |
| Energia ja siirto | snt/kWh | 4,19 | 3,30 | 5,19 | 4,09 | 2,79372 | 12,07 |

Kuva 45. Sähkön hinta.

11 DOKUMENTOINTI

11.1 Osaluettelo

| | |
|--|---------|
| 1. VLT HVAC Drive FC102 - VLT HVAC 1,1kW IP20 H1 | 3882540 |
| 2. Vacon NXS NXS00055A2H1SSSA1A20000 | 3889602 |
| 3. VACON0100-3L-0005-5+DPDP+DLFI | 3888259 |
| 4. ILMAMÄÄRÄLÄHETIN PRODUAL IML-M | 1131610 |
| 5. PEL-M paine-erolähetin | 1131360 |
| 6. Fidelix FX-Spider-40 | |
| 7. KOJA Future | 0606 |
| 8. SCHNEIDER ELECTRIC PM3250 | 6616647 |

11.2 Harjoitukset

Harjoitukset kirjataan erilliselle dokumentille, joka tulee pelkästään Danfoss Global Training organisaation käyttöön, jota he hyödyntävät koulutuksia suunnitellessaan.

12 YHTEENVETO JA POHDINTA

Työssä rakennettiin Danfoss Global Training-koulutusyksikölle PID-koulutuslaitteisto, ja siinä ohessa pyrittiin vertaamaan taajuusmuuttajalla toteutettua nopeussäätöä kuristussäätöön. Lisäksi verrattiin taajuusmuuttajien PID-säätäjien toimintaa keskenään.

Tilaajan toive oli, että laitteistolla voidaan järjestää koulutuksia taajuusmuuttajien sisäisten PID-säätäjien käyttöönottoon ja parametrintiin. Laitteiston tulisi käsittää kaikki olemassa olevat HVAC-sektorin tarpeisiin vastaavat tuoteperheet. Lisäksi vaatimuksena oli jokin väyläliitännä, jonka avulla kyettäisiin vertaamaan sisäisiä PID-säätäjiä sellaisiin käyttöihin, joissa PID-säätäjä on laitteen ulkopuolella. Tässä yhteydessä koulutuksessa voitaisiin tutustua myös laitteiden väyläasetteluihin. Lisäksi meidän tuli työn edetessä rakentaa valmis pohja koulutukselle, jota koulutushenkilökunta voisi käyttää tulevaisuuden koulutuksissa.

Maailmalla suurin osa pumppu- ja puhallinkäyttöjen säädöistä toteutetaan edelleen kuristussäätöinä. Osa näistä käytöistä on ajalta, jolloin markkinoilla ei vielä ollut kilpailukykyisiä nopeussäätöön perustuvia ratkaisuja. Uusia kuristussäätötapaan nojaavia käyttöjä kuitenkin rakennetaan edelleen, säädön halvan ja yksinkertaisen toteutustavan vuoksi. Kun kuitenkin otetaan huomioon taajuusmuuttajan tuomat energia- ja kustannussäästöt, pitkällä aikavälillä ja kokonaisuutena ajatellun käytön hinta nousee nopeussäädettyä käyttöä korkeammaksi. Alkuinvestointi on siis kuristussäädetyssä käytössä hieman halvempi kuin nopeussäädetyssä, mutta pitkän aikavälin kustannussäästöt huomioon ottaen tulee nopeussäädetty käyttö halvemmaksi ja sieltä saadaan takaisinmaksuajan jälkeen myös säästöjä. Näin ollen taajuusmuuttajaohjaukseen perustuvaan nopeussäädettyyn pumppu- tai puhallinkäyttöön investointi on perusteltua.

Taajuusmuuttajien keskinäistä vertailua tarkasteltaessa tulee huomioida, että laitteiden oletusasetukset saattavat erota toisistaan. Näin oli VLT[®] HVAC DRIVE FC-102:n osalta, kun VACON[®] NXP:ssä ja VACON[®] 100 INDUSTRIALissa oletusparametrit vastasivat toisiaan. Tämä on havaittavissa myös oletusarvoilla ajetuissa koeajoissa, joissa Vacon-brändin taajuusmuuttajien säätökäyrät olivat lähes

identtiset, kun taas VLT-brändin taajuusmuuttajan säätäjä toimi huomattavasti hitaammin.

