

Markus Kärkkäinen

SÄHKÖAJONEUVON KÄYTTÖNOTTOTARKASTUKSET JA TESTAUKSET TUOTANNOSSA

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Maaliskuu 2022**



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Maaliskuu 2022	Tekijä/tekijät Markus Kärkkäinen
Koulutus Sähkö- ja automaatiotekniikka	<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK	
Työn nimi SÄHKÖAJONEUVON KÄYTTÖÖNOTTOTARKASTUKSET JA TESTAUKSET TUOTANNOSSA		
Työn ohjaaja Hannu Puomio	Sivumäärä 39 + 8	
Työelämäohjaaja Jussi Salmén, Timo Oikarinen		
<p>Opinnäytetyö tehtiin Normet Oy:lle (Normet), joka kehittää ratkaisuja maanalaiseen rakentamiseen ja maanalaisiin kaivoksiin valmistamalla erilaisia kaivosajoneuvoja. Normetin tunnetuimmat kaivoslaitteet ovat kalliolujitukseen käytetyt betoniruisikutuslaitteet, betoninkuljetuslaitteet, räjähdysaineiden panostuslaitteet ja henkilönostinlaitteet.</p> <p>Työssä tehtiin tutkimus akkukäyttöisen kaivosajoneuvon käyttöönotto- ja testausprosessin eri vaiheista laadunvarmistus ja laiteturvallisuus mielessä. Tavoitteena oli selvittää tuotannosta valmistuvalle sähköajoneuville tarvittavien testauksen tarpeellisuus, testaustavat ja dokumentoinnin tarve. Yksittäisten testauksen tarpeellisuutta arvioitiin standardit, laki ja valmistusvirheen riskiarviointi huomioiden.</p> <p>Perehdyin opinnäytetyössäni standardeissa määriteltyihin sähköasennusten käyttöönottotarkastusmittauksiin ja Suomen sähköturvallisuuslakiin sähköasennusten käyttöönottoon liittyen. Lisäksi perehdyin yleisellä tasolla sähköajoneuvotekniikkaan lukemalla aiheen kirjallisuutta.</p> <p>Testauksiin sisältyi sähköjärjestelmien käyttöönottotarkastusmittauksia ja laitteen turvatoimintojen ja toiminnallisuuden testauksia. Tutkimustuloksista laadittiin kattava käyttöönottotarkastuspöytäkirja sähkökäyttöiselle ajoneuville tuotannon käyttöä varten. Käyttöönottotarkastuspöytäkirjan tueksi tehtiin työohjeita testauksia varten, jotta ajoneuvoasentajalla on kaikki tarvittava tieto käytettävissä, kun sähköajoneuvo tulee asennettavaksi ja testattavaksi.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin sähköajoneuvoille käyttöönottotarkastusprosessi sähkötyöturvallisuuden ja tuotteen laadunvarmistamiseksi. Käyttöönottotarkastusprosessin dokumentointia ja tukemista varten laadittiin käyttöönottotarkastuspöytäkirja, mittauspöytäkirjat ja työohjeet.</p>		

Asiasanat dokumentointi, käyttöönottotarkastus, laadunvarmistus, sähköajoneuvo, toiminnallinen testaus, turvallisuus
--

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date March 2022	Author Markus Kärkkäinen
Degree programme Electrical and automation engineering		
Name of thesis COMMISSIONING INSPECTIONS AND TESTING OF AN ELECTRIC VEHICLE IN PRODUCTION		
Centria supervisor Hannu Puomio		Pages 39 + 8
Instructor representing commissioning institution or company Jussi Salmén, Timo Oikarinen		
<p>This bachelor's thesis was assigned by Normet Oy (Normet), which develops solutions for underground construction and underground mines by manufacturing various mining vehicles. Normet's best-known mining equipment is concrete spraying equipment used for rock reinforcement, concrete transport equipment, explosives charging equipment and personal lifting equipment.</p> <p>The various stages of the commissioning and testing process of a battery electric mining vehicle were investigated in terms of quality assurance and equipment safety. The aim was to find out the need for testing, testing methods and documentation for the electric vehicle being manufactured. The need for individual testing was assessed taking into account the standards, law, and risk assessment of manufacturing defects.</p> <p>In my thesis, I became acquainted with the commissioning inspection measurements of electrical installations and the Finnish Electrical Safety Act in connection with the commissioning of electrical installations. In addition, I became acquainted with electric vehicle technology at a general level by reading the literature on the subject.</p> <p>The tests included commissioning the inspections of electrical systems, and the testing of the safety functions and functionalities of the machine. A comprehensive commissioning inspection report for an electric vehicle for production use was prepared from the test results. In support of the commissioning inspection report, work instructions were developed for testing so that the vehicle assembler would have all the necessary information available when the electric vehicle was to be installed and tested.</p> <p>As a result of the thesis, a commissioning inspection process was obtained for electric vehicles to ensure electrical safety and product quality. A commissioning inspection report, measurement reports and work instructions were prepared to document and support the commissioning inspection process.</p>		
<p>Key words commissioning inspection, documentation, electric vehicle, functional testing, safety, quality assurance</p>		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

ANFO

Ammonium nitrate-fuel oil explosive on rakeistetun ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seoksesta valmistettu räjähdysaine.

BMS

Battery Management System on sähköajoneuvoissa käytetty ajoakkujen hallintajärjestelmä.

CAN

Controller Area Network on ajoneuvoissa, koneissa ja teollisuuslaitteissa käytetty automaatioväylä.

EMC

Electromagnetic compatibility on laitteen sähkömagneettinen yhteensopivuus, jolla tarkoitetaan laitteen luotettavaa toimivuutta luonnollisessa toimintaympäristössään tuottamatta kohtuuttomasti sähkömagneettista häiriötä.

INVERTTERI

Invertteri on sähköajoneuvoissa käytetty vaihtosuuntaaja ja ohjausyksikkö, joka ohjaa sähkömoottorin toimintaa ja muuntaa tasavirtaa vaihtovirraksi ja toisinpäin.

KYTKENTÄTRANSIENTTI

Kytkentätransientti on äkillisen piiri muutoksen ilmiö, joka aiheuttaa ylijännitteitä.

PE

Protective earth on suojajohdin, jolla toteutetaan sähkölaitteiston suojamaadoitus.

PELV

Protective extra low-voltage on pienoisjännitesähköjärjestelmä, jossa toisiopuolen toinen napa on suojamaadoitettu.

RESOLVER

Resolver on pyörivä sähkömuuntaja, jota käytetään anturina pyörimisasteiden mittaamiseen.

RUSNAUS

Rusnaus on prosessi, jossa kallionpinnasta poistetaan löyhästi kiinni olevia lohkareita alas.

SELV

Separated/Safety extra-low voltage on maasta erotettu pienoisjännite sähköjärjestelmä.

SOC

State of Charge on akun varaustaso kapasiteettiinsä nähden.

VIKAVIRTASUOJAKYTKIN

Vikavirtasuojakytkin on suojalaite, joka suojaa laitteen käyttäjää vaaralliselta sähköiskulta ja estää tulipaloja.

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 NORMET OY.....	2
2.1 Historia.....	2
2.2 Tuotteet	2
2.2.1 Betoniruiskutus	3
2.2.2 Panostus	3
2.2.3 Nosto ja asennus	4
2.2.4 Maanalainen kuljetus.....	5
2.2.5 Rusnaus	5
3 TYÖN LÄHTÖKOHDAT	7
4 SÄHKÖAJONEUVOTEKNIikka	8
4.1 Tehoelektroniikka ja ajosähkömoottorit	9
4.1.1 Ajosähkömoottorit	9
4.1.2 Invertterit ja ajosähkömoottorin ohjaus.....	10
4.2 Ajoakusto	11
4.2.1 BMS-järjestelmä	11
4.2.2 SoC-arvo.....	12
4.2.3 Latauksenhallinta.....	13
5 SÄHKÖASENNUKSEN KÄYTTÖÖNOTTOTARKASTUS	15
5.1 Aistinvaraiset tarkastukset.....	15
5.2 Eristysresistanssimittaus	17
5.3 Suojajohtimen jatkuvuusmittaus.....	19
5.4 Korkeajännitetesti.....	21
5.5 Syötön automaattinen poiskytkentä	22
5.6 Vikavirtasuojan toiminnan testaus.....	23
5.7 Kiertosuunnan tarkistus	23
5.8 EMC-suojaus	23
6 SÄHKÖAJONEUVON LAADUNVARMISTUS.....	26
6.1 Laadunvarmistusprosessi	26
6.2 Akkukäyttöisen kaivossähköajoneuvon käyttöönottotarkastukset ja testaukset	27
6.2.1 Visuaaliset tarkistukset.....	27
6.2.2 Sähköasennusten käyttöönottotarkastusmittaukset ja pöytäkirja.....	28
6.2.3 Ajoneuvosähköjen ja ohjausjärjestelmän käyttöönotto	31
6.2.4 Jäähdytysjärjestelmän käyttöönotto ja testaus	31
6.2.5 Ajoakkujen turvallinen käyttöönotto ja kalibrointi	32
6.2.6 Ajosähkömoottoreiden kalibrointi	32
6.2.7 Hydraulikka ja jarrujärjestelmä	33
6.2.8 Suojalukitukset.....	33
6.3 Käyttöönottotarkastuspöytäkirjan ja työohjeiden dokumentointi	34

7 YHTEENVETO	36
---------------------------	-----------

LÄHTEET	32
----------------------	-----------

LIITTEET

LIITE 1. Sähköajoneuvon laadunvarmistus prosessikaavio (POISTETTU JULKISESTA VERSI-OSTA)

LIITE 2. Sähköajoneuvon sähköjärjestelmien mittauspöytäkirjat (POISTETTU JULKISESTA VERSI-OSTA)

LIITE 3. Sähköajoneuvon käyttöönottotarkastuspöytäkirja (POISTETTU JULKISESTA VERSI-OSTA)

KUVIOT

KUVIO 1. Akkukäyttöisen sähköajoneuvotekniikan periaate.....8

KUVIO 2. Resolver-anturin periaate 11

KUVIO 3. Eristysresistanssimittaus TN-S-järjestelmässä..... 17

KUVIO 4. Eristysresistanssimittaus TN-C-järjestelmässä 18

KUVIO 5. Suojajohtimen jatkuvuuden mittaus..... 19

KUVIO 6. Korkeajännitetesti sähkölaitteelle22

KUVIO 7. Esitys sähkömagneettisesta häiriömekanismista.....24

KUVAT

KUVA 1. Spraymec 8100 VC SD -betoniruisutuslaite.....3

KUVA 2. Charmec MC 605 VE SD -panostuslaite.....4

KUVA 3. Utilift MF 540 SD -saksilavanostolaite.....4

KUVA 4. Utimec MF 500 Transmixer SD -betoninkuljetuslaite5

KUVA 5. Scamec 2000 M -rusnauslaite.....6

KUVA 6. Vaarallinen jännite -varoituskolmio W012 17

KUVA 7. Kaapelin vieminen koteloon EMC-holkitiivisteen läpi.....28

KUVA 8. Metrel MI-3394 -laitetesteri30

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Eristysresistanssin pienimmät sallitut arvot..... 19

TAULUKKO 2. Kuparijohdinten tyypilliset resistanssit 30 °C:n lämpötilassa20

1 JOHDANTO

Kaivos- ja tunnelirakentamisen toimijoiden nopeasti kasvanut mielenkiinto sähköajoneuvoihin on luonut kaivoslaitteiden valmistajille tarpeen kehittää uusia sähköisiä ratkaisuja maanalaiseen rakentamiseen. Kiinnostus kaivossähköajoneuvoihin on tullut niiden monista eduista verrattuna polttomoottorikäyttöisiin ajoneuvoihin, joista tunnetuimpia etuja ovat kuluvien osien vähentyminen ja pakokaasujen poistuminen kaivosympäristöstä, jolloin kaivoksien ilmanvaihdon tarve on pienempi. Kaivoslaitetönnän yksi markkinajohtajista Normet on kehittänyt uuden laiteteknologian kaivosajoneuvoihin sähkökäyttöisyyttä varten, ja sen tuotenimeksi tuli SmartDrive. Normetin SmartDrive-laitteet ovat täysin sähkökäyttöisiä laitteita, jotka hyödyntävät litiumioniakkuteknologiaa. Normet on suunnitellut muutamaa laitetyyppiä alustan sähkökäyttöiseksi ja tarkoitus on laajentaa sähkökäyttöisyyden tarjontaa kaikkiin laitetyppeihin. (Normet 2021.)

Sähköajoneuvojen valmistus on alkanut Normetilla ja tarve valmistuvien sähköajoneuvojen käyttöönotto- ja testauksen kehittämiseksi on ajankohtainen. Polttomoottorikäyttöisten ajoneuvojen laadunvarmistuksessa käytetyt toiminnalliset testaukset ja niiden dokumentoinnit eivät ole käyttökelpoisia sähköajoneuvoille, joten on laadittava uusi käyttöönotto- ja testauspöytäkirja uusille sähkökäyttöisille tuotteille. Käyttöönotto- ja testauspöytäkirjan tulee sisältää sähköasennusten käyttöönotto- ja testausmittauksia, tarkastuksia ja laitteen käyttö- ja turvatoimintojen testauksia. Tuotantoon suunniteltua käyttöönotto- ja testausprosessia voidaan hyödyntää valmistuksen jälkeiseen käyttöönottoprosessiin myös asiakaskohteissa, jolloin tehdään laitteelle viimeinen tarkistus ennen asiakkaalle luovuttamista.

Opinnäytetyön aiheena oli tehdä tutkimustyö tarvittavista käyttöönotto- ja testauksista, jotka tulisi tehdä kaikille valmistetuille kaivossähköajoneuvoille. Työn sisältö rajattiin SmartDrive-alustaa koskeviin käyttöönotto- ja testauksiin, eli työhön ei sisälly testaussuunnittelua laitetyyppikohtaisille prosesseille, joita ovat esimerkiksi betoniruiskutus- ja panostusprosessi. Opinnäytetyön tavoitteena on luoda toimiva sähköajoneuvon käyttöönotto- ja testausprosessi tuotantoympäristöön. Prosessilla on tarkoitus toteuttaa tuotteen laadunvarmistus ja parantaa tuotannon työntekijöiden sähkötyöturvallisuutta. Perehdyin sähköajoneuvotekniikkaan, sähköasennusten käyttöönotto- ja testauksiin ja koneturvallisuuden lähdekirjallisuuden ja erilaisten standardien kautta. Lähdekirjallisuuden lisäksi sain Normetin tuotekehityksestä ja laatuorganisaatiosta tietoa kaivosajoneuvojen tekniikasta ja tuotannon laadunvarmistusprosessista.

2 NORMET OY

Normet Oy on iisalmelainen konepajateollisuusalan yritys, joka valmistaa kaivostoimintaan ja tunnelinrakentamiseen tarvittavia laitteita. Laitetoiminnan lisäksi Normet tarjoaa asiakkailleen rakennusmekanikaaleja, kalliolujituksen tuotteita, laitehuoltoa ja koulutusta. Normet Oy on osa yritysryhmää Normet Group Oy. Nykyään yritysryhmä toimii maailmanlaajuisesti 30 eri maassa yli 40 toimipaikalla. Normet työllistää yli 1 400 henkilöä ympäri maailman. Yli 50 vuoden kokemuksella ja 14 000 toimitetulla koneella Normetista on tullut yksi alansa markkinajohtajista. Normetilla on Iisalmen lisäksi laite-tuotantoa myös Intiassa, Chiessä ja Kiinassa. (Normet 2021.)

2.1 Historia

Normet-konserni on saanut alkunsa Iisalmessa, jossa sijaitsee Normetin päätoimipiste Normet Oy. Normet on perustettu vuonna 1962. Tuolloin yritys oli nimeltään Peltosalmen Konepaja. Konepajan alkuaikojen tuotteet painottuivat metsäkoneisiin ja traktoriin suunniteltuihin maansiirtolaitteisiin. Normet alkoi valmistamaan kaivoslaitteita vuodesta 1972 eteenpäin, jolloin myös yrityksen nimeksi vaihtui Normet Oy. Vuodesta 2005 lähtien yrityksen osakekanta on ollut Normet Group-yritysryhmän omistuksessa. (Normet 2021; Sarvela 2008; STT 2005.)

2.2 Tuotteet

Normet valmistaa laitteita betonin ruiskutukseen ja kuljetukseen, räjähdysaineiden panostukseen, rusnaukseen, logistiikkaan ja nostotöihin. Rusnaus on prosessi, jossa kallionpinnasta poistetaan löyhästi kiinni olevia lohkareita alas. Myydyimpiä laitetyppejä ovat betoniruiskutuslaitteet ja räjähdysaineiden panostuslaitteet. Normetin uusimmat innovaatiot ovat SmartScan-, SmartSpray- ja SmartDrive-tekniologiat. SmartScan-tekniologia skannaa ruiskutetun betonin paksuutta ja laatua automaattisesti. SmartSpray on automaattinen betoniruiskutustoiminto. Näillä kahdella tekniologialla saadaan parannettua kustannustehokkuutta betoniruiskutusprosessissa ajallisesti ja materiaalihukkaa vähentämällä. SmartDrive on akkukäyttöisissä kaivosajoneuvoissa käytetty Normetin kehittämä tekniologia, joka on suunniteltu käytettäväksi kaikissa Normetin laitetyypeissä. (Normet 2021.)

2.2.1 Betoniruiskutus

Betoniruiskutuslaitteiden käyttötarkoitus on lujittaa kallion seinämää ruiskuttamalla betonia kallion pintaan. Laitteilla pumpataan betoni laitteen ruiskutuspuomille, jolla ruiskutus kallion seinämään tehdään. Valikoimassa on kaivos- sekä tunnelitoimintaan suunniteltuja laitemalleja. Kaivostoimintaan soveltuvat laitteet ovat nivelrunkoisia ja tunnelitoimintaan tarkoitetut laitteet ovat jäykkärunkoisia. Laitteiston lisäksi Normetin tuotevalikoimaan kuuluvat betonin lisäaineet ja kiihdyttimet. (Normet 2021.)



KUVA 1. Spraymec 8100 VC SD -betoniruiskutuslaite (Normet 2021)

2.2.2 Panostus

Normet valmistaa louhintaan tarvittavia ANFO-, emulsio- ja vesigeeli-irtoräjähdyksaineiden panostuslaitteita. Panostuslaitteet koostuvat henkilönostinkorista ja prosessimoduulista. Prosessimoduulilta räjäytysaine tuodaan paineilmaa hyödyntäen henkilönostinkorille, jossa panostaja suorittaa panostuksen. (Normet 2021.)



KUVA 2. Charmec MC 605 VE SD -panostuslaite (Normet 2021)

2.2.3 Nosto ja asennus

Henkilönostolaitteet on suunniteltu kaivos- ja tunneliympäristöjen erilaisten nosto- ja asennustehtävien turvalliseen suorittamiseen. Henkilönostinlaitteista on kaksi tuoteperhettä Himec ja Utilift, joista Utilift on saksilavanostin. Himec-tuotteet ovat puomillisia henkilönostinlaitteita. Laitteiden lisävarusteet vaihtelevat asennus- ja asiakastarpeiden mukaan. (Normet 2021.)



KUVA 3. Utilift MF 540 SD -saksilavanostolaite (Normet 2021)

2.2.4 Maanalainen kuljetus

Maanalaisissa kuljetuksissa on tarve kuljettaa niin henkilöitä kuin myös erilaisia materiaaleja. Erilaisia kuljetustarpeita varten Normet on suunnitellut Multimec-tuoteperheen. Multimec perustuu kasettijärjestelmään, joka tarjoaa ratkaisun nopeasti vaihtuville kuljetustarpeille. Kasetteja on useita eri vaihtoehtoja eri käyttötarkoituksia varten. Muuttumattomaan kuljetustarpeeseen tarkoitettut laitteet ovat Variomec ja Utimec, joita myydään erilaisiin kuljetuskäyttötarkoituksiin. (Normet 2021.)



KUVA 4. Utimec MF 500 Transmixer SD -betoninkuljetuslaite (Normet 2021)

2.2.5 Rusnaus

Irtokivien rusnaukseen tarkoitettu laite Scamec parantaa tuottavuutta ja turvallisuutta koko maanlaisessa louhintaprosessissa. Laitteissa on mekanisoitu rusnausjärjestelmä, jota käytetään laitteen puolella. Puomi on varustettavissa joko hydraulisella iskuvasaralla tai kynsirusnausyksiköllä.



KUVA 5. Scamec 2000 M -rusnauslaite (Normet 2021)

3 TYÖN LÄHTÖKOHDAT

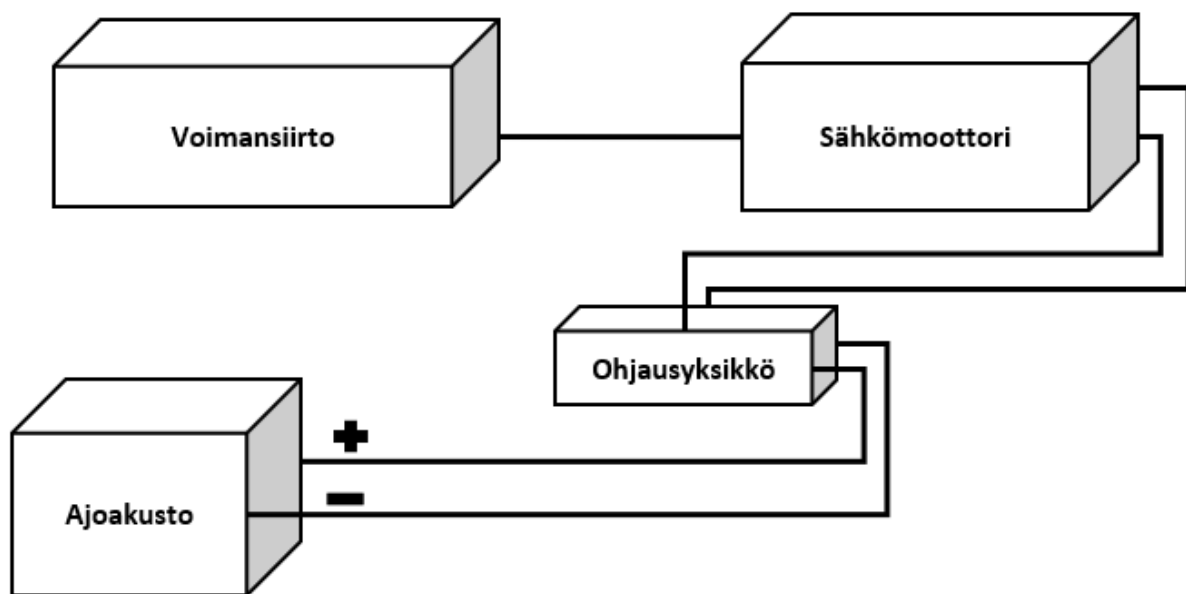
Kaivossähköajoneuvon käyttöönottotarkastuksia ja testauksia määritellessä on mietittävä saavutettavat hyödyt ja arvioida sitä, miksi toimenpide tulisi tehdä. Kaivosajoneuvoissa on paljon erilaisia toimintoja, joista poikkeamalle riski alttiimmat toiminnallisuudet tulisi testata. Laitteen toiminnoista ehdottomasti tärkeimmät ovat turvatoiminnot, joilla varmistetaan laitteen turvallinen käyttöönotto ja käyttö niin loppukäyttäjille kuin myös laitteen asentajille. Monet toiminnallisuudet perustuvat ohjausjärjestelmän ohjelmiston, sähkökytkentöjen ja hydrauliiikan toimintaan. Jos jonkin tärkeän turvatoiminnon suunniteltu toiminta on riippuvainen näiden kolmen järjestelmän oikeanlaisesta toiminnasta, on suositeltavaa varmistaa turvatoiminnon toimivuus tuotannossa testaamalla. Laitteen toimintojen testausten lisäksi sähköajoneuvosta täytyy tarkastaa ja mitata korkeajännitesähkökytkennät, ennen kuin laite otetaan tuotannossa ensimmäistä kertaa käyttöön. Tarkastuksilla ja mittauksilla varmistetaan, että sähkökytkennät eivät aiheuta välitöntä vaaraa, ja todetaan vikasuojauksen toimivuus. Näiden lisäksi sähköajoneuvoissa uutena komponentteina tulleet korkeajänniteajoakut on myös käyttöönotettava turvallisesti.

Laitteiden laadunvarmistamiseksi ja laiteturvallisuuden takaamiseksi Normet näki tarpeen kaivossähköajoneuvon käyttöönottotarkastuspöytäkirjalle, joka sisältää sähköajoneuvon käyttöönoton ja testaukset loogisessa järjestyksessä opastaen käyttöönottajaa toimimaan turvallisin menetelmin vaihe kerrallaan. Tavoitteenani on suunnitella käyttöönottotarkastuspöytäkirjasta sellainen, että siitä hyötyvät laitteiden asentajat, tarkastajat, tuotannon työnjohtajat ja huolto.

Käyttöönottotarkastusprosessin suunnittelua varten perehdyin ensiksi sähköajoneuvotekniikkaan ja sähköasennusten käyttöönottotarkastuksiin. Tiedonlähteenä toimivat erilaiset standardit ja kirjallisuus liittyen sähköasennuksiin ja sähköajoneuvoihin. Normet-laitteiden teknologiasta hankin syvällisempää tietoa tuotekehityksen suunnittelijoilta ja prototyypilaitteiden asentajilta. Tätä opinnäytetyötä varten valittiin tutkimuskohteeksi Transmixer SmartDrive -betoninkuljetussähköajoneuvo.

4 SÄHKÖAJONEUVOTEKNIikka

Sähköajoneuvoissa on polttomoottori korvattu erilaisilla sähkökomponenteilla, joita ovat ajoakusto, sähkömoottorit ja ohjausyksiköt. Ajoakustoa käytetään voimansiirron energian varastointiin lataamalla akkuja ulkoisesta virtalähteestä, joka on useimmiten sähköverkko. Ajoakuston varastointikykyä hyödynnetään myös ajonaikaisen hukkaenergian varastointiin jarrutuksista ja alamäkiajoista. Jotta energiaa saadaan alamäkeen ajamisesta ja jarrutuksista, tarvitaan ajoneuvoon generaattori. Sähköajoneuvoissa voimansiirtoon käytetyt sähkömoottorit toimivat myös hukkaenergian varastoivina generaattoreina. Näiden ominaisuuksien ohjauksiin tarvitaan sähkömoottoreille ohjausyksiköt, joista puhutaan myös invertteereinä. (Larminie & Lowry 2012, 19.) Kuviossa 1 on esitetty akkukäyttöisen sähköajoneuvon periaatepääkomponenttitasolla.



KUVIO 1. Akkukäyttöisen sähköajoneuvotekniikan periaate (mukaiillen Larminie & Lowry 2012, 20)

4.1 Tehoelektroniikka ja ajosähkömoottorit

Sähköajoneuvon ajosähkömoottorin tehontarve vaihtelee ajon aikana erilaisten ajotilanteiden mukaan. Nopeasti muuttuvan tehontarpeen ohjaamiseen tarvitaan sähkömoottorin lisäksi energian ohjaamiseen tehoelektroniikkaa. Tehoelektroniikka koostuu erilaisista komponenteista, kuten kytkimistä, transistoreista, tyristoreista, diodeista ja niiden ohjauslogiikasta. Käytännössä sähköajoneuvoissa tehoelektronikan komponentit ovat invertterin sisäisiä komponentteja. (Liu 2017, 97.)

4.1.1 Ajosähkömoottorit

Sähköajoneuvoissa käytetään sekä tasasähkö- että vaihtosähkömoottoreita. Hiiliharjalliset tasasähkömoottorit eivät ole niin kestäviä ja luotettavia, sillä niissä on kosketuksissa olevia kulutuspintoja, toisin kuin vaihtosähkömoottoreissa, joissa ainoat kuluvat osat ovat laakerit. Hiiliharjallisten tasasähkömoottoreiden huonot puolet alkavat näkyä, kun moottorin tehonkäyttö nousee korkeaksi. Silloin tasasähkömoottorin häviötehot aiheuttavat liian suurta lämpenemistä ja lämmön kertyessä suurimmalta osin roottoriin on sitä haasteellista jäähdyttää pois sieltä. Tästä syystä tasasähkömoottoreista käytetään enemmän hiiliharjattomia tyyppisiä, joissa ei ole vastaavia ongelmia hiiliharjojen kanssa (Larminie & Lowry 2012, 169).

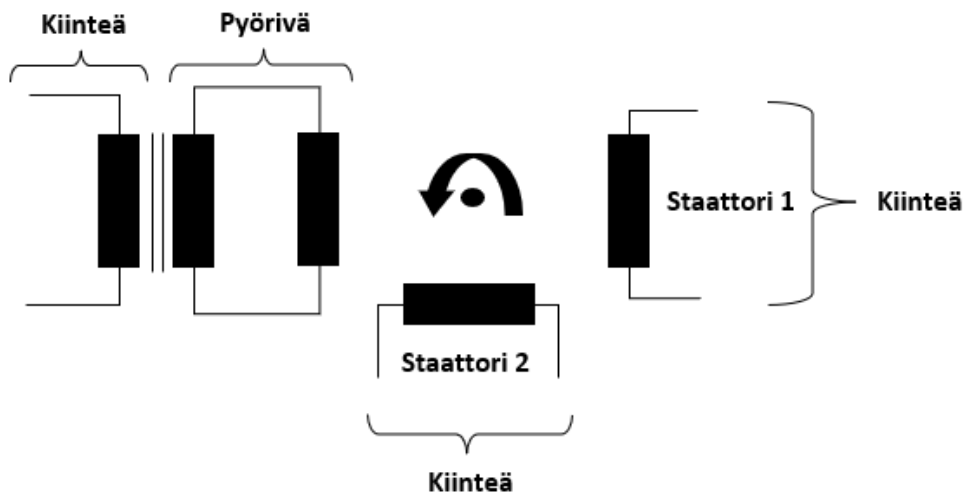
Vaihtosähkömoottoreista käytetään sekä oikosulkumoottoreita että kestromagneettimoottoreita. Ajoneuvon ollessa kyseessä moottorin vaihtelevan pyörimisnopeuden tarve vaatii moottorilta hyvää vääntömomenttia eri nopeuksilla. Kestomagneettimoottori kykenee korkeaan vääntömomenttiin matalilla kierrosnopeuksilla ilman lämpöhäviöitä. Oikosulkumoottori suoriutuu huonommin vaihtelevan nopeuden käytössä, sillä se alkaa lämmetä ja sen vääntömomentti heikentyy matalilla kierrosnopeuksilla. Kestomagneettimoottoreilla on myös kokonsa nähden korkeampi vääntömomentti. Kestomagneettimoottorin hyvien puolien ja kestromagneettien valmistuskustannusten laskemisen ansiosta kestromagneettimoottorin suosio on kasvanut sähköajoneuvokäytöissä. (Larminie & Lowry 2012, 173; Alacoque 2012, 65.)

4.1.2 Invertterit ja ajosähkömoottorin ohjaus

Vaihtosähkömoottorin tarvitseman vaihtosähkövirtapiirin ja ajoneuvon akuston tasasähkövirtapiirien yhteensovittamisessa käytetään inverttereitä. Vaihtosähkömoottorin tuottama hyötyenergia voidaan muuntaa vaihtosähköstä tasasähköksi invertterillä, minkä jälkeen tuotettu energia saadaan säilöttyä akustoon. Invertteri muuntaa sähkön myös toiseen suuntaan tilanteessa, jossa akuston tasasähkö muunnetaan moottorille käytettäväksi vaihtosähköksi. Samalla invertteri toimii moottorin ohjausyksikkönä, sillä se on kykenevä muuntamaan ajosähkömoottorin ohjauksen taajuutta. Taajuutta muuntamalla invertteri ohjaa ajosähkömoottorin pyörimisnopeutta ja koko ajoneuvon ajonopeutta. (Larminie & Lowry 2012, 165.)

Inverttereitä on olemassa sekä yksivaiheisille että kolmivaiheisille ohjauksille. Invertterin toiminta perustuu invertterin sisäisten kytkimien ja diodien toimintaan. Kytkimet katkovat siniaaltoisen vaihtojännitteen kantiaaltoiseksi tasajännitteeksi, jolloin vaihtosähkö saadaan muutettua tasasähköksi. Ylijäänyt energia ohjataan diodeilla takaisin tasavirtalähteeseen. (Liu 2017, 130.)

Jotta invertterillä pystytään ohjaamaan ajosähkömoottoria optimaalisesti, tarvitaan anturi mittaamaan ajosähkömoottorin kierrosasteita. Anturina käytetään resolver-nimistä komponenttia, joka on tietyn tyyppinen pyörivä sähköinen muuntaja. Resolver muuntaa sähkömoottorin akselin mekaanisen liikkeen sähköiseksi signaaliksi, jolla sähkömoottoria voidaan ohjata. Resolver koostuu kolmesta käämityksestä: pyörivästä muuntajasta, roottorin herätekäämityksestä ja kahdesta staattorikäämityksestä. Pyörivässä muuntajassa on staattorikäämitys ja roottorikäämitys, jotka pyörivät sähkömoottorin pyörivän liikkeen mukana. Paikallaan pysyvät kaksi kiinteää staattorikäämitystä mittaavat magneettisesti roottorin herätekäämityksestä sini- ja kosinisisignaaleja, joista saadaan sähkömoottorin akselin asento mitattua muuntimella. (Jufer 2010, 168; Ellis 2012, 288.) Kuviossa 2 on esitetty resolver-anturin ja sen muuntajien periaate.



KUVIO 2. Resolver-anturin periaate (mukaillen Jufer 2010, 168)

4.2 Ajoakusto

Sähköajoneuvojen ajoakkuina on käytetty erityyppisiä akkuja, kuten litiumioni-, lyijy-, nikkelimetalli-hybridi- ja natriumnikkelikloridiakkuja, joista yleisemmin käytetty tyyppi on nykyään litiumioniakku. Litiumioniakut ovat yleistyneet niiden hyvien ominaisuuksien vuoksi, joita ovat korkea energiatiheys ja pitkä käyttöikä. (Larminie & Lowry 2012, 29–51.)

4.2.1 BMS-järjestelmä

Sähköajoneuvon akkujen tilaa valvotaan Battery Management System -järjestelmällä (BMS), jonka toiminnoilla varmistetaan akuston käytön turvallisuus ja luotettavuus. Lisäksi hallintajärjestelmällä parannetaan akuston tehokkuutta ja käyttöikää ohjauslogiikoilla. BMS-järjestelmän tärkeimpiä toimintoja ovat:

- Akkujen parametrisoinnit käyttökohteeseen
- Akkujärjestelmän akkujen ja niiden kennostojen tasapainottaminen
- Akkutietojen hallinta
- Lämpötilojen hallinta akuille
- Akuston lataustenohjaukset. (Weixiang & Rui 2019, 231.)

BMS-järjestelmä valvoo ja tasapainottaa kennokohtaisesti jännitetasoja akuista, joka on tärkeä toiminto tehokkuuden ja turvallisuuden kannalta. Jos kennojännite ylittää sallitun maksimiarvon, se aiheuttaa kennoon lämpöpurkauksen, joka voi johtaa akuston lämpenemän ketjureaktioon ja akut voivat syttyä palamaan. Edellä mainitut vikatilanteet on suojattu BMS-järjestelmän ylijännitesuojauksella. (Barsukov & Qian 2013, 111.)

Jännitteiden tasapainotus vaikuttaa myös akkujen käyttöikään. Esimerkiksi 0,05 V:n maksimijännitteen ero kennoissa voi kuluttaa akkuja jopa 30 % enemmän. Kennojännitteiden epätasapaino heikentää merkittävästi akuston kapasiteettia ja tehoa. Osa kennoista saavuttaa maksimijännitteen ennen muita, jolloin ylijännitesuoja lopettaa lataamisen ja osa kennoista jää lataamatta täyteen. Tästä seuraten akuston kokonaisjännite ja -energia laskee. Kennojännitteiden epätasapaino heikentää myös akuston kapasiteettia varauksen purkautumisessa. Kapasiteetin heikentyminen aiheutuu ylipurkautumissuojan liian aikaisesta aktivoitumisesta. Ensimmäisten kennojen saavuttaessa ylipurkautumisenrajan aktivoituu ylipurkautumissuoja, joka estää korkeajännitteisempiin kennoihin jääneen energian käyttämisen. (Barsukov & Qian 2013, 112; Jiuchun & Caiping 2015, 117.)

Litiumioniakut on suojattava ylikuumentumiselta ja lisäksi pidettävä optimaalisessa lämpötilassa. Oikean lämpötilan ylläpitämiseksi akkuja jäähdytetään ja lämmitetään nestekiertoisilla järjestelmillä. Jäähdytystä ja lämmitystä ohjataan järjestelmän mittaamien lämpötilojen perusteella, joilla pystytään ohjaamaan jäähdytys- ja lämmitystoimintoja tilanteeseen sopivaksi. (Perdantis 2011, 9.)

4.2.2 SoC-arvo

Ajoakkujen varaustason mittaamiseen ja seurantaan käytetään State of Charge -arvoa (SoC). SoC-arvo on prosentti luku, jolla ilmoitetaan käyttäjälle sähköajoneuvon ajoakkujen varaustaso samalla tavalla kuin polttomoottorikäyttöisissä ajoneuvoissa ilmoitetaan polttoaineen taso. SoC-arvoa käytetään myös erilaisiin toimintoihin ohjausjärjestelmässä, kuten toimintasäteen mittaamiseen ja ajoakkujen tyhjäksi ajamisen ja yllilataamisen suojaamiseen. (Jiuchun & Caiping 2015, 43.)

SoC-arvo määritetään laskennallisesti akuston jäljellä olevan kapasiteetin ja maksimikapasiteetin suhteesta seuraavasti (Jiuchun & Caiping 2015, 43.):

$$SOC = \frac{Q_{rem}}{Q_{max}} \times 100\% \quad (1)$$

jossa Q_{rem} on akuston jäljellä oleva kapasiteetti ja Q_{max} on akuston maksimikapasiteetti. SoC-arvo on prosenttiluku.

Akuston kapasiteetin määrittämiseen käytetään BMS-järjestelmän tekemiä mittauksia ja logiikkaa. Järjestelmällä käytetään erilaisia menetelmiä kapasiteetin määrittämiseen akkujen käytön sovelluksen mukaan. Näitä menetelmiä ovat mm. kuormajännitteen, akuston sähkömotorisen voiman ja akuston sisäisen resistanssin seuranta. (Jiuchun & Caiping 2015, 50–52.)

4.2.3 Latauksenhallinta

Akkujen latauksen aikana niiden tilaa valvotaan latauksenhallinnalla turvallisen lataamisen varmistamiseksi. Latauksenhallintaa toteutetaan kolmella eri ohjausyksikkö kokoonpanolla, joita ovat:

- Laturin ohjausyksikkö
- BMS-yksikön ja hallitsevan laturin ohjausyksikön yhteisohjaus
- Hallitsevan BMS-yksikön ja laturin ohjausyksikön yhteisohjaus (Jiuchun & Caiping 2015, 123–124.)

Ajoakkujen latauksenohjaus pelkästään laturin ohjausyksiköllä ei sovellu nykyään yleistyneille litiumioniakuille, koska sen latauksenohjaus perustuu vain akun jännitteeseen. Laturin ohjausyksikkö lopettaa latauksen, kun tietty akun jännite saavutetaan, ja käynnistää latauksen jännitteen laskiessa. Ohjausyksikkö ei pysty hallinnoimaan kennokohtaista jännitettä ja lämpötilaa, jotka ovat litiumioniakun turvalliselle lataamiselle välttämätöntä tietoa. (Jiuchun & Caiping 2015, 124–125.)

BMS-yksikön ja laturin ohjausyksikön yhteisohjauksella voidaan täyttää laturin ohjausyksikön puutteellisuudet. Näiden yhteistoiminnassa BMS-yksiköllä valvotaan jokaisen kennon jännitettä, lämpötilaa ja virtaa. BMS-yksikkö ja laturin ohjausyksikkö kytketään toisiinsa väyläyhteydellä, jolloin molemmat ohjausyksiköt voivat hyödyntää toistensa mittaamia arvoja. Yhteistoiminnassa voi olla joko

BMS-yksikkö tai laturin ohjausyksikkö hallitseva. Se, kumpi on hallitseva, ohjaa latauksen logiikkaa. Hallitsevalla BMS-yksiköllä latauksenhallinta on kehittyneintä, sillä silloin saadaan akuston tietoja laajemmin ja suoraan latauksen ohjauslogiikalle. (Jiuchun & Caiping 2015, 126.)

5 SÄHKÖASENNUKSEN KÄYTTÖÖNOTTOTARKASTUS

Sähköasennusten käyttöönottotarkastuksella varmistetaan siitä, että asennusten sähköturvallisuus ja vaatimustenmukaisuus ovat kunnossa. Käyttöönottotarkastukseen sisältyy aistinvaraisia tarkastuksia, mittauksia ja toiminnallisia testauksia. Käyttöönottotarkastuksiin sisältyvillä mittauksilla varmistetaan sähköliitosten kunto ja laitteen vikasuojauksen toimivuuden kannalta tärkeiden liitosten oikeellisuus. Käyttöönottomittaukset jaetaan kahteen eri vaiheeseen, jännitteettömiin ja jännitteellisiin mittauksiin. Jännitteettömät mittaukset suoritetaan ensin, jolloin varmistetaan siitä, että laite voidaan kytkeä jännitteelliseksi turvallisesti. Käyttöönottotarkastuksia saa tehdä vain sähköalan ammattihenkilö. (Tukes 2021; Sähköturvallisuuslaki 2016.)

Sähköalan ammattihenkilö tarkoittaa sähkötöihin opastettua henkilöä, jolla lisäksi jokin seuraavista koulutus- ja työkokemusvaatimuksista täyttyy:

- suorittanut soveltuvan tekniikan alan korkeakoulututkinnon ja hankkinut kuuden kuukauden työkokemuksen sähkötöistä
- suorittanut soveltuvan sähköalan insinöörin tai teknikon tutkinnon ja hankkinut kuuden kuukauden työkokemuksen sähkötöistä
- suorittanut soveltuvan ammattitutkinnon, erikoisammattitutkinnon tai vastaavan aiemman koulutuksen tai tutkinnon ja hankkinut kuuden kuukauden työkokemuksen sähkötöissä
- suorittanut soveltuvan ammatillisen perustutkinnon tai vastaavan aiemman koulutuksen tai tutkinnon ja hankkinut vuoden työkokemuksen sähkötöissä
- hankkinut kuuden vuoden työkokemuksen sähkötöissä ja riittävät alan perustiedot. (Sähköturvallisuuslaki 2016.)

5.1 Aistinvaraiset tarkastukset

Aistinvaraisilla tarkastuksilla tarkoitetaan sähköasennusten vaatimusten mukaisuuden tutkimista käyttäen kaikkia aisteja ilman mittalaitteiden käyttöä. Aistinvarainen tarkastus tehdään ennen käyttöönottomittauksia laitteiston ollessa jännitteetön. Osa aistinvaraisista tarkastuksista tehdään sähköasennuksen edetessä, sillä kaikkia asennuksia ei ole järkevää tai mahdollista aukoa ja tarkistaa työn valmistuttua. Tarkastuksilla saadaan varmistettua, ettei missään ole kotelointeja, johtimia tai kaapeleita vaurioituneina. Lisäksi varmistetaan siitä, että sähkökoteloiden ja sähkökojeiden suojakannet ovat paikallaan ja

jännitteisten osien kosketussuojaus on toteutunut. Tarkastuksissa tulee myös kiinnittää huomiota käytettyihin johdinpoikkipintoihin, reitityksiin ja asennettuihin suojalaitteisiin, jotta sähköasennuksen vikasuojauksesta tulee suunnitelman mukainen. (SFS 6000, luku 6; Tiainen 2017, luku 61.)

Käyttökohteen ulkoisten tekijöiden vaikutukset täytyy ottaa myös huomioon tarkastellessa asennuksia. Ulkoisista tekijöistä merkittävimmät ovat kosteus, lämpötila ja pölyisyys. Reitityksien toteutuksessa mahdolliset mekaaniset vauriot on myös otettava huomioon. Jos mekaanisen vaurion vaaraa ei voida poistaa, tulee kaapeli suojata suojaputkella tai jollakin muulla tavalla mahdollisilta mekaanisilta vaurioilta. Käytettyjen kaapeli tyyppien täytyy olla käyttökohteen mukaisia. Esimerkiksi taajuusmuuttajilla tulee käyttää häiriösuojattua kaapelia ja palohälytys järjestelmissä käytetään korkean lämpötilan kestävää kaapelia. (Tiainen 2017, luku 61.)

Suojalaitteiden tulee vastata suunnitelman mukaisia vaatimuksia toiminnoiltaan. Vääräntyyppinen suojalaite voi katkaista virtapiirin ei-halutuissa tilanteissa. Toisenlainen häiriötoiminto voi tulla vikatilanteessa, jolloin suojalaite ei katkaise virtapiiriä tarpeeksi ajoissa. Tällöin henkilövahingon riski ja tulipaloriski kasvavat, kun sähkölaitteisto ei ole suunnitelman mukaisesti vikasuojattu. (Säköturvallisuuslaki 2016.)

Johtimien tunnusvärien oikeellisuudessa kiinnitetään huomiota erityisesti suojamaadoituksen keltavihreään tunnusväriin. Keltavihreää väriä saa käyttää vain suojamaadoituksen johtimien ja liitosten tunnusvärinä. Tunnusvärien lisäksi keskusten kojeiden, suojalaitteiden ja kytkentöjen merkintöjen on oltava yhdenmukaiset piirustusten kanssa. (SFS 6000, luku 6.)

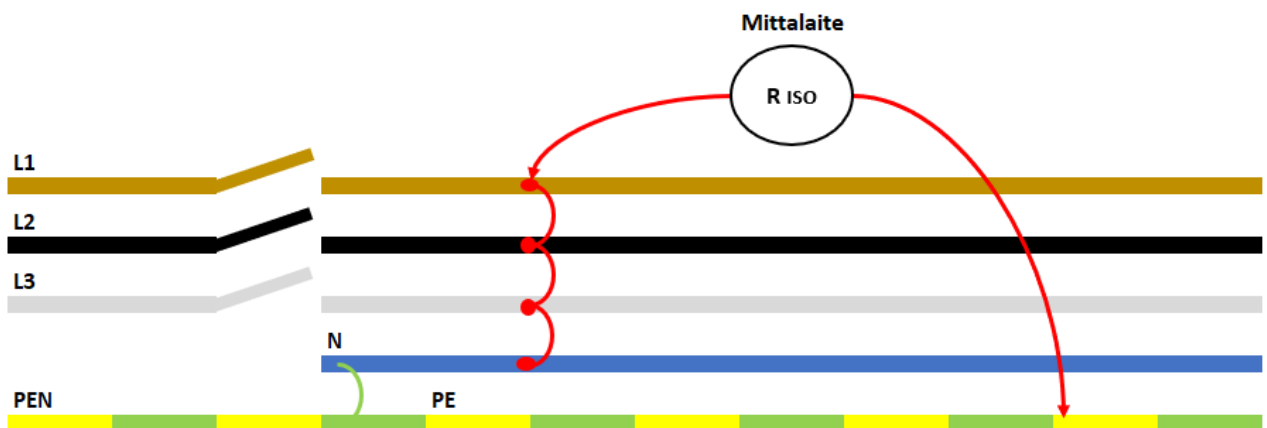
Tarvittavien opasteiden ja varoituskylttien oikeellisuus ja vaatimusten mukaisuus on myös varmistettava asennuksen edetessä ja valmistuttua. Korkeajännitteisissä sähkökoteloissa ja komponenteissa pitää olla selkeät varoituskyltit sähköiskunvaarasta. ISO-standardijärjestö on standardoinut vaaralliselle korkeajännitteelle yhdenmukaisen varoituskolmiokyltin käytettäväksi kaikissa sähköasennuksissa. (Säköturvallisuuslaki 2016; ISO 7010.)



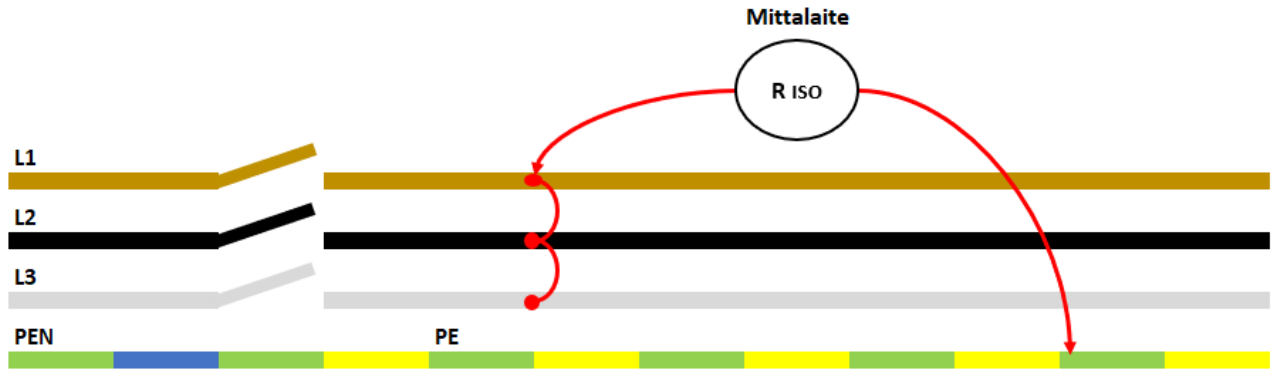
KUVA 6. Vaarallinen jännite -varoituskolmio W012 (ISO 7010)

5.2 Eristysresistanssimittaus

Sähköasennuksen jännitteisten osien ja suojamaadoituksen välisen eristyksen vaatimustenmukaisuus todetaan eristysresistanssimittauksella. Jännitteisten osien ja suojamaadoituksen välisen eristysresistanssin pitää olla vähintään $1\text{ M}\Omega$, kun mittaus suoritetaan 500 V :n tasajännitteellä. Erikoistapauksissa voidaan käyttää raja-arvona $50\text{ k}\Omega$, jos mitattavan kohteen rakenteesta johtuen eristysresistanssi on pienempi kuin $1\text{ M}\Omega$. TN-S-järjestelmässä jännitteisiin osiin lasketaan vaiheiden lisäksi myös nolla. Kuviossa 3 on esitetty eristysresistanssimittauskytkentä TN-S-järjestelmässä ja kuviossa 4 TN-C-järjestelmässä. (SFS-EN60204, 92; Tiainen 2017, luku 61.)



KUVIO 3. Eristysresistanssimittaus TN-S-järjestelmässä (mukaillen Tiainen 2017, luku 61)



KUVIO 4. Eristysresistanssimittaus TN-C-järjestelmässä (mukaillen Tiainen 2017, luku 61)

Tarvittavia mittauskertoja pystytään vähentämään kytkemällä vaiheet ja nolla yhteen mittauksen ajaksi, jolloin voidaan mitata kaikkien jännitteisten johtimien eristys suojavaadoitukseen yhdellä kertaa. Ennen mittauksia on varmistettava, että mitattavan kohteen kaikki mekaaniset kytkimet ovat 1-asennossa eli koskettimet ovat kiinni, jotta saadaan kaikki asennukset mukaan mittaukseen. Joissakin tapauksissa asennusta ei voida mitata yhdellä kertaa, ja silloin mittauskertoja on tehtävä niin monta kuin on tarpeellista, jotta asennettu laitteisto saadaan kokonaisuudessaan mitattua. Esimerkiksi kontaktori-kytkennät voivat rajata asennuksia toisistaan jännitteettömässä tilassa, jolloin kontaktorilta on mitattava eristysresistanssi molemmilta puolilta kytkentöjä. Erikseen sovittaessa joissakin mittauskohteissa voidaan myös mitata jännitteisten johtimien väliltä eristysresistanssi, mutta tällöin kuormat tulisi olla irrotettuna. (Tiainen 2017, luku 61.)

Jotkin laitteet voivat vääristää mittauksia tai vahingoittaa koejännitteestä. Näiden laitteiden kohdalla voidaan tehdä poikkeuksia mittauksiin. Esimerkiksi ylijännitesuojat aiheuttavat häiriötä mittauksen aikana ja siksi ne voidaan erottaa kytkennöistä mittauksen ajaksi tai mittausjännitettä voidaan alenuttaa ylijännitesuojan toiminta-arvoa pienemmäksi. Mittausjännitteen alarajana kuitenkin tulee noudattaa vaiheen ja nollan välistä jännitettä. (SFS-EN60204, 92.; SFS 6000, luku 6.)

Eristysresistanssimittauksissa tarkistetaan SELV- ja PELV-virtapiirien toiminnallisuus, jolloin varmistetaan niiden sähköisen erotuksen toimivuus. SELV- ja PELV-virtapiirien mittauksissa on tarkistettava, että ensiö- ja toisiopiiri ovat erotettuna toisistaan mitaamalla eristysresistanssi ensiöpiirin ja toisiopiirin johtimien väliltä. Lisäksi SELV-virtapiirin ollessa kyseessä mitataan eristysresistanssi ensiö-

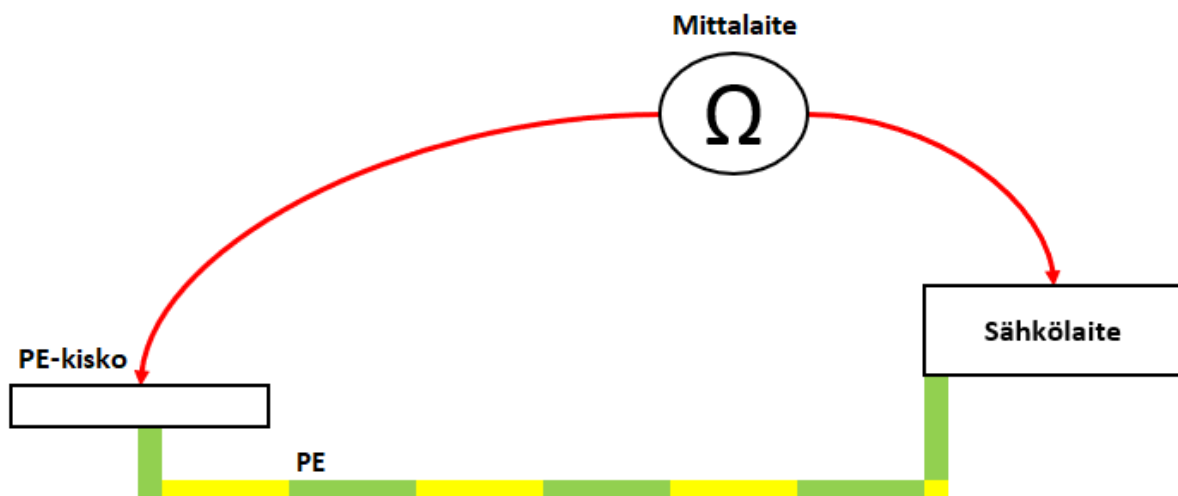
virtapiirin suojamaadoituksesta ja toisiovirtapiiristä. SELV-virtapiiriä ei saa maadoittaa ja se varmistetaan tällä mittauksella. (Tiainen 2017, luku 61.) Taulukossa 1 on esitetty eristysresistanssimittauksille pienimmät sallitut arvot.

TAULUKKO 1. Eristysresistanssin pienimmät sallitut arvot (mukaiillen SFS 6000, luku 6)

Virtapiirin nimellisjännite	Koejännite (Tasajännite) [V]	Eristysresistanssi [M Ω]
SELV ja PELV	250	$\geq 0,5$
Enintään 600 V FELV mukaan luettuna	500	$\geq 1,0$
Yli 500 V	1000	$\geq 1,0$

5.3 Suojajohtimen jatkuvuusmittaus

Suojajohtimen jatkuvuusmittaus on yksi tärkeimmistä käyttöönottotarkastusmittauksista, koska sillä varmistutaan siitä, että vikasuojauksen toiminnallisuuden kannalta välttämätön suojajohdinpiiri on kytketty kaikkiin kytkentäpisteisiin ja liitokset on tehty riittävän hyvin. Mittauksilla varmistetaan sähkölaitteiston suojaavan potentiaalintasaus piirin toimivuus mittaamalla resistanssi PE-liitosten ja päämaadoituspuite väliltä. Sähkölaitteiston kaikkien jännitteelle alttiiden ja sähköä johtavien osien suojajohtimen jatkuvuudesta pitää varmistua mittauksilla. Jännitteelle alttiita osia ovat esimerkiksi sähkökeskusten ja sähkökoneiden koteloinnit, joiden sisällä on toteutettu jännitteellisiä kytkentöjä. Kuviossa 5 on esitetty suojajohtimen jatkuvuusmittauskytkentä. (Tiainen 2017, luku 61.)



KUVIO 5. Suojajohtimen jatkuvuuden mittaus (mukaiillen Tiainen 2017, luku 61)

Mitatun resistanssin on oltava tarpeeksi pieni, jotta voidaan varmistua siitä, että liitokset on kunnolla tehty ja mitattava suojajohdin on kytkeytynyt suoraan päämaadoituspisteeseen. Mittaustulokselle ei ole tiettyä tarkkaa raja-arvoa, sillä mittauksen hyväksyttävyydessä tulee ottaa huomioon mitatun johtimien poikkipinta ja pituus. Mitatulle resistanssiarvolle yleisemmin käytetty yläraja-arvo on 1Ω . Useimmiten PE-liitoksen ja päämaadoituspisteen välinen resistanssi saa siis olla maksimissaan 1Ω . Mitattaessa pitkien matkojen suojajohtimia voi kuitenkin mittaustulos ylittää tuon rajan ja silloin tulee määrittää hyväksytyt raja tapauskohtaisesti. Vaativissa suojamaadoituskytkennöissä valmistaja voi itse määrittää raja-arvon pienemmäksi, jotta liitoksen kunto vastaa käyttökohteen vaatimuksia. (Tiainen 2017, luku 61.) Raja-arvojen määritysten avuksi on olemassa taulukkotietoa johtimien resistanssiarvoista. Taulukossa 2 on esitetty kuparijohdinten tyypillisiä resistanssiarvoja R nimellisen poikkipinta-alan S mukaan $30 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa.

TAULUKKO 2. Kuparijohdinten tyypilliset resistanssit $30 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa (mukailen SFS 6000, luku 6)

Kuparijohtimen nimellinen poikkipinta-ala S [mm ²]	Tyypillinen resistanssi R lämpötilassa $30 \text{ }^\circ\text{C}$ [m Ω /m]
1,5	12,5755
2,5	7,5661
4	4,7392
6	3,1491
10	1,8811
16	1,1858
25	0,7525
35	0,5467
50	0,4043
70	0,2817
95	0,2047
120	0,1632
150	0,1341
185	0,1091

Ajoneuvojen sähköisenvoimansiirron vaatimusten standardissa UNECE R100 on ohjeistettu potentiaalintasauksien mittaukseen yläraja-arvoksi $0,1 \Omega$ (UNECE R100, 21–22).

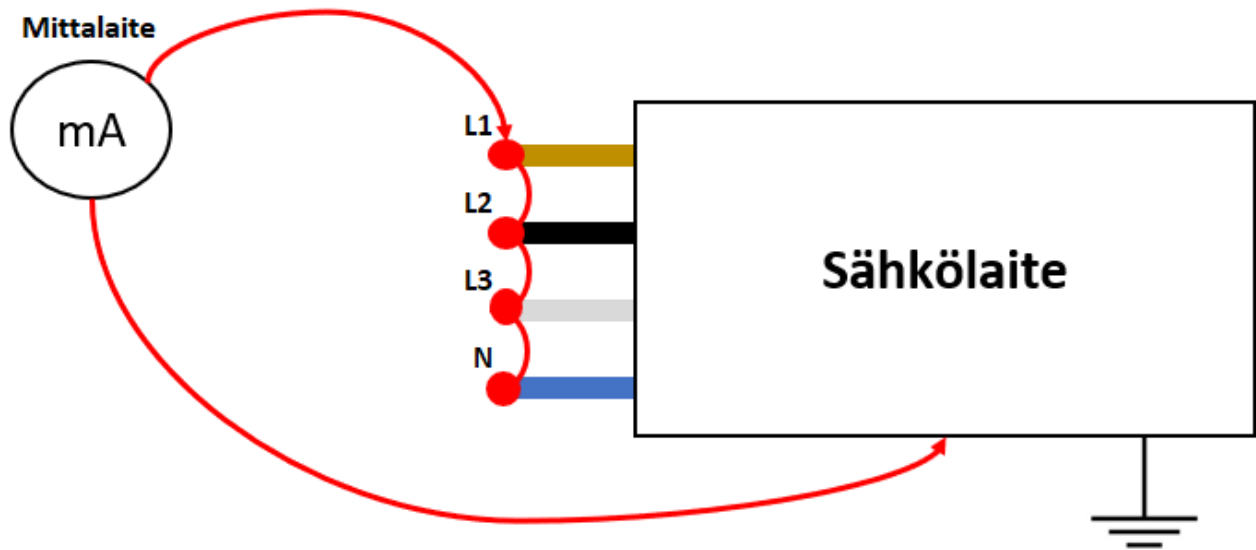
Suojajohtimen jatkuvuusmittauksia voi olla tarpeellista tehdä uudelleen, jos kytkentöjä joudutaan muuttamaan kesken käyttöönottotarkastuksen. Esimerkiksi jos suojajohtimen jatkuvuus mittaukset on tehty jo sähkölaitteistolle ja havaitaan eristysresistanssimittausten aikana vika, täytyy vian korjauksen jälkeen suorittaa suojajohtimen jatkuvuusmittaukset riittävällä laajuudella uudelleen. (Tiainen 2017, luku 61.)

5.4 Korkeajännitetestit

Korkeajännitetestillä testataan johtimien ja suojajohdinpiirin välinen eristys koestamalla sähköjärjestelmä testijännitteellä ja mittaamalla vuotovirtaa johtimien ja suojajohdinpiirin väliltä. Valmistaja määrittää itse mittausten raja-arvon laitteistokohtaisesti. Jännitetestejä voidaan toteuttaa joko vaihtovirralla tai tasavirralla mittaushetken mukaan. (Ikonix 2022, 11–12.)

Vaihtovirralla testausjännitteen on oltava kaksinkertainen laitteiston nimellisjännitteeseen nähden tai vähintään 1 000 V. Jos nimellisjännite on kaksinkertaisena suurempi kuin 1 000 V, tulisi jännitekoetta tehdä suuremmalla jännitteellä. Testausjännitteen nimellistaajuutena on käytettävä 50 Hz tai 60 Hz ja testijännitteen tulisi vaikuttaa noin 1 sekunnin ajan. Syötetyn jännitteen tulee saavuttaa testausjännitteen taso viimeistään 5 sekunnissa. (SFS-EN 60204, 92; IEC 61180, 30.)

Tasavirralla testausjännite syötetään sähkölaitteeseen riittävän alhaisena, josta se nostetaan hitaasti määritetyn testijännitteen tasolle. Porrastetulla jännitteen nousulla pyritään estämään kytkentätransienteista johtuvaa ylijännitettä. Tasajännitteen nousu on riittävän hidas, kun syöttöjännite on 75 % testijännitteestä ja syöttöjännite nousee 5 % sekuntia kohden. Jännitetestä suorittaessa tulee myös huomioida komponentit, joita ei ole mitoitettu kestävästi erottamalla ne testin ajaksi. Testin ja testilaitteiden on noudatettava standardia IEC 61180. Kuviossa 6 on esitetty korkeajännitetestin mittauskytkentä. (SFS-EN 60204, 92; IEC 61180, 26.)



KUVIO 6. Korkeajännitetesti sähkölaitteelle (mukaillen Metrel 2021, 79)

5.5 Syötön automaattinen poiskytkentä

Vikasuojauksen varmistamiseksi sähköasennuksesta on todettava syötön automaattisen poiskytkennän toimivuus. Syötön automaattinen poiskytkentä katkaisee virtapiiristä jännitteen vaatimusten mukaisessa ajassa, jos virtapiiri altistuu vaaralliselle kosketusjännitteelle. Poiskytkennän toiminta perustuu oikosulkusuojaukseen, joka on yleensä toteutettu sulakkeilla, johdonsuojakatkaisijoilla tai jollakin muulla käyttökohteeseen soveltuvalla suojalaitteella. (Tiainen 2017, luku 61.)

Syötön automaattisen poiskytkennän toimivuuden toteamiseksi täytyy selvittää sähköasennuksen pienin mahdollinen oikosulkuvirta vaiheen ja suojajohtimen väliltä. Pienin oikosulkuvirta voidaan todeta mittaamalla tai tarkastaa sähköasennuksen suunnittelijan tekemistä suojauslaskelmista. Yleisempää on tarkastaa oikosulkusuojaus suojauslaskelmista, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, että tehdyt asennukset vastaavat suunnittelijan laskemia johtopituuksia ja suojalaitteet ovat suunnitelman mukaisia. Jos pienin oikosulkuvirta selvitetään mittaamalla, mitataan sähköasennuksen pienin silmukkaimpedanssi vaiheen ja suojajohtimen väliltä. Mitatulla silmukkaimpedanssilla voidaan laskea pienin mahdollinen oikosulkuvirta. Sähköasennuksen oikosulkuvirran tarkastusta ei vaadita, jos vikasuojaus on toteutettu vikavirtasuojalla. (Tiainen 2017, luku 61.)

5.6 Vikavirtasuojan toiminnan testaus

Vikavirtasuojan toimintaa voidaan testata kolmella eri menetelmällä, joilla varmistetaan suojalaitteen oikeanlaisesta toiminnasta vikatilanteessa. Vikavirtasuojan toiminnan testaus tehdään silloin, kun sähkölaitteisto on kytketty syöttöjännitteeseen. Vikavirtasuojan toimivuus testataan ensimmäisenä vikavirtasuojakytkimen omasta testipainikkeesta. Testipainikkeen painamisesta pitäisi vikavirtasuojakytkimen katkaista virtapiiri välittömästi. (Mäkinen 2020, 11–15.)

Tämä testauksen lisäksi mitataan vikavirtasuojan toimintavirta ja toiminta-aika. Standardi SFS 6000 ei velvoita toiminta-ajan mittaamiseen, mutta se on suositeltavaa. Mitattu toimintavirta ei saa ylittää vikavirtasuojan nimellistoimintavirtaa, joka on yleensä 30 mA henkilösuojausissa ja palosuojausissa 300 mA tai 500 mA. Toiminta-aika saa olla maksimissaan 300 ms vikavirtasuojan nimellistoimintavirralla. Käyttöönottotarkastuksen jälkeenkin on suositus tehdä säännöllisin väliajoin vikavirtasuojan testaus sen omasta testipainikkeesta. (Mäkinen 2020, 11–12.)

5.7 Kiertosuunnan tarkistus

Sähköasennuksen ollessa monivaiheinen tulee sille tehdä kiertosuunnan tarkistus. Kiertosuunnan tarkistuksella varmistetaan vaihejärjestyksen oikeellisuus ja se, että se säilyy samana kaikissa sähköasennuksen osissa. Vaihejärjestyksen mittaukseen tarvitaan kolme mittapäätä, joilla saadaan kaikki kolme vaihetta mittaukseen samanaikaisesti. (Kauppila 2018, 34–35.)

5.8 EMC-suojaus

EMC-suojauksella varmistetaan sähkölaitteiston sähkömagneettinen yhteensopivuus käyttämällä erilaisia minimointikeinoja (IEC/TR 61000, 7). Sähkömagneettisia häiriöitä syntyy kulkeutuvista häiriöistä johtumalla ja säteilemällä. Laite voi olla häiriön säteilijä ja vastaanottaja samanaikaisesti. Kuviossa 7 on esitetty säteilijän ja vastaanottajan välillä kulkeutuvat häiriöt. (IEC/TR 61000, 9.)



KUVIO 7. Esitys sähkömagneettisesta häiriömekanismista (mukaihen IEC/TR 61000, 9)

Kolme päätekijää, jotka liittyvät sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen, ovat säteilijät, kytkeytymispolut ja vastaanottajat. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden saavuttamiseksi tulisi potentiaalisten häiriövastaanottajien häiriönsietokykyä parantaa jo suunnitteluvaiheessa. Asennuksen aikana tulisi huomioida säteilijöiden häiriöpäästöjen alentaminen ja kytkeytymispolkujen vaimentaminen. (IEC/TR 61000, 9.)

EMC-suojauksella ja turvallisuus- tai eristysvaatimuksilla voi olla yhteisiä toiminnan kannalta tärkeitä seikkoja, kuten ylijännitesuojaus, ukkossuojaus ja maadoitus. EMC-suojauksen kannalta on tärkeää varmistaa, että sähkölaitteiston potentiaalintasaus on kunnossa. Potentiaalintasaus tarkoittaa kaikkien paljaiden ja ulkoisten johtavien laitekoteloiden, järjestelmien ja asennusten osien yhteen kytkemistä samaan potentiaalipisteeseen, joka on maadoitus. (IEC/TR 61000, 5.)

EMC-suojauksen tason numeerinen arviointi ei aina ole mahdollista monimutkaisissa asennuskohdeissa, jolloin vähintäänkin tulisi laatia tarkistuslista asennuksiin liittyen (IEC/TR 61000, 14). Listalla voidaan varmistaa, että sähkölaitteisto on asennettu suunnitelman mukaisesti. Käytännössä suunnitelman mukaisesti tehty asennus tarkoittaa sitä, että häiriösuojausta on käytetty niissä asennuksissa, joihin se on suunniteltu. Esimerkiksi sähkömoottoreiden taajuusmuuttajaohjauksissa on käytettävä EMC-suo-

jattua kaapelia, jotta kaapeli ei saa häiriötä ulkoisista tekijöistä. EMC-suojasta voidaan myös täydentää sähkölaitteistoon asennettavilla suodattimilla. Lisäksi on varmistuttava siitä, että komponentit täyttävät EMC-direktiivin vaatimukset. (IEC/TR 61000, 6; Tiainen 2017, luku 61.)

6 SÄHKÖAJONEUVON LAADUNVARMISTUS

Tuotteen laatua ja tuoteturvallisuutta varmistetaan erilaisin menetelmin, kuten tarkistuksilla, mittauksilla ja testauksilla. Laadunhallinnalla tavoitellaan hyvää asiakas tyytyväisyyttä, kannattavaa liiketoimintaa sekä kilpailukyvyyn säilyttämistä ja kasvattamista. Kun laadunhallintaprosessit ja toiminnot on suunniteltu toimiviksi, ovat kummatkin osapuolet tyytyväisiä, tuotteen valmistava yritys ja asiakas. Tuotteen laadun ja tuoteturvallisuuden varmistamiseksi täytyy olla laadunvarmistusprosessin kunnossa.

6.1 Laadunvarmistusprosessi

Valmistettavan tuotteen laadunvarmistusprosessi alkaa osatoimittajien tuotannosta ja heidän laadunvarmistus menetelmistään. Tuotteen valmistajan on tärkeää seurata oman tuotannon lisäksi myös alihankkijoiden ja osatoimittajien laadunvarmistusmenetelmiä ja luoda vaatimuksia niiden toteutukseen. Näin valmistava yritys voi varmistua siitä, että asiakkaille toimitetut tuotteet ja niiden komponentit vastaavat korkeaa laatua ja poikkeamat saadaan minimoitua.

Tuotteen laadunvarmistusprosessin suunnittelussa on pystyttävä erottelemaan korkeimman riskin laatu-poikkeamat matala riskisistä, sillä liiallisilla tarkistuksilla ja varmistuksilla pidennetään tarpeettomasti tuotannon läpimenoaikaa ja tuotteen valmistuksen kustannukset kasvavat. Prosessin suunnittelussa on myös huomioitava laiteturvallisuuden varmistus. Valmistavan yrityksen on laadun lisäksi varmistuttava siitä, että asiakkaalle toimitetaan turvallisesti käytettävä tuote, ja varmistettava laiteturvallisuus erilaisilla testauksilla ja mittauksilla osana laadunvarmistusprosessia.

Normetin tuotannon sisäiseen laadunvarmistusprosessiin sisältyy kokoonpano-, viimeistely- ja loppu-testaustiimin laadunvarmistusta. Prosessia suunnitellessa oli huomioitava turvallisuuskriittiset tarkistukset ja testaukset prosessin alkupäähän, jolla varmistetaan tuotannon työntekijöiden työturvallisuus. Prosessin alkupäässä olevat tarkistukset ja testaukset suorittaa kokoonpanotiimi, minkä jälkeen laitteen testausta jatkaa viimeistely- ja testaustiimi. Valmiista sähköajoneuvon laadunvarmistusprosessista tehtiin prosessikaavio, jonka pohjalta pystyttiin tekemään laadunvarmistus työtehtävien jakamista tiimeille. (LIITE 1)

6.2 Akkukäyttöisen kaivossähköajoneuvon käyttöönottotarkastukset ja testaukset

Kaivossähköajoneuvon käyttöönottotarkastukset ja testaukset sisältävät visuaalisia tarkistuksia, sähköjen ja paineiden mittauksia, kalibrointeja ja laitteen toimintojen testausta. Kaivoslaitteiden sähköjärjestelmien testauksiin sovelletaan koneturvallisuuden standardia EN 60204.

6.2.1 Visuaaliset tarkistukset

Visuaalisilla tarkistuksilla varmistetaan sähköasennusten vaatimusten mukaisuus silmämääräisesti ennen kuin aloitetaan laitteen käyttöönottotarkastusmittaukset. Tarkistuksissa huomioidaan kaapeleiden ja johtosarjojen reititykset, sulakekoot, opasteet, koteloinnit ja EMC-suojauksen vaatimukset. Reitityksiä tarkistaessa kiinnitetään huomioita siihen, että kaapelit ja johtosarjat ovat riittävällä etäisyydellä kuumista ja liikkuvista kohteista. Tällöin varmistetaan siitä, että ne eivät pääse vaurioitumaan, kun laite otetaan käyttöön. Vaarallisen jännitteen sisältävissä koteloinneissa on oltava riittävästi opasteita, jotta huoltoasentajaa ja loppukäyttäjää opastetaan tarpeeksi siitä, mitkä koteloinnit sisältävät sähköiskun vaaran. Sähkökeskuksista ja muista koteloinneista on varmistuttava, että ne täyttävät minimikotelointiluokkavaatimuksen, jolla toteutetaan jännitteisten osien kosketussuojaus ja liitosten kosteussuojaus. Koteloinneista on lisäksi tarkistettava vedenpoistoreikien oikeellisuus kondenssiveden poistoa varten.

EMC-suojauksen vaatimukset täyttyvät, kun oikeissa kytkennöissä on käytetty EMC-suojattuja kaapeleita ja niiden suojaverkko on oikeaoppisesti asennettu. Suojaverkot on asennettava kytkentäkoteloihin EMC-läpivientiholkeilla siten, että ne kytkeytyvät kotelointien runkoihin ja laitteen potentiaalintasaukseen.



KUVA 7. Kaapelin vieminen koteloon EMC-holkkitiivisteiden läpi

Sähköajoneuvoista on myös varmistettava, että kaikki sähköjärjestelmien komponentit ja suojalaitteet on aseteltu oikeille asetuksille sähkökaavion mukaisesti. Säädettäviä suojalaitteita ovat oikosulkusuojat, lämpösuojat, mittamuuntimet ja turvareleet.

6.2.2 Sähköasennusten käyttöönottotarkastusmittaukset ja pöytäkirja

Sähköasennusten käyttöönottotarkastusmittauksille oli tarve suunnitella kaksi mittauspöytäkirjaa, sillä laitteen asennuksiin sisältyi vaihtovirta- ja tasavirtasähköjärjestelmät. Mittauksiin sisältyy suojajohtimen jatkuvuus- ja eristysresistanssimittaukset. Lisäksi molemmille sähköjärjestelmille suoritetaan korkeajännitetestit vuotovirtojen mittausta varten. Mittauspöytäkirjoihin kirjataan jokaisesta mittauspisteestä tulokset ylös. Kaikki mittaustulokset kirjataan ylös niin laadunvarmistuksen kuin myös huollon tarpeet huomioiden. Huollon kannalta on tärkeää tietää, mitä mittaustulokset ovat olleet uudessa laitteessa silloin, kun se on käyttöönotettu tehtaalla, sillä laitteen määräaikaishuoltoihin sisältyy samoja sähköasennusten tarkastusmittauksia ja silloin tarvitaan vertailukohde mittaustuloksille. Normetin laitteet voivat sisältää myös pistorasioita, jolloin tehtäisiin myös vikavirtasuojan testaukset. Tutkimuksen kohteena olevassa laitteessa ei ollut pistorasiaa, joten vikavirtasuojan testaukset jätettiin pois tästä tarkastelusta.

Laitteen sähköasennukset sisältävät Normetilla ja alihankinnassa tehtyjä asennuksia ja siksi täytyi myös selvittää, mitä mittauksia ja testauksia osatoimittajat tekevät omassa valmistusprosessissaan. Tuotteen valmistajana Normetin on myös varmistuttava siitä, että alihankkijoiden asennusten testaukset ja tarkistukset ovat vaatimusten mukaiset. Alihankinnassa tehtyjä asennuksia ovat mm. ajoakkujen, jäähdytysyksikön ja sähkökeskusten sisäiset kytkennät.

Ajoakkujen ja muiden komponenttien sisäisten kytkentöjen mittauksia ei nähty tarpeelliseksi tehdä Normetilla, sillä komponenttien toimittajat ovat itse suunnitelleet komponentit ja niille soveltuvat mittaukset ja testaukset, jotka toimittajat suorittavat osana valmistusprosessiaan. Komponenttien toimittajia pyydettiin lähettämään mittaus- ja testausdokumentaatiot osatoimitusten mukana todistuksena siitä, että mittaukset on tehty toimitetulle komponentille ja tulokset ovat olleet hyväksyttävien rajoissa.

Sähkökeskusten alihankkijoiden tekemiä mittauksia huomioidessa oli tutkittava kahden eri tyypin sähkökeskuksia, vaihtovirta ja tasavirta sähkökeskuksia. Keskustyypeillä oli eri alihankkijat ja molemmilta selviteltiin keskuksille tehdyt mittaukset. Vaihtovirta keskusten alihankkija mittaa keskuksista suojajohtimen jatkuvuuden ja eristysresistanssimittaukset. Tasavirtakeskusten alihankkija suorittaa itse suunnittelemansa testin, jolla varmistutaan siitä, että kytkennöissä ei ole oikosulkua.

Vaikka alihankkijat mittaavat ja testaavat sähkökeskukset, osalta alihankkijoista puuttui eristysresistanssimittaus ja korkeajännitetesti vuotovirtamittauksille. Normetilla otettiin toimintataivaksi mitata myös sähkökeskusten sisäiset kytkennät Normetilla asennettujen kytkentöjen lisäksi. Päätöstä miettiessä huomiottiin se, että sähkökeskukset ovat Normetin itse suunnitteleimia ja lisäksi niiden sisälle lisätään kytkentöjä vielä Normetin tuotannossa. Mittausten lisäys Normetin mittauspöytäkirjaan ei tuonut lisätyötä merkittävästi mittausprosessiin, sillä mittauksiin lisättiin vain kontaktorierotusten mittauksia. Lisättyjen mittausten lisäksi ohjeistettiin laittamaan sähkökeskuksen kytkimet kiinni mittausten ajaksi, jotta sähkökeskusten sisäiset kytkennät ovat myös mukana mittauksessa.

Mittauspöytäkirjojen sisältöä ja rakennetta suunniteltaessa tavoitteena oli saada pöytäkirjoihin kaikki tarvittavat tiedot mittausten suorittamiseksi, jotta erillistä ohjemateriaalia ei tarvita mittausten tekijälle. Mittauspöytäkirjoja koekäytettiin SmartDrive Transmixer -laitteen käyttöönottotarkastusmittauksissa, minkä jälkeen pöytäkirjan mittauspisteet täsmentyi mittauspöytäkirja pohjaan. Viimeistelyillä saatiin

vaihtovirta- ja tasavirtajärjestelmille toimivat ja mittaaajan tarpeita palvelevat kokonaisuudet (LIITE 2). Mittauspöytäkirja sisälsi mm. mittauspisteet mittaustyypeittäin, mittauspisteille tarkempaa ohjeistusta ehdoista ja tulosten raja-arvoista sekä mittalaitteeseen asetettavat mittaasetukset. Pöytäkirjaan lisättiin tiedot siitä, mitä komponentteja on hyvä erottaa minkäkin mittauksen ajaksi. Esimerkiksi osa inverttereistä tuli erottaa mittauksista. Valmiit mