

Joona Tervo

SUURNOPEUSKONEIDEN TESTAUS- JÄRJESTELMÄN KEHITYS

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Sähkö- ja automaatiotekniikka

2024



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Joona Tervo
Työn nimi	Suurnopeuskoneiden testausjärjestelmän kehitys
Toimeksiantaja	The Switch Engineering Oy
Vuosi	2024
Sivut	37 sivua
Työn ohjaaja(t)	Teemu Manninen ja Jesse Kurronen

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyössä luotiin suunnitelma SRM-koneiden testausalueen kehittämiseksi. Työssä käsiteltävä testausalue on ollut pitkään käytössä, ja sitä on korjailtu tarpeen mukaan, kuitenkin monien komponenttien korvattavuus alkaa olla nykyään hankalaa niiden korkean iän takia. Työssä luotuun suunnitelmaan valittujen komponenttien tuli olla yhteensopivia muiden toimeksiantajayrityksen testausjärjestelmien kanssa.

Testausalueella tulee pystyä testaamaan SRM-koneita mitaten koneiden sähköisiä ja mekaanisia ominaisuuksia sekä mittaamaan koneiden vaatimien apujärjestelmien tilaa. Työn tavoitteena oli tuottaa suunnitelma, jossa määritellään SRM-koneiden testauksen vaatimat komponentit sekä niiden käyttö eri mittausten toteuttamiseen. Työssä luotiin sähköpiirustus, jonka perusteella suunnittelutoimisto voi piirtää testausalueen kytkentäkaaviot.

Työ aloitetaan tutustumalla SRM-koneisiin ja niiden testausjärjestelmän vaatimuksiin. Kun koneiden testauksen vaatimukset olivat selvitetty, voitiin aloittaa testausalueen komponenttien valinta ja sähköpiirustuksen luominen. Testausalueen kehityssuunnitelman sähköpiirustus on luotu draw.io-ohjelmalla, ja se sisältää komponenttien asettelun ja kytkennät pääpiirteittäin.

Opinnäytetyön tuloksena The Switch Engineering Oy saa toteuttamiskelpoisen suunnitelman modernista ja muiden toimeksiantajayrityksen testausjärjestelmien kanssa yhteensopivasta testauspaikasta, jossa testataan SRM-koneita.

Asiasanat: sähkökone, testausjärjestelmä, mittaustekniikka

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Joona Tervo
Thesis title	Development of high-speed induction machine testing system
Commissioned by	The Switch Engineering Oy
Time	2024
Pages	37 pages
Supervisor	Teemu Manninen and Jesse Kurronen

ABSTRACT

The thesis creates a plan for the development of a test area for SRM machines. The test area discussed in the thesis has been in use for a long time and has been repaired as needed, however, the replaceability of many components is now becoming difficult due to their advanced age. The components selected for the plan created in the thesis had to be compatible with other testing systems of the client company.

The test area must be able to test SRM machines by measuring the electrical and mechanical properties of the machines, and to measure the status of the auxiliary systems required by the machines. The aim of the thesis was to produce a plan that defines the components required for testing SRM machines, and their use for performing various measurements. The thesis created an electrical drawing, on the basis of which the design office can draw the wiring diagrams of the test area.

The thesis begins by getting acquainted with SRM machines and their testing system requirements. Once the requirements for testing the machines had been solved, the selection of components for the test area and the creation of an electrical drawing could begin. The electrical drawing of the test area development plan has been created with the draw.io program and includes the layout of the components and connections in outline.

As a result of the thesis, The Switch Engineering Oy will receive a feasible plan for a modern testing site that is compatible with the client company's other testing systems and where SRM machines are tested.

Keywords: electric machine, testing system, measurement technology

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SUURNOPEUSTEKNIikka.....	6
2.1	Oikosulkumoottori.....	7
2.2	SRM (Solid Rotor Machine).....	7
3	TESTAUSJÄRJESTELMÄ.....	8
3.1	Testausalue.....	8
3.2	Sähkönsyöttö.....	9
3.3	Laakerien voitelu ja jäähdytys.....	9
3.3.1	Öljykoneikko.....	10
3.3.2	Laakerien paineilmasyöttö.....	11
3.4	Suodinkaappi.....	11
3.4.1	Virranmittaus.....	12
3.4.2	Jännitteenmittaus.....	12
3.5	Tärinämittaus.....	12
3.6	Lämpötilamittaus.....	12
3.7	Koneiden jäähdytys.....	13
4	TESTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITYS.....	13
4.1	Virta mittaukset.....	14
4.2	Jännitemittaukset.....	17
4.3	Tärinämittaukset.....	19
4.4	Koneiden lämpötilamittaus.....	22
4.5	Pyörimisnopeuden mittaus.....	24
4.6	Apujärjestelmät.....	26
4.6.1	Laakerien öljy- ja ilmakierto.....	28
4.6.2	Jäähdytysvesikierto.....	31
5	POHDINTA.....	32
	LÄHTEET.....	34

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö toteutetaan The Switch Engineering Oy:n toimeksiantona. The Switch Engineering Oy (myöhemmin TSW) on suomalainen vuonna 2006 perustettu teknologia-alan yritys, joka suunnittelee ja valmistaa erilaisia sähkömoottoreita- ja generaattoreita. Yrityksen tuotteita ovat kestopagneetti-generaattorit tuulivoimaan ja meriteollisuuteen sekä suurtehoiset taajuusmuuntajat ja suurnopeuskoneet erilaisiin teollisuuden sovelluksiin. Tässä työssä käsitellään viimeiseksi mainittuja suurnopeuskoneita ja erityisesti niiden testauksen vaatimaa järjestelmäkokonaisuutta.

Työssä on tarkoitus kehittää jo olemassa olevaa suurnopeuskoneen testausjärjestelmää palvelemaan paremmin toimeksiantajayrityksen tarpeita nykyhetkessä ja tulevaisuudessa. Työn alussa tutustutaan suurnopeuskoneisiin ja niiden erityispiirteisiin. Teoriaosuudessa selvitetään suurnopeuskoneen testauksen vaatimukset.

Työn tuloksena on tarkoitus tuottaa valmis suunnitelma, kuinka suurnopeuskoneen testausjärjestelmää kehitetään tulevaisuudessa. Tavoitteena on saada suunnitelma testausjärjestelmästä, joka on fiksusti ja tarpeellisin osin automatisoitu sekä yhdenmukaisempi TSW:n muiden testausjärjestelmien kanssa.

2 SUURNOPEUSTEKNIikka

Suurnopeustekniikkaa on kehitetty 1980-luvulta lähtien, kun taajuusmuuttajateknologian kehitys alkoi mahdollistaa verkkotaajuutta korkeamman taajuuden käytön [1, s. 7]. Vaihteistoa käyttämällä voidaan toki nostaa pyörimisnopeutta, hyötysuhteen ja huoltovarmuuden hinnalla. Vaihteiston käyttö tarvitsee huoltoa säännöllisesti, koska siinä on paljon kuluvia osia mm. rattaat, laakerit ja akselitiivisteet.

Suurnopeustekniikalla voidaan käyttää sähkökonetta ilman vaihteistoa, jolloin etuna on mm. parempi hyötysuhde ja erilaisten teollisuuden sovellusten laajempi toteutusmahdollisuus pienen tilantarpeen ansiosta. Esimerkiksi tähän työhön liittyvän sähkökoneen käyttö suoravetoisena, eli ilman vaihteistoa, suurikokoisen polttomoottorin mekaanisena ahtimena ei olisi mahdollista ilman suurnopeustekniikkaa ja sen suomia mahdollisuuksia.

2.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottorin käyttö ilman taajuusmuuttajaa rajoittuu moottorin napaparien ja verkon taajuuden mukaan. Teollisuudessa yleisimmin käytetyn oikosulkumoottorin pyörimisnopeus voi olla maksimissaan 3000 kierrosta minuutissa (50Hz sähköverkossa) [1, s. 7].

2.2 SRM (Solid Rotor Machine)

SRM-sarjan sähkökoneet ovat The Switch Oy:n kehittämä, erilaisia teollisuuden tarpeita palveleva suurnopeuskone. SRM-kone (kuva 1) on 3-vaiheinen taajuusmuuttajalla käytettävä oikosulkumoottori. Koneiden pyörimisnopeus voi olla jopa 12000 rpm ja teho 1500kW. SRM-koneita käytetään polttomoottorin mekaanisena ahtimena parantamaan polttomoottorin hyötysuhdetta. SRM-koneella on monia etuja verrattuna ”tavalliseen” oikosulkumottooriin nähden. SRM-kone ei tarvitse vaihdelaatikkoa, jolloin sillä on matalammat käyttökustannukset huollon tarpeiden suhteen sekä matalammat hankintakustannukset vaihdelaatikon tarpeettomuuden ansiosta. SRM-kone ei tarvitse suurta tilaa ympärilleen ja on kevyempi vaihtoehto verrattuna vaihdelaatikolliseen koneeseen.

SRM-kone, kuten muutkin suur- ja keskinopeuskoneet, vaatii testausjärjestelmältään useita eri järjestelmän osia. Suurnopeuskoneen erikoispiirteinä voitaneen mainita laakeroinnin ja jäähdytyksen erityistarpeet. Laakerit vaativat jatkuvaa voitelua ja jäähdytystä, minkä takia SRM-koneen molempien päiden laakereilla on oma öljy- ja paineilmakeierto. SRM-koneet vaativat jatkuvakiertoisen vesivaippajäähdytyksen. Vesivaippajäähdytys on luotettava, sekä sillä säästetään tilaa ja saadaan koneesta kompakti kokonaisuus. [2]



Kuva 1. SRM355M00

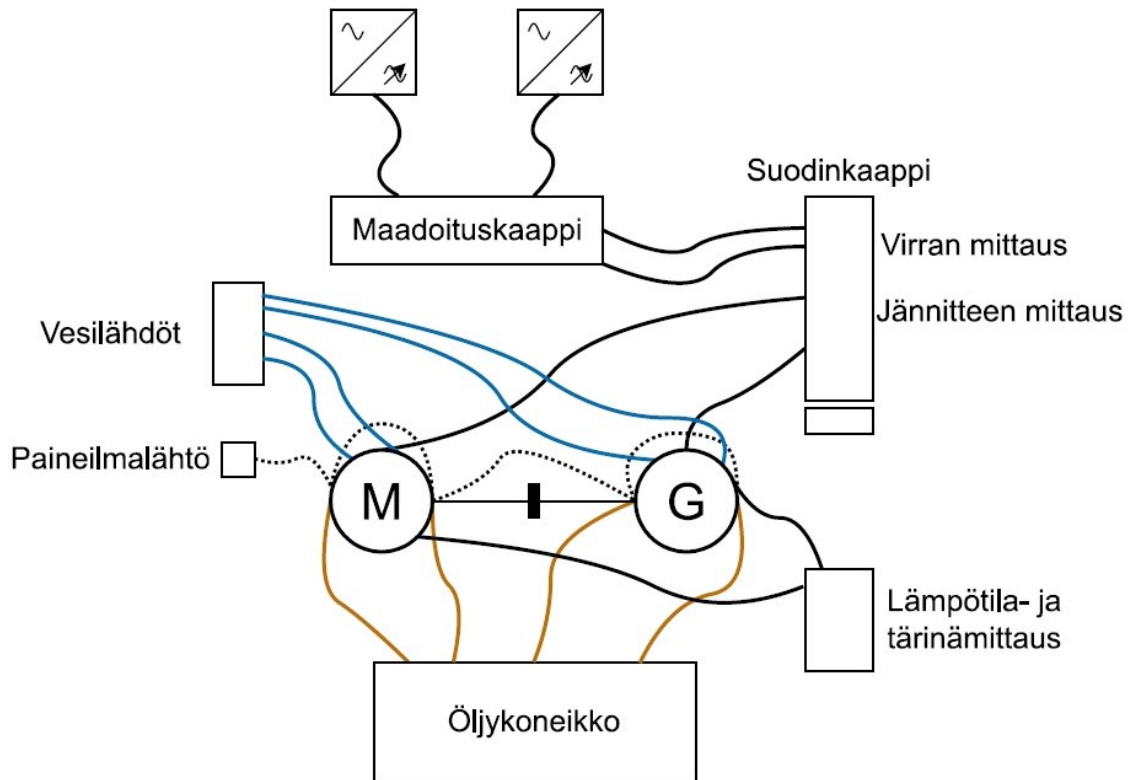
3 TESTAUSJÄRJESTELMÄ

SRM-koneen testauksessa vaaditaan useita eri testausjärjestelmän osia: taajuusmuuttajasyöttö, laakerien voitelu ja ilmajäähdytys, koneiden vesijäähdytys, jännite- ja virtamittaus sekä koneiden nopeus- ja lämpötilamittaus. Lisäksi testausjärjestelmään kuuluu öljykoneikko, jolla pumpataan öljyä koneen laakereille oikealla paineella ja virtauksella. Öljyn kuuluu myös olla tietyn lämpöistä. Nykyinen testausjärjestelmä on TSW:n vanhin käytössä oleva testausjärjestelmä, ja vaikka se onkin tänä päivänä vielä toimiva, niin se vaatii uudistamista järjestelmän luotettavuuden takaamiseksi. Ilman nykyisen testausjärjestelmän päivitystä voidaan tulevaisuudessa törmätä lukuisiin ongelmiin liittyen varaosien saatavuuteen, mittaustulosten luotettavuuteen ja järjestelmän yleiseen turvallisuuteen ja varmatoimisuuteen.

3.1 Testausalue

Testausalueella (kuva 2) on kaikki koneiden tarvitsemat järjestelmän osat, pois lukien taajuusmuuttajat, jotka sijaitsevat testausjärjestelmän ulkopuolella. Molemmat koneet, eli testattava- ja kuormakone, sijaitsevat alueen keskellä teräsbetonipukilla. Koneet liitetään toisiinsa teräslevypakkakytkimellä, joka välittää pyörimisliikkeen moottorista generaattoriin. Testausta valvotaan testausalueen välittömässä läheisyydessä sijaitsevasta testausvalvomosta, josta ohjataan tehdasautomaation kautta taajuusmuuttajia ja valvotaan molempien ko-

neiden mittauksia. Testausalueella ei saa olla henkilöitä läsnä testauksen aikana, joten kaikki tarvittavat mittaukset pitää pystyä tarkastamaan testausvalvomosta tietokoneella. Kuvassa 2 testausalueen suuntaa antava pohjapiirustus.



Kuva 2. Testausalue

3.2 Sähkönsyöttö

Testausjärjestelmään sähköä syöttävät taajuusmuuttajat sijaitsevat testausalueen ulkopuolella, eikä niihin paneuduta tässä työssä tarkemmin. Taajuusmuuttajilta tulee syöttö testausalueelle, jossa sijaitsee katkaisijat ja maadoituskatkaisijat. Katkaisijalta eteenpäin sähkönsyöttö kulkee suodinkaappiin, jossa sijaitsee kuristimet ja kondensaattorit.

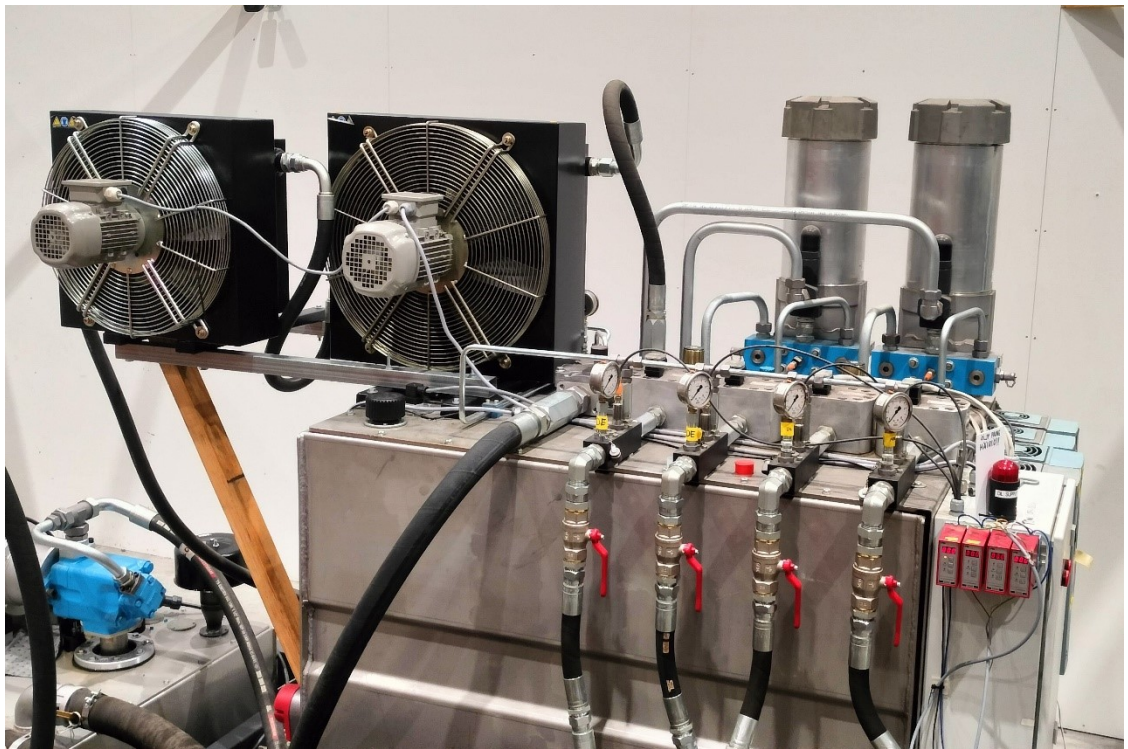
3.3 Laakerien voitelu ja jäähdytys

Suurnopeuskoneiden yksi erityispiirre on laakerien tarpeellinen voitelu ja jäähdytys. SRM-koneen laakerit ovat suuren pyörimisnopeuden takia kovassa rasituksessa ja tarvitsevat jatkuvaa voitelua ja jäähdytystä. Laakereita varten testausjärjestelmään kuuluu yhtenä osana öljykoneikko ja paineilmasyöttö.

3.3.1 Öljykoneikko

Öljykoneikon (kuva 3) tehtävänä on syöttää voiteluöljyä testattavan koneen ja kuormakoneen laakereihin. Öljykoneikossa on kaksi säiliötä, ylä- ja alasäiliö, joiden välillä öljyä kierrätetään, joko lämmittäen tai jäädyttään sitä pitäen öljyn lämpötila 42° C. Öljykoneikosta lähtee neljä öljynsyöttöä ajettavien koneiden laakereille, siis molempiin koneisiin kaksi. Öljyn paluu toimii painovoiman avulla valumalla alempaan säiliöön eli varaussäiliöön.

Öljykoneikkoon kuuluu edellä mainitut ylä- ja alasäiliöt, neljä taajuusmuuttajaa ja pumppua, lämmitysvastus, kolme lämpötila-anturia, kaksi lämmönvaihinta puhaltimella, termostaatti, yksi ylemmän säiliön pinnankorkeusanturi, kaksi alemman säiliön pinnankorkeusanturia, neljä virtausanturia sekä neljä paineanturia. Lisäksi öljykoneikossa on varalla neljä paikallisesti luettavaa painemittaria. Laakerien öljynkiertoa pitää pystyä valvomaan jatkuvasti testausvalvomosta, koska häiriöt laakerien öljynkierrossa aiheuttaa vääristyneen testatuloksen ja laakerien vikaantumisen.



Kuva 3. Öljykoneikko

3.3.2 Laakerien paineilmasyöttö

Laakerit vaativat voiteluöljyn lisäksi ilmakierron. Laakerien ilmakierto toteutetaan paineilmalla. Laakerit tarvitsevat paineilmalta sopivan paineen ja virtauksen. Paineilman painetta ja virtausta tarkkaillaan testien aikana jatkuvasti testausvalvomosta etänä, koska häiriöt paineilmasyötössä aiheuttaa vääristyneen testaustuloksen ja laakerien vikaantumisen. Paineilman paine ja virtaus säädetään testauksen alkaessa sopivaksi koneiden läheisyydessä sijaitsevalla säätimellä. Paineilma poistuu laakereista öljyn poistoletkun kautta.

3.4 Suodinkaappi

Taajuusmuuttajien ja koneiden välissä tarvitaan vaihtosähkön suodatusta, jolla tasoitetaan säröytynyttä vaihtosähköä puhtaaksi siniaalloksi. Toisella LC-suotimella tasoitetaan taajuusmuuttajan moottorille tuottamaa vaihtosähköä ja toisella LC-suotimella generaattorin taajuusmuuttajalle syöttämää vaihtosähköä. Vaihtosähköstä suodatetaan samalla haitallisia yliaaltoja, jotka aiheuttavat koneiden toiminnalle häiriötä. Suodinkaapin jäähdytys on toteutettu termostaattiohjatulla puhaltimilla. Suodinkaapissa sijaitsee LC-suotimien kuristimien ja kondensaattorien lisäksi koneiden virran- ja jännitteenmittaukset (kuva 4), joiden mittaustuloksesta muodostetaan laskennallinen tehomittauksen arvo.



Kuva 4. Suodinkaappi

3.4.1 Virranmittaus

Koneiden virrankulutusta mitataan suodinkaapissa sijaitsevilla virranmittausantureilla. Virranmittausantureita on jokaiselle vaiheelle omansa, yhteensä kuusi kappaletta, testattavalle koneelle kolme ja kuormakoneelle kolme. Virranmittausta valvotaan testausvalvomosta sijaitsevalla tietokoneella.

3.4.2 Jännitteenmittaus

Koneiden jännitteenmittaus sijaitsee suodinkaapissa virranmittauksen yhteydessä. Jännite mitataan virranmittauksen tapaan molempien koneiden kaikista vaiheista maata vasten. Yhteensä jännitteenmittamuuntimia on siis kuusi kappaletta, kolme kummallekin koneelle. Jännitteenmittausta valvotaan testausvalvomosta sijaitsevalla tietokoneella.

3.5 Tärinämittaus

Sähkökoneiden tärinöitä tulee IEC-standardin mukaisesti mitata vaaka-, pysty- ja aksiaalisuunnassa, eli kolmiulotteisen kordinaatiston termein X-, Y- ja Z-akseleiden suunnissa [3, s. 7]. Tärinämittauksen tarkoituksena on tarkkailla koneen tasapainoa ja laakereiden toimintaa. Suurnopeuskoneissa tärinämittauksella on tärkeä rooli suuren pyörimisnopeuden takia, epätasapaino roottorissa lyhentää koneen käyttöikää, vaurioittaa laakerit ennenaikaisesti ja aiheuttaa koneen ennenaikaisen rikkoontumisen. Pahimmassa tapauksessa roottorin hajoaminen voi johtaa vaaratilanteisiin pyörivän sähkökoneen ympäristössä.

Tärinämittaus tulee toteuttaa sähkökoneiden molemmista päistä, jolloin yhdestä sähkökoneesta on tärinämittauksia yhteensä kuusi kappaletta. Molemmissa sähkökoneissa, moottorissa ja generaattorissa on kaikkiaan siis 12 tärinämittausta. Tärinämittausta valvotaan testausvalvomossa sijaitsevalla tietokoneella.

3.6 Lämpötilamittaus

Lämpötilamittaus on tärkeä osa suurnopeuskoneiden testausjärjestelmää. SRM-koneiden testausprosessiin kuuluu lämpöajo, jossa kone ajetaan sen

ominaiseen normaaliin käyttölämpötilaan. Normaalin käyttölämpötilan saavutettua, konetta ajetaan nimellispisteessä noin tunti, jolloin lämmöt tasaantuvat ja mahdolliset poikkeamat huomataan. SRM-koneiden käyttölämpötila on lämpötila, jossa kone toimii sen lopullisessa käyttökohteessa. Lämpötilojen tarkka seuranta on tärkeä osuus suurnopeuskoneiden testauksessa, jolla varmistetaan, että koneiden jäähdytys toimii suunnitellulla tavalla, eivätkä ne ylikuumene. Ylikuumentuminen lyhentää eristeiden elinikää, joka johtaa sähkökoneen käyttöiän lyhenemiseen ja aiheuttaa oikosulun riskin.

SRM-koneiden lämpötilaa mitataan staattorista 18:sta eri kohdasta kaksijohtimisilla PT100-antureilla. Lisäksi molempien koneiden molemmista laakereista mitataan tulevien ja lähtevien öljyjen lämpötiloja. Yhteensä testausjärjestelmässä on siis pelkästään koneille 44 lämpötilamittauksia. Lämpötilamittauksia valvotaan testausvalvomosta sijaitsevalla tietokoneella.

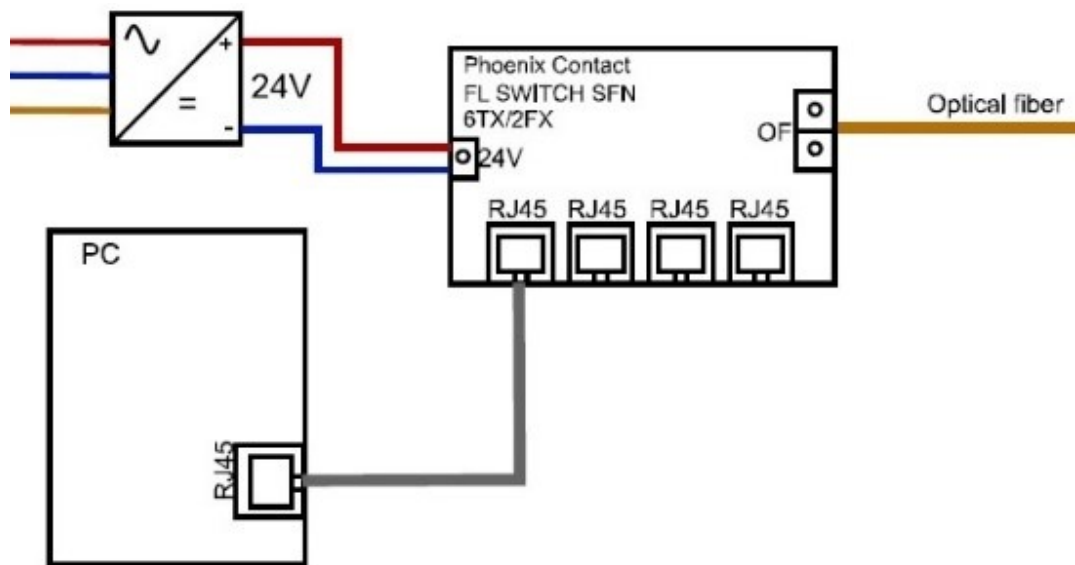
3.7 Koneiden jäähdytys

SRM-koneissa on vesivaippajäähdytys, eli koneen staattoria ympäröi vesivaippa jatkuvalla kierrolla. Jäähdytysveden koneisiin sisään menevä lämpötila on 40 °C ja virtausnopeus 20 l/min. Molemmilla koneilla on omat jäähdytysveden lämpötila- ja virtausmittaukset. Jäähdytyksen tarkka mittaus on tärkeää, jotta SRM-konetta testattaessa saadaan todenmukaista tietoa koneen toiminnasta ja lämpötilakäyttäytymisestä. Koneiden vesikiertojen lämpötilojen ja virtauksien on pysyttävä stabiilina. Jos koneisiin sisään menevä jäähdytysvesi on liian kylmää tai kuumaa, se vääristää koneiden lämpötilakäyttäytymistä. Vesikiertojen paine säädetään sopivaksi testausalueen ulkopuolella sijaitsevasta pumppuhuoneesta ja virtauksia valvotaan koneiden läheisyydessä sijaitsevien virtausanturien avulla. Vesikierrat on toteutettu pumppuhuoneessa sijaitsevilla taajuusmuuttajakäyttöisillä pumpuilla ja niitä ohjataan tehdasautomaatiojärjestelmästä. Jäähdytysveden virtausta ja lämpötilaa valvotaan testausvalvomossa sijaitsevalla tietokoneella

4 TESTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITYS

Testausjärjestelmään suunnitellaan koneille uudet virran- ja jännitteenmittaukset, värinämittaukset, lämpötilamittaukset ja nopeudenmittaukset. Lisäksi testausjärjestelmään kuuluvalla öljykoneikolle suunnitellaan uudet veden ja öljyn

virtaus- ja lämpötilamittaukset. Öljykoneikkoon suunnitellaan myös uudet laakerien öljynpainemittaukset. Testausjärjestelmä toteutetaan kolmella mittakotelolla, joissa ensimmäisessä sijaitsee koneiden virran- ja jännitteenmittaus, toisessa koneiden värinä-, lämpötila- ja pyörimisnopeudenmittaus ja kolmannessa kotelossa jäähdytysveden ja öljykoneikon mittaukset. Lisäksi testausvalvomoon asennetaan kotelo Phoenix Contact FL SWITCH SFN 6TX/2FX -kuitukytkintä varten, johon tuodaan mittausdata testausalueelta ja joka kytketään Ethernet-kaapelilla testausvalvomon tietokoneelle (kuva 5).



Kuva 5. Testausvalvomo

Mittausjärjestelmän komponentit on valittu soveltuvuuden mukaan. Valinnoissa on suosittu jo muissa TSW:n järjestelmissä käytössä olevia ja hyväksi todettuja komponentteja, joilla saavutetaan parempaa korvattavuutta ja yhteensopivuutta eri testausjärjestelmien välillä.

4.1 Virta mittaukset

Virtamittauksissa käytetään LEM LF1010-S -virtamuuntimia (kuva 6), jotka mittaavat virtamuuntimen läpi menevässä johtimessa kulkevaa virtaa. LF1010-S on Hall-efektiin perustuva virtamuunnin, joita käytetään virran elektroniseen mittaukseen. LF 1010-S:n mittausalue on 0–2700 A ja nimellismittausvirta 1000 A, joten sillä on sopiva mittausalue tässä testausjärjestelmässä. LF 1010-S mittauksen virhemarginaali on 0,15 %, joka on erittäin hyvä tarkkuus virtamuuntimelle. [4.] LF1010-S-virtamuuntimia on käytössä myös TSW:n

muissa testausjärjestelmissä, niitä käyttämällä saavutetaan parempaa korvattavuutta ja yhteensopivuutta muiden testausjärjestelmien välillä. LF 1010-S -virtamuuntimet vaativat +/-24 VDC syöttöjännitteen. Syöttöjännite tuotetaan kahdella isoloidulla 24 VDC jännitelähteellä, joista toisen jännitelähteen negatiivinen napa ja toisen jännitelähteen positiivinen napa on kytketty yhteen ja maapotentiaaliin, tällöin toinen jännitelähde tuottaa +24 VDC ja toinen -24 VDC verrattuna maan potentiaaliin. LEM LF 1010-S on virtalähtöinen anturi, joten sen mittauslähtöön tarvitaan mittavastukset mittauslähden ja maapotentiaalin väliin. Mittausvastuksiksi valitaan alumiinirunkoiset VISHAY RH005-vastukset, koska niillä on sopiva vastus arvo (3.3 Ω) ja tehonkesto (5 W). Virtamuuntimet sijoitetaan suodinkaapin alaosaan. Suodinkaapista lähtevät ja kaappiin tulevat kaapelit kulkevat anturien läpi. Signaalikaapeliksi valitaan suojattu 3-napainen kaapeli, jonka häiriösuojajohdin kytketään automaation päästä maapotentiaaliin.



Kuva 6. LEM LF 1010-S

NI-9220-mittakortti (kuva 7) on National Instrumentsin valmistama jännitettä mittaava 16-kanavainen differentiaalinen analogiamittakortti, joka liitetään saman valmistajan NI-cDAQ-9181 1-paikkaiseen korttirunkoon (chassis) (kuva 8). Mittakortilla mitataan jännitettä virtamuuntimien mittavastusten yli. Virranmittaukseen tarvitaan kuusi kanavaa, kolme kummallekin koneelle, yksi jokaiselle virtamuuntimelle.

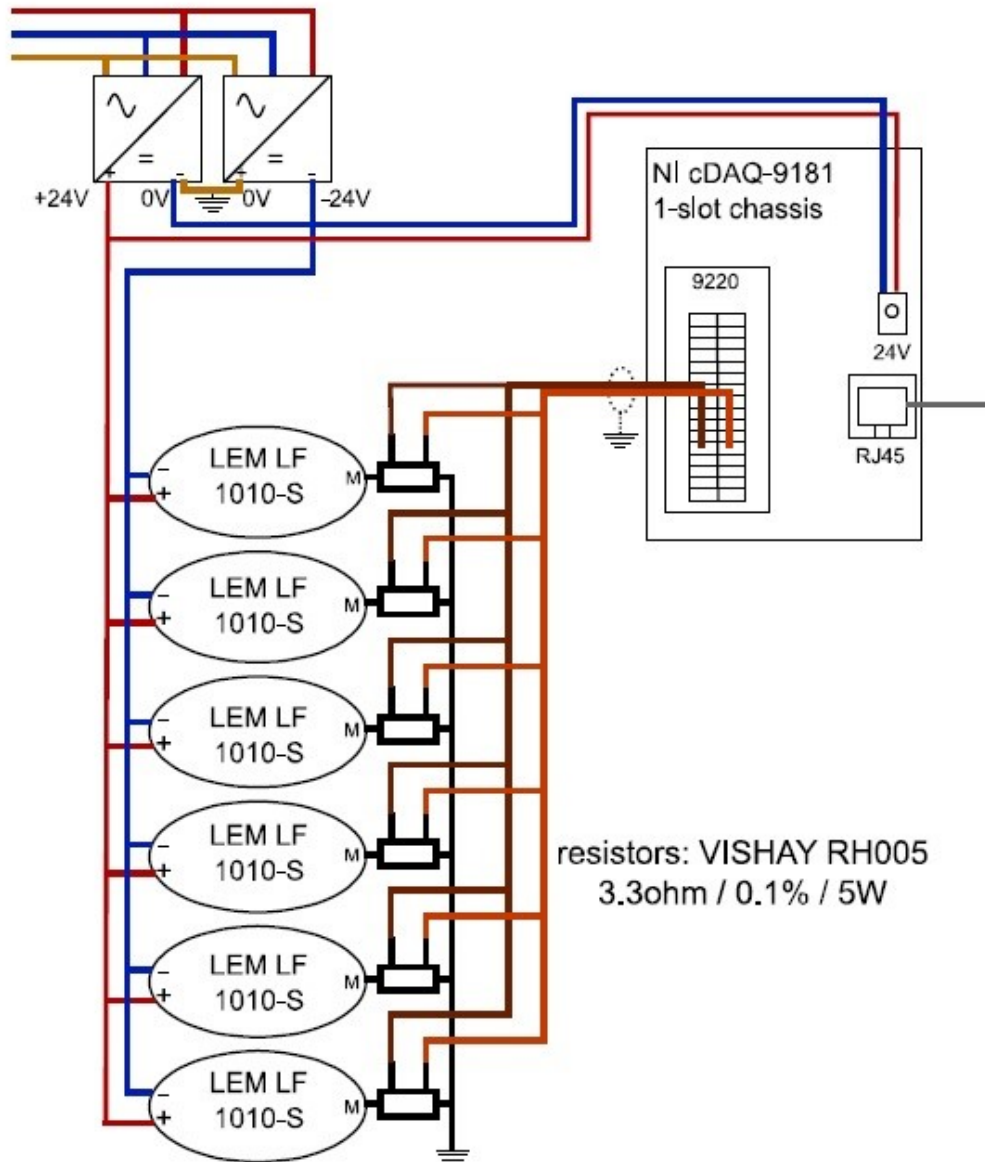


Kuva 7. NI-9220



Kuva 8. NI-cDAQ-9181

Korttirunko lähettää mittauskortin tuottaman mittausdatan Ethernet-väylää pitkin Phoenix Contact FL SWITCH SFN 6TX/2FX -kuitukytkimen kautta testausvalvossa sijaitsevalle tietokoneelle (kuva 9).



Kuva 9. Virtamittaukset

4.2 Jännitemittaukset

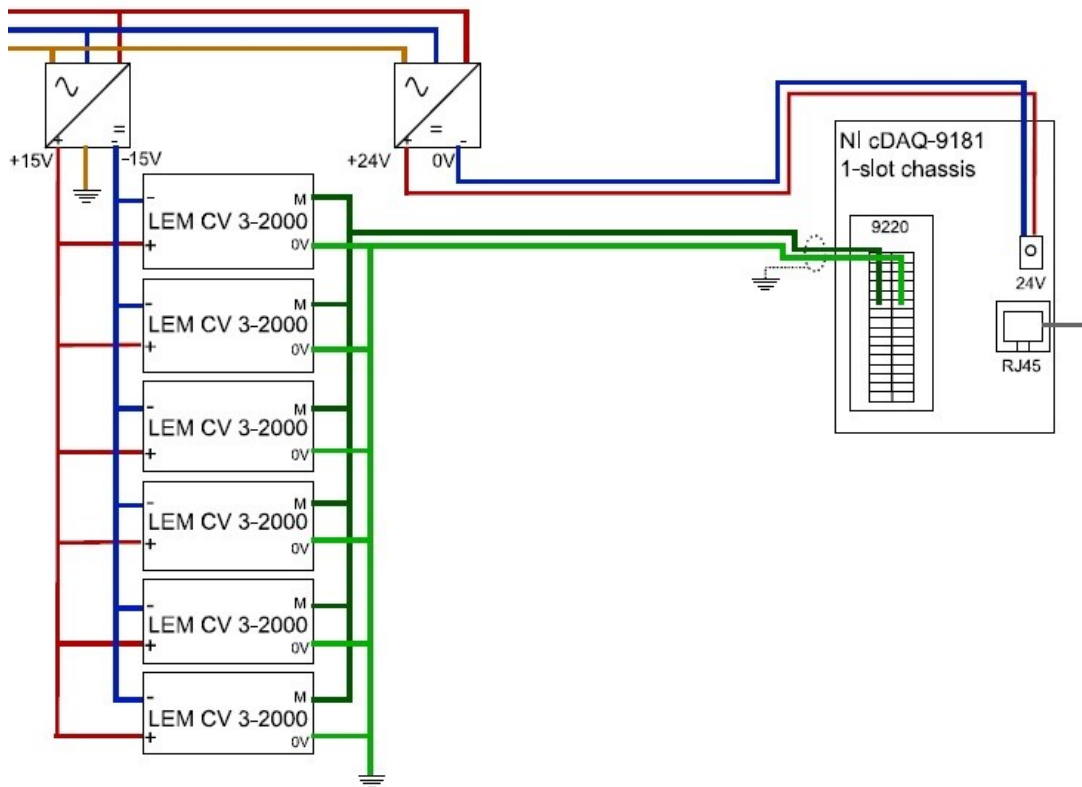
Jännitemittauksissa käytetään LEM CV3-2000 -jännitemittamuuntimia (kuva 10), joilla mitataan koneiden käyttöjännitettä ajon aikana. Käytettävät mittamuuntimet tarjoavat SRM-koneiden jännitemittaukseen sopivan mitta-alueen (0-2000 V). CV 3-2000 antaa ulostulosignaalin jänniteviestin 0-10V, jolloin se voidaan kytkeä virranmittauksen kanssa samaan NI-9220 -mittakorttiin. CV 3-2000 tarjoaa erinomaisen tarkkuuden (0,2 %) ja nopeuden 0,4 μ s, joten se on hyvä valinta SRM-koneiden jännitteenmittaukseen. [5.] CV 3-2000 -mittamuuntimet vaativat +/-15 VDC käyttöjännitteen, joka tuotetaan isoloidulla jännitelähteellä. Samanlaisia mittamuuntimia käytetään kaikissa toimeksianta-

jayityksen testausjärjestelmissä sähkökoneille sopivan mittausalueen ansiosta, joten käyttämällä kyseisiä jännitemittamuuntimia saavutetaan yhdenmukaisuutta ja hyvää korvattavuutta muiden testausjärjestelmien välillä.



Kuva 10. LEM CV 3-2000

Yhteensä jännitemittamuuntimia tulee järjestelmään kuusi kappaletta, yksi jokaiselle vaiheelle kummallekin koneelle. Jännitemittamuuntimien mittasignaali-lähdöt kytketään samalle NI-9220-mittakortille virranmittauksen kanssa, jolloin jännitemittauksen data kulkee virranmittauksen datan kanssa saman kuitukyt-kimen kautta testausvalvomon tietokoneelle (kuva 11).



Kuva 11. Jännitemittaukset

4.3 Tärinämittaukset

Koneiden tärinöitä mitataan 12 kohdasta SKF CMSS2200 IEPE -kiihtyvyyssantureilla (kuva 12), joiden mittasignaali on 100 mV/g [6]. Anturit kiinnitetään koneisiin magneeteilla kummankin koneen molempiin päihin mittaamaan tärinää kolmesta eri suunnasta. Kyseiset anturit valittiin testausjärjestelmään niiden kompaktin koon, kestävyys- ja kustannustehokkuuden ansiosta. Samoja antureita käytetään myös muissa TSW:n testausjärjestelmissä, joten valinnalla saavutetaan yhteensopivuutta eri järjestelmien välillä. Signaalikaapelina käytetään häiriösuojattua 2-napaista kaapelia, jonka anturipäähän asennetaan MIL-C-5015 sarjan 2-napaiset liittimet (kuva 13). Kaapelin häiriösuoja kytetään automaatiopästä maapotentiaaliin.

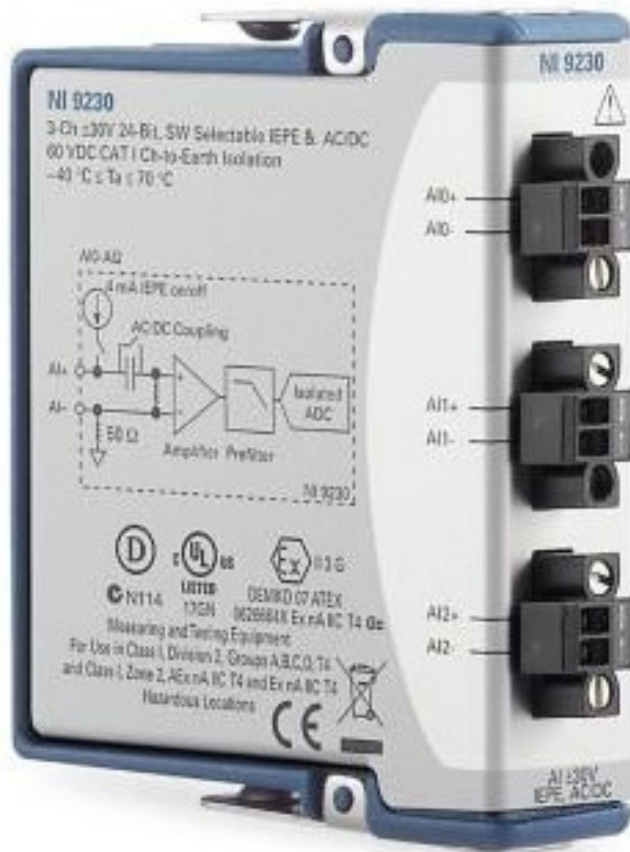


Kuva 12. SKF CMSS2200



Kuva 13. Tärinämittausten anturikaapeliin liitin

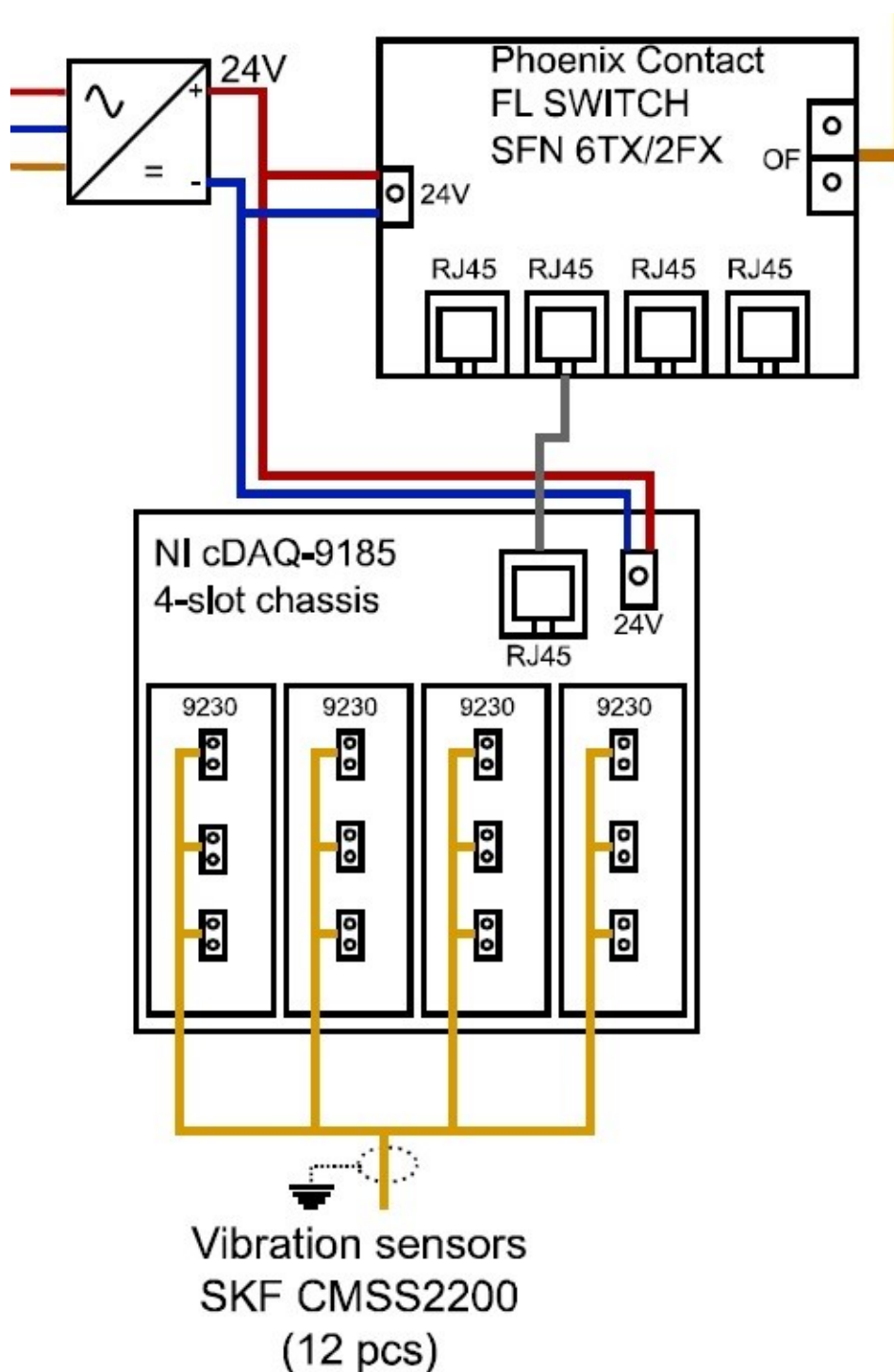
Kiihtyvyyssanturien signaalia mitataan neljällä National Instruments NI-9230 kolmikanaavaisella tärinämittakorteilla (kuva 14), jotka asennetaan NI-cDAQ-9185 4-paikkaiseen korttirunkoon (kuva 15). NI-cDAQ-9185 välittää mittausdatan Ethernet-väylällä Phoenix Contact FL SWITCH SFN 6TX/2FX -kuitukytkimen kautta testausvalvomoon tietokoneelle (kuva 16).



Kuva 14. NI-9230



Kuva 15. NIcDAQ-9185

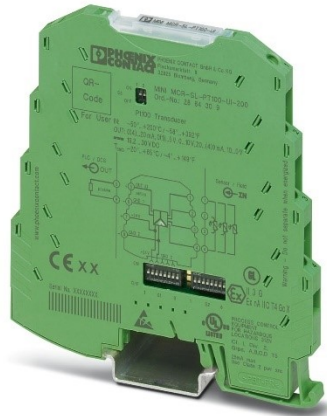


Kuva 16. Tärinämittaukset

4.4 Koneiden lämpötilamittaus

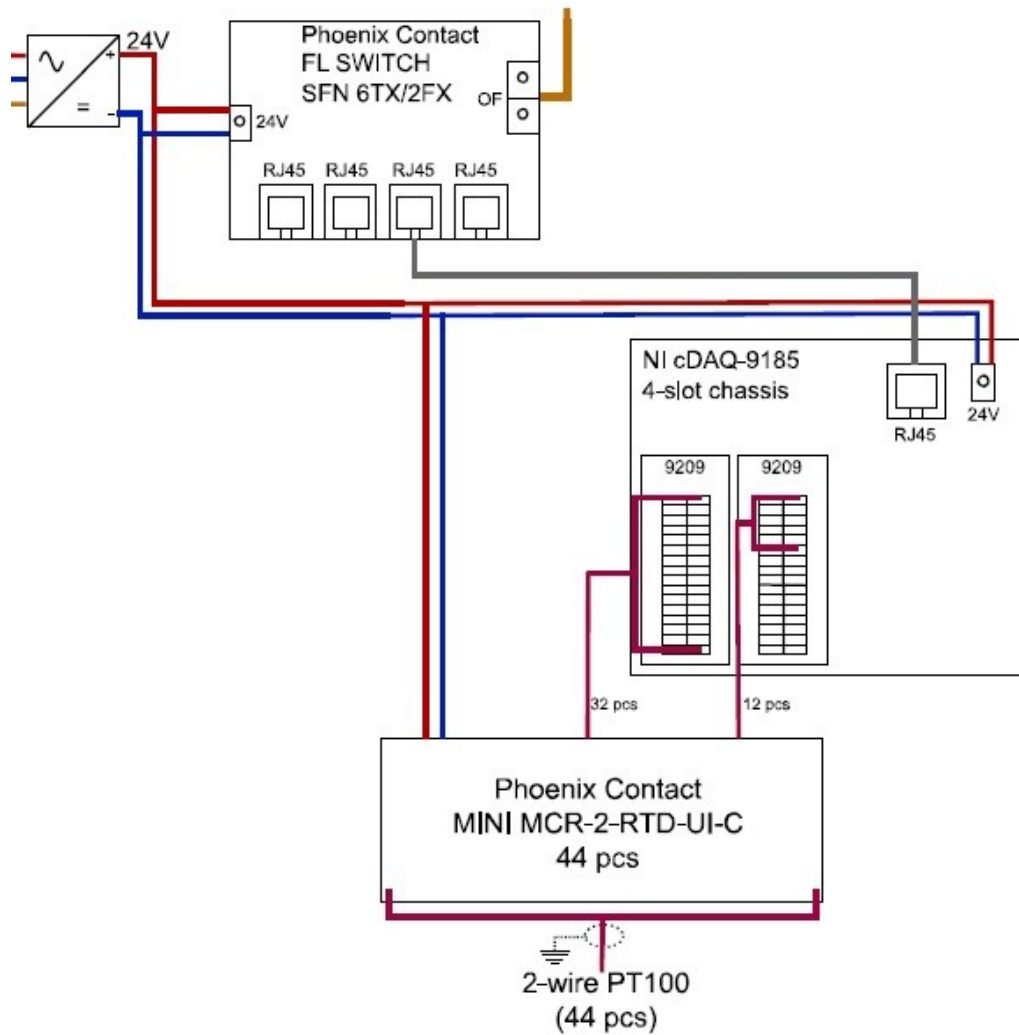
Molemmissa koneissa on 16 staattorin lämpötilamittaus, yhteensä testausjärjestelmässä on siis koneille 32 lämpötilamittaus. Lisäksi koneiden laakerien öljykierroissa on 8 lämpötilamittaus, jokaiselle laakerille sisään menevän ja ulos tulevan öljyn lämpötilamittaus ja jokaisella laakerilla oma lämpötilamittaus. Kaikki lämpötilamittaukset (44 kpl) on toteutettu 2-johtimisilla PT-100 antureilla. Koneiden ja öljykiertojen PT-100-anturit kytketään Phoenix Contact

MINI-MCR-2-RTD-UI-C PT-100 -muuntimille (kuva 17), jotka mittaavat PT-100-anturien resistansseja lämpötilan muuttuessa ja muuntaa resistanssimitaukset jännitesignaaleiksi [7].



Kuva 17. Phoenix Contact PT-100 muunnin

Jännitesignaaleja mitataan kahdella National Instruments NI-9209-kortilla, jotka on asetettu saman valmistajan NI-cDAQ-9185 4-paikkaiseen korttipohjaan, josta mittadata siirretään Ethernet-väylällä Phoenix Contact FL SWITCH SFN 6TX/2FX -kuitumuuntimen kautta testausvalvomoon tietokoneelle (kuva 18).



Kuva 18. Lämpötilamittaukset

4.5 Pyörimisnopeuden mittaaminen

Koneiden pyörimisnopeutta mitataan NORIS FAHQ13 -pyörimisnopeusantureilla. Kyseiset pyörimisnopeusanturit ovat koneissa kiinteästi asennettuina ja kuuluvat koneen toimitukseen, joten niitä ei ole valittu mittausjärjestelmän ehdoilla vaan mittausjärjestelmä on toteutettu antureille sopivaksi. NORIS FAHQ-anturit ovat 2-kanavaisia neliöaaltoista pulssisignaalia tuottavia nopeusantureita [8]. Nopeusanturit kytketään National Instruments NI-9361-korttiin (kuva 19), joka mittaa anturien tuottamia pulsseja. NI-9361-kortissa on 37-pinninen liitäntä, joten anturien kytkemiseksi tarvitaan korttiin liitettävä 37-kanavainen kytkentäliitin NI-9923 (kuva 20).

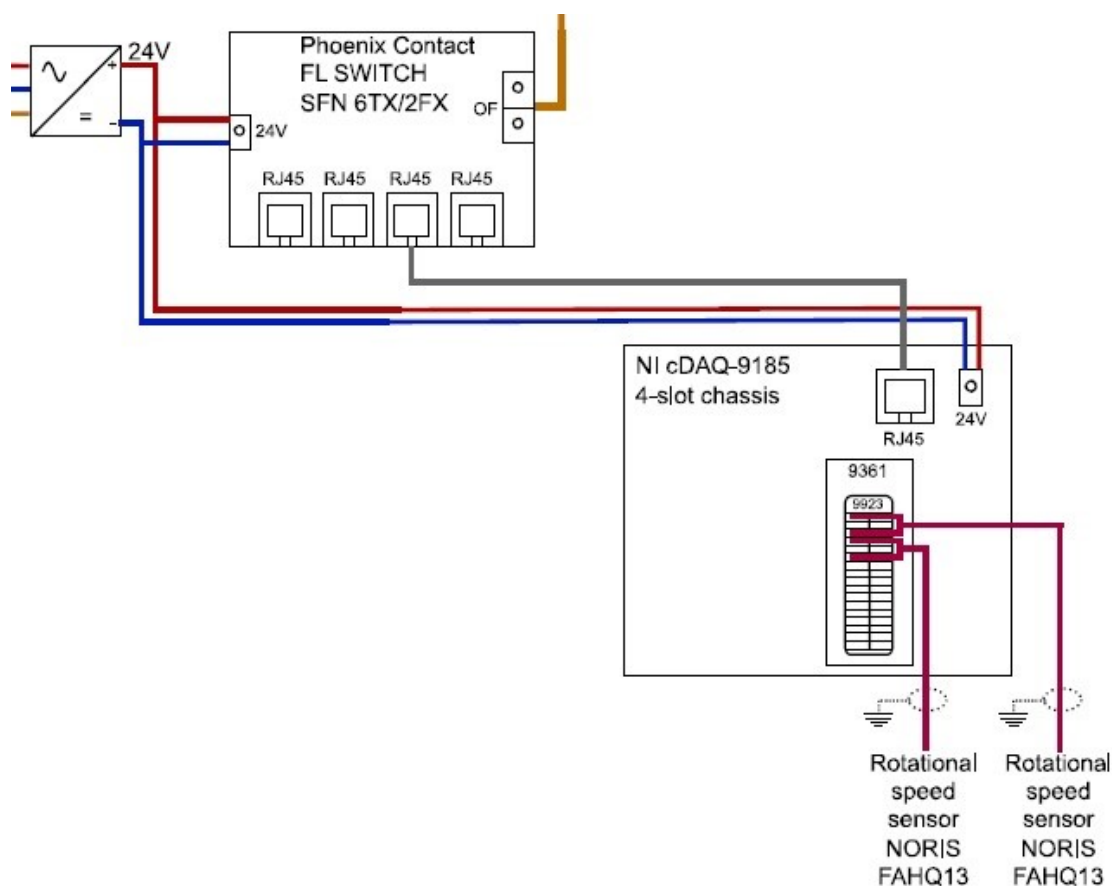


Kuva 19. NI-9361



Kuva 20. NI-9923-liitin liitettynä NI-9361-mittakorttiin.

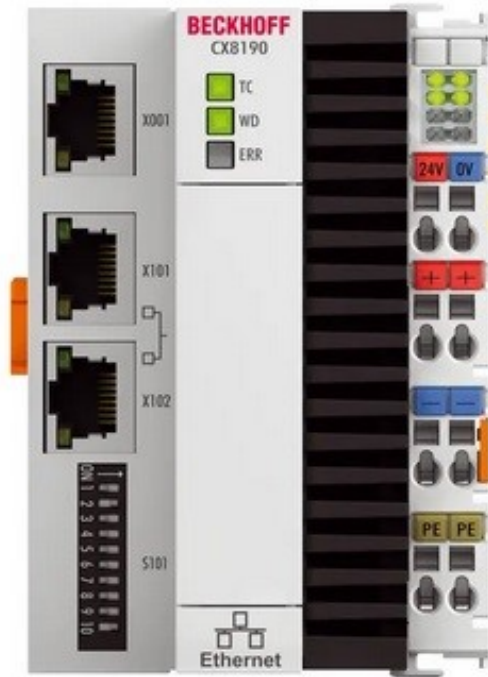
NI-9961-mittakortit asennetaan samaan 4-paikkaseen NI-cDAQ-9185 korttipohjaan NI-9209-lämpötilamittakorttien kanssa. Korttirunko siirtää mittausdatan Ethernet-väylällä Phoenix Contact FL SWITCH SFN 6TX/2FX -kuitukytkimen kautta testausvalvomossa sijaitsevalle tietokoneelle (kuva 21).



Kuva 21. Pyörimisnopeudenmittaus

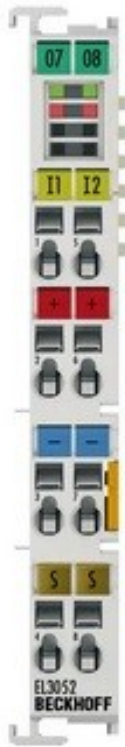
4.6 Apujärjestelmät

SRM-koneiden testausjärjestelmän muut mittaukset ovat toteutettu National Instruments mittakorteilla, mutta koneiden apujärjestelmät ovat toteutettu Beckhoff CX8190 PLC:n (Programmable Logic Controller) avulla (kuva 22). Beckhoff valittiin apujärjestelmien mittaukseen sen monikäyttöisyyden ja kustannustehokkuuden takia, kaikki kortit ovat toisiinsa liitettäviä, jolloin samaan koteloon saadaan kompaktisti pakattua monta erilaista mittausta. Beckhoff I/O kortteja on käytössä myös muissa TSW:n testausjärjestelmissä, joten käyttämällä niitä saavutetaan parempaa yhteensopivuutta ja korvattavuutta testausjärjestelmien välillä. Mittakotelo asennetaan öljykoneikon yhteyteen, josta on lyhyet etäisyydet järjestelmään kuuluville antureille.



Kuva 22. Beckhoff CX8190

Beckhoff PLC:n ja mittakorttien käytössä on muutamia huomioitavia asioita, liittyen virransyöttöön. Ensinnäkin PLC:llä on kaksi virransyöttöä, toinen jännitelähde syöttää E-BUS-väylää, jonka yli kortit kommunikoivat PLC:lle ja saavat käyttösähkösä. Toinen jännitelähde toimii kentälaitteiden virransyöttönä. Beckhoff lupaa E-BUS:n ja kentälaitteiden virransyötön välille 500 V:n eristyskykyä ja jos niillä on sama virtalähde, niin tämä eristys menetetään [9]. Öljykoineikon mittauksissa käytetään EL3052 (kuva 23) ja EL3214 (kuva 24) kortteja. Korttien järjestyksellä on myös merkitystä, esimerkiksi tässä järjestelmässä käytettyjen korttien järjestyksen on oltava siten että EL3052-kortit ovat lähempänä PLC:tä ja virransyöttöä, kuin EL3214-kortit. Tämä siitä syystä, että jos kortit olisivat toisinpäin niin kentälaitteiden virransyöttö ei kulje EL3214-korttien läpi eteenpäin EL3052-korteille. [10]. Beckhoff korttirivistön päätyyn asennetaan EL9011-päätylevy, joka suojaa korttirivistön viimeisen kortin koskettimia tahattomalta kontaktilta.



Kuva 23. EL-3052

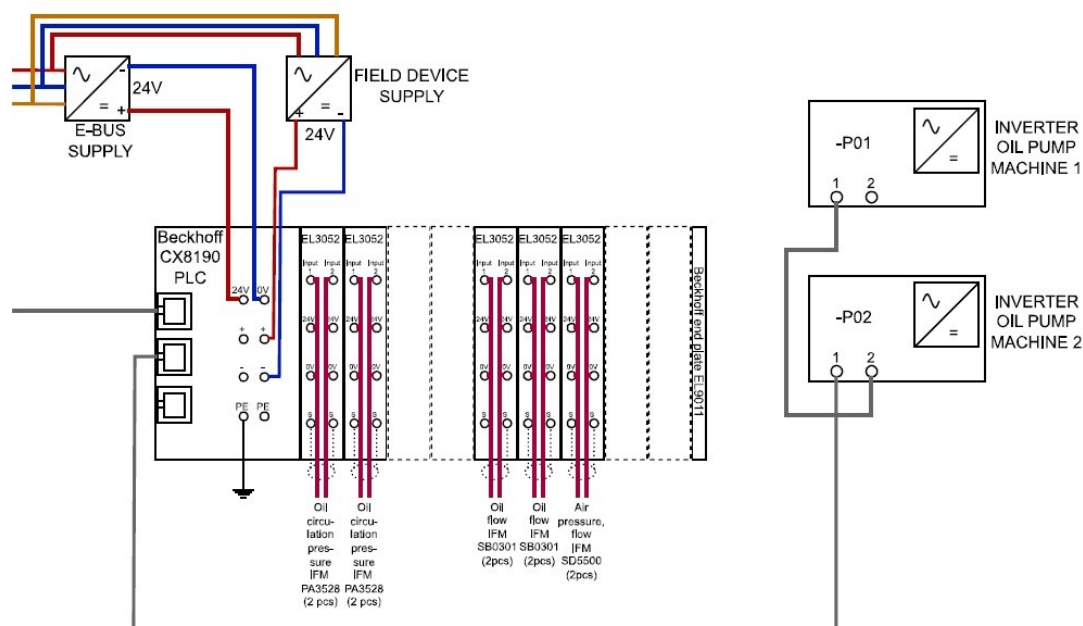


Kuva 24. EL-3214

4.6.1 Laakerien öljy- ja ilmakierto

Öljykoneikkoon kuuluu molemmille koneille omat taajuusmuuttajakäyttöiset öljypumput, joita ohjataan CX819 PLC:n Ethernet-väylän kautta (kuva 25). Öljypumppujen yhteydestä mitataan koneille menevien öljysyöttöjen lämpötilat 2-

johtimisilla PT-100-antureilla. Lisäksi öljykoneikon ylemmässä säiliössä on öljyyn upotettu PT-100-anturi, jolla valvotaan säiliössä olevan öljyn lämpötilaa. Kaikki kolme öljykoneikon PT-100-anturia kytketään 4-kanavaiselle EL3214 PT-100-antureille tarkoitetulla analogiatulokortille, josta käytetään kolmea kanavaa.



Kuva 25. Laakerien öljy- ja ilmakierto

Molemmissa pumpuissa on kaksi lähtöä, eli jokaiselle laakerille oma öljyisyttö. Kaikista neljästä koneiden laakereille menevistä öljyisyttöistä mitataan paine ja virtaus. Öljyisyttöjen painemittaukset toteutetaan IFM PA3528 -antureilla (kuva 26), jotka tuottavat 4–20 mA:n virtasignaalia kahdelle 2-kanavaiselle EL3052-kortille [11]. Öljyisyttöjen virtausmittaukset toteutetaan IFM SB0301 -antureilla (kuva 27), jotka tuottavat 4–20 mA:n virtasignaalia kahdelle 2-kanavaiselle EL3052 -analogiatulokortille [12]. Anturit kaapeloidaan 4-napaisella IFM EVC001 -anturikaapeleilla, joissa on valmiit anturipään liittimet.



Kuva 26. IFM PA3528



Kuva 27. IFM SB0301

Molempien koneiden laakereiden paineilmasyötöistä mitataan paine ja virtaus IFM SD550 -antureilla. SD5500-anturin (kuva 28) 4–20 mA:n virtasignaalia luetaan 2-kanavaisella EL3052-analogiatulokortilla [13]. Yhdellä anturilla mitataan yhden koneen molempien laakerien paineilmasyöttö, mittauksen jälkeen

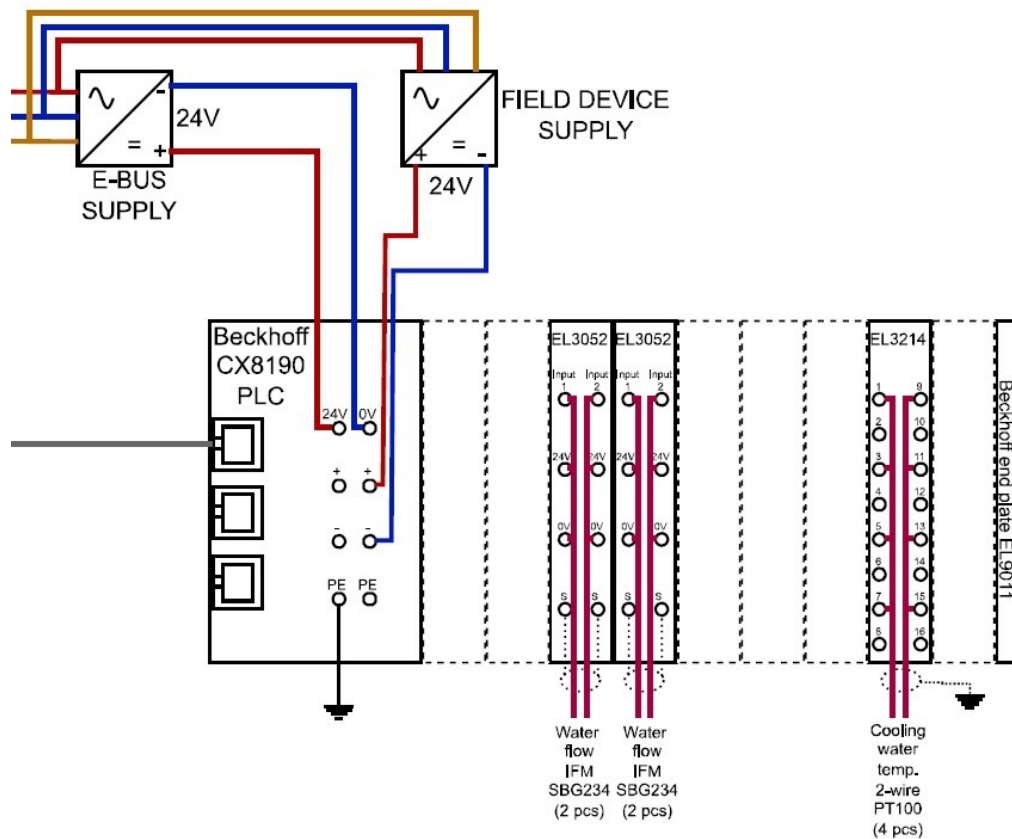
paineilmalinja jaetaan jakotukissa koneen molemmille laakereille. Paineilmasyöttöjen anturit kaapeloidaan 4-napaisilla IFM EVC001 -anturikaapeleilla, joissa on valmiit anturipään liittimet.



Kuva 28. IFM SD5500

4.6.2 Jäähdytysvesikierto

SRM-koneiden jäähdytystapa on vesivaippajäähdytys, joten testausjärjestelmään kuuluu myös molempien koneiden vesikiertojen lämpötila- ja virtausmittaukset. Vesikiertojen mittaukset toteutetaan samalla CX8190 PLC:llä, kuin öljykiertojen mittaukset (kuva 29).



Kuva 29. Jäähdytysvesikierrat

Molemmista koneista mitataan koneisiin sisään menevien vesien lämpötilat ja koneista ulos tulevien vesien lämpötilat, yhteensä vesikiertoissa on siis neljä lämpötilamittausta. Molempien vesikiertojen lämpötilat mitataan 2-johtimisilla PT-100-antureilla, jotka kytketään 4-kanavaiseen EL3214-korttiin. PT-100-anturikaapeleina käytetään häiriösuojattua 2-napaista kaapelia, jonka häiriösuoja kytketään automaation päästä maapotentiaaliin.

Molempien koneiden vesikiertoista mitataan myös vesien virtaukset sisään menevistä ja ulos tulevista jäähdytysvesistä. Virtausantureina käytetään IFM SBG234 -antureita (kuva 30), jotka tuottavat 4–20 mA:n virtasignaalia [14]. Anturikaapeleina käytetään 4-napaisia IFM EVC001 -kaapeleita valmiilla anturipään liittimillä.



Kuva 30. IFM SBG234

5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda suunnitelma SRM-koneiden testausjärjestelmän kehittämiseen. Suunnitelman luomisessa keskityttiin sopivien komponenttien valitsemiseen ja järjestelmän toteuttamisen kannalta keskeiseen periaattellisen sähkökuvien piirtämiseen.

Opinnäytetyön tavoite onnistui, moniin erilaisiin antureihin, mittakortteihin ja mittaustekniikkaan tutustuttiin ja valittiin kyseiseen testausjärjestelmään sopivimmat. Lisäksi draw.io-piirustusohjelmalla piirrettiin periaattelliset sähkökuvat testausjärjestelmästä. Tuloksena luotiin toimeksiantajayritykselle suunnitelma,

jolla voidaan kehittää SRM-koneiden testausjärjestelmää ja luoda kustannusarvio tarvittavista hankinnoista. Toimeksiantajan toive kehitettävän testausjärjestelmän modernisoinnista ja yhdenmukaistamisesta muiden testausjärjestelmien kanssa täytettiin täysimääräisesti. Suunnitelmassa käytetään yritykselle ennestään tuttuja komponentteja, jotka nykyaikaisia ja joiden korvattavuus on hyvä vielä monia vuosia järjestelmän käyttöönoton jälkeen.

Opinnäytetyön laajuutta piti rajata keskittymällä esittelemään valittuja komponentteja ja niiden yhteiskäyttöä. Työssä olisi ollut mahdollista laajentaa tutkittavia tietoja syvemmälle mm. mittaustekniikkaan, standardeihin, anturien toimintaperiaatteisiin ja ohjelmointiin, mutta työn luonteen vuoksi niihin ei voinut syventyä tämän enempää. Testausjärjestelmän kytkentäkuvia oli alun perin tarkoitus piirtää enemmän CAD-ohjelmistolla, mutta työssä oli keskityttävä järjestelmän suunnitteluun eikä piirtämiseen. Kytkentäkuvia ei kuitenkaan valmiin testausjärjestelmän toteutuksessa saa unohtaa, vaan ne piirretään ennen järjestelmän toteuttamista joko opinnäytetyön tekijän tai suunnittelutoimiston toimesta tässä työssä esitettyjen tietojen perusteella.

LÄHTEET

1. Larjola, J., Arkkio, A. & Pyrhönen, J. Suurnopeustekniikka. Helsinki: Yliopistopaino. 2010.
2. The Switch Engineering Oy. SRS0315 datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 3/2024. Saatavissa: https://theswitch.com/content-hub/?sft_post_tag=turbo&sft_theswitch_downloadtypes=datasheet [viitattu 29.11.2024]
3. IEC60034-14. Rotating electrical machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity. 2018.
4. LEM International SA. LEM LF 1010-S datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 9/2019. Saatavissa: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lf_1010-s.pdf [viitattu 18.11.2024]
5. LEM International SA. LEM CV3-2000 datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 8/2023. Saatavissa: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/cv_3-2000_v12.pdf [viitattu 18.11.2024]
6. AB SKF. CMSS 2200-datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 2/2024. Saatavissa: <https://www.skf.com/ph/productinfo/productid-CMSS%202200> [viitattu 20.11.2024]
7. Phoenix Contact GmbH & Co.. MINI MCR-2-RTD-UI-C datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 4/2022. Saatavissa: <https://www.phoenixcontact.com/fi-fi/tuotteet/temperature-transmitter-mini-mcr-2-rtd-ui-c-2902048#downloads-link-target> [viitattu 20.11.2024]
8. NORIS Group GmbH. NORIS FA13 datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 6/2021. Saatavissa: https://www.noris-group.com/fileadmin/cms_upload/en/Resources/pdf/DB-FA13-DE.pdf [viitattu 20.11.2024]
9. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. CX8190 datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 11/2022. Saatavissa: <https://www.beckhoff.com/fi-fi/download/450266242> [viitattu 20.11.2024]
10. Niku, M. 2024. Test Systems Engineer. Keskustelu 22.11.2024. The Switch Engineering Oy.
11. IFM Electronic GmbH. PA3528 datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 4/2023. Saatavissa: <https://www.ifm.com/restservices/fi/fi/assets/c3VwcGxpZXJzL2lmbS9kb2N1bWVudHMvcHJvZHVjdC9QQTM1MjgtMDAvZGF0ZW5ibGFldHRlci9QQTM1MjgtMDBfRkktRk-kucGRm?v=118> [viitattu 24.11.2024]
12. IFM Electronic GmbH. SB0301 datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 4/2023. Saatavissa: <https://www.ifm.com/restservices/fi/fi/as->

[sets/c3VwcGxpZXJzL2lmbS9kb2N1bWVudHMvcHJvZHVjdC9TQjAz-MDEtMDAvZGF0ZW5ibGFldHRlci9TQjAzMDEtMDBfRkktRk-kucGRm?v=126](https://www.ifm.com/restservices/fi/fi/as-sets/c3VwcGxpZXJzL2lmbS9kb2N1bWVudHMvcHJvZHVjdC9TQjAz-MDEtMDAvZGF0ZW5ibGFldHRlci9TQjAzMDEtMDBfRkktRk-kucGRm?v=126) [viitattu 24.11.2024]

13. IFM Electronic GmbH. SD5500 datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 4/2023. Saatavissa: <https://www.ifm.com/restservices/fi/fi/as-sets/c3VwcGxpZXJzL2lmbS9kb2N1bWVudHMvcHJvZHVjdC9TRDU1MDAtMDAvZGF0ZW5ibGFldHRlci9TRDU1MDAtMDBfRkktRk-kucGRm?v=164> [viitattu 26.11.2024]
14. IFM Electronic GmbH. SBG234 datalehti. PDF-dokumentti. Päivitetty 4/2023. Saatavissa: <https://www.ifm.com/restservices/fi/fi/as-sets/c3VwcGxpZXJzL2lmbS9kb2N1bWVudHMvcHJvZHVjdC9TQkcyMzQtMDMvZGF0ZW5ibGFldHRlci9TQkcyMzQtMDNfRkktRk-kucGRm?v=88> [viitattu 26.11.2024]

KUVALUETTELO

Kuva 1. SRM355M00. Tervo, J. 15.11.2024.

Kuva 2. Testausalue. Tervo, J. 18.11.2024.

Kuva 3. Öljykoneikko. Tervo, J. 15.11.2024.

Kuva 4. Suodinkaappi. Tervo, J. 15.11.2024.

Kuva 5. Testausvalmomo. Tervo, J. 18.11.2024.

Kuva 6. LEM LF 1010-S. LEM International SA. Saatavissa:
<https://www.lem.com/en/product-list/lf-1010s> [viitattu 18.11.2024]

Kuva 7. NI-9220. National Instruments Corp. Saatavissa:
https://www.ni.com/fi-fi/shop/model/ni-9220.html?srsId=AfmBOopfih_KUddKYGuqAXP18eC-ryL_3_HDByxO11KH_oY2ImTzVPHuY [viitattu 18.11.2024]

Kuva 8. NI-cDAQ-9181. National Instruments Corp. Saatavissa:
<https://www.ni.com/fi-fi/shop/model/cdaq-9181.html?srsId=AfmBOorT-GcpyclJn7GEjyeLwaBHhrWU08b9vhlH8e23EBgkd786Fur96> [viitattu 18.11.2024]

Kuva 9. Virtamittaukset. Tervo, J. 20.11.2024.

Kuva 10. LEM CV 3-2000. LEM International SA. Saatavissa:
<https://www.lem.com/en/product-list/cv-32000> [viitattu 18.11.2024]

Kuva 11. Jännitemittaukset. Tervo, J. 20.11.2024.

Kuva 12. SKF CMSS2200. AB SKF. Saatavissa:
<https://www.skf.com/ph/productinfo/productid-CMSS%202200> [viitattu 20.11.2024]

Kuva 13. Tärinämittausten anturikaapelien liitin. Elfa AB. Saatavissa:
https://www.elfadistelec.fi/fi/kaapelipistoke-mil-5015-pistoke-pistoke-14s-13a-amphenol-industrial-ds3106f-14s-2p/p/14446068?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA6aW6BhBqEiwA6KzDcxT3dCpqqYxiLrYe0kmn35AJDe7S55h6Ni6AW6wbzYuSRDEtrdPf-zBoC1u4QAvD_BwE&gclsrc=aw.ds [viitattu 20.11.2024]

Kuva 14. NI-9230. National Instruments Corp. Saatavissa:
https://www.ni.com/fi-fi/shop/model/ni-9230.html?srsId=AfmBOorp_CfJHZT6msdcv8uxlpF2Oqg4RCO63bj2PKi_NcS1auHHzo1 [viitattu 20.11.2024]

Kuva 15. NI-cDAQ-9185. National Instruments Corp. Saatavissa:
<https://www.ni.com/fi-fi/shop/model/ni->

[9230.html?srsId=AfmBOorp_CfJHZT6msdcv8uxlpF2Oqg4RCO63bj2PKi_NcS1auHHtzo1](#) [viitattu 20.11.2024]

Kuva 16. Tärinämittaukset. Tervo, J. 21.11.2024.

Kuva 17. Phoenix Contact PT-100 muunnin. Phoenix Contact GmbH & Co. Saatavissa: <https://www.phoenixcontact.com/fi-fi/tuotteet/temperature-transmitter-mini-mcr-2-rtd-ui-c-2902048> [viitattu 20.11.2024]

Kuva 18. Lämpötilamittaukset. Tervo, J. 21.11.2024.

Kuva 19. NI-9361. National Instruments Corp. Saatavissa: https://www.ni.com/fi-fi/shop/model/ni-9361.html?srsId=AfmBOoqn-weJAa_4jC12_XMP2ZMs6eBR4fEGoOuwCvMKVQ5bd9fprvM [viitattu 22.11.2024]

Kuva 20. NI-9923-liitin liitettynä NI-9361-mittakorttiin. National Instruments Corp. Saatavissa: <https://www.ni.com/fi-fi/support/model.ni-9923.html?srsId=AfmBOooTJT0FeRXeg-FfWWXjLgT5mtcXAM4sJQg4eOy4ZV8DScG0DmF0> [viitattu 20.11.2024]

Kuva 21. Pyörimisnopeudenmittaus. Tervo, J. 22.11.2024.

Kuva 22. Beckhoff CX8190. Beckhoff Automation GmbH & Co. Saatavissa: <https://www.beckhoff.com/fi-fi/products/ipc/embedded-pcs/cx8100-arm-r-cortex-r-a9/cx8190.html> [viitattu 20.11.2024]

Kuva 23. EL-3052. Beckhoff Automation GmbH & Co. Saatavissa: <https://www.beckhoff.com/fi-fi/products/i-o/ethercat-terminals/el3xxx-analog-input/el3052.html> [viitattu 22.11.2024]

Kuva 24. EL-3214. Beckhoff Automation GmbH & Co. Saatavissa: <https://www.beckhoff.com/fi-fi/products/i-o/ethercat-terminals/el3xxx-analog-input/el3214.html> [viitattu 22.11.2024]

Kuva 25. Laakerien öljy- ja ilmakierto. Tervo, J. 22.11.2024.

Kuva 26. IFM PA3528. IFM Electronic GmbH. Saatavissa: <https://www.ifm.com/fi-fi/product/PA3528> [viitattu 24.11.2024]

Kuva 27. IFM SB0301. IFM Electronic GmbH. Saatavissa: <https://www.ifm.com/fi-fi/product/SB0301> [viitattu 24.11.2024]

Kuva 28. IFM SD5500. IFM Electronic GmbH. Saatavissa: <https://www.ifm.com/fi-fi/product/SD5500> [viitattu 26.11.2024]

Kuva 29. Jäähdytysvesikierrot. Tervo, J. 22.11.2024.

Kuva 30. IFM SBG234. IFM Electronic GmbH. Saatavissa: <https://www.ifm.com/fi-fi/product/SBG234> [viitattu 26.11.2024]