Laitteille tehtyjen värähtelykoemenetelmien jälkeen saatiin kaikille laitteille saman suuruiset termit K_{pkr} ja T_{kr} . Edellä mainituista termeistä kyettiin Ziegler-Nicholsin kertoimilla tuottamaan kaikkien laitteiden PID-säätäjille P-, I- ja D-arvot, jotka olivat siis kaikilla laitteilla tässä tapauksessa samat. Mielestämme kuvaajista voidaan todeta, että kun laitteiden säätäjille annetaan samanlaiset arvot, eikä taajuusmuuttajan asetusarvon muutosta tai lähtötaajuutta rajoiteta, toimivat laitteiden PID-säätäjät lähes identtisesti. Prosessit ovat kuitenkin aina yksilöitä, joten mielestämme näissä kokeissa saatuja säätäjien arvoja ei voida yleisellä tasolla käyttää eri kohteisiin. Käyttöjä on käsiteltävä tapauskohtaisesti, ja niille on tuotettava säätäjien arvot joko laskennallisesti tai kokeellisesti, esimerkiksi Ziegler-Nicholsin menetelmää käyttäen.

Työ oli kokonaisuutena mielenkiintoinen ja yksi työn parhaista anneista oli käytännön mittausten kautta saatu vahvistus kirjallisuudessa ja kursseilla käsitellylle aiheelle nopeussäädön ja kuristussäädön vertailusta. Työn mielenkiintoa lisäsi myös se, että saimme suunnitella ja toteuttaa laitteiston konkreettisesti eikä vain paperilla. Muutamia matkan varrella sattuneita ongelmatilanteita ja viivästyksiä lukuun ottamatta, työn tekeminen sujui hyvin ja siitä tuli meille paljon uutta tietoa ja saimme paremman käsityksen myös ilmanvaihtokoneiden tekniikasta.

13 LÄHTEET

- /1/ Koja Future-esite. Viitattu 15.3.2019
http://www.koja.fi/uploads/materiaalipankki/pdf/Future_FIN_netti.pdf
- /2/ Danfoss Drives-tuotteet. Viitattu 15.3.2019
<http://drives.danfoss.fi/products/vacon/low-voltage-drives/vacon--nxp-air-cooled/#/>
- /3/ Danfoss Drives-tuotteet. Viitattu 15.3.2019
<http://drives.danfoss.fi/products/vacon/low-voltage-drives/vacon-100-industrial/#/>
- /4/ Danfoss Drives-tuotteet. Viitattu 15.3.2019
<http://drives.danfoss.fi/products/vlt/low-voltage-drives/vlt-hvac-drive-fc-102/#/>
- /5/ Fidelix FX-Spider-datalehti. Viitattu 15.3.2019
https://www.fidelix.fi/wp-content/uploads/SPIDER_FI.pdf
- /6/ Pro dual PEL-M tekniset tiedot Viitattu 15.3.2019
http://www.produal.com/fi/shop/by_measured_property_padiifferential-pressure_web_bus_differential_pressure_transmitters/sku-1131360
- /7/ Pro dual IML-M tekniset tiedot. Viitattu 15.3.2019
http://www.produal.com/fi/shop/web_air_flow_trasmitters/sku-1131610
- /8/ PM3250-datalehti. Viitattu 15.3.2019
<https://www.schneider-electric.com/en/product/download-pdf/MET-SEPM3250>
- /9/ Aalto University Wiki Viitattu 29.4.2020
https://wiki.aalto.fi/download/attachments/62723060/Ryhm%C3%A410plus_k7.pdf?version=1&modificationDate=1332152441098
- /10/ Vaasan Sähkö hinnasto 2019 Viitattu 10.5.2020
<https://www.vaasansahko.fi/wp-content/uploads/2019/03/Sahkoenergian-ja-siirtopalvelun-hinnasto-1-4-2019.pdf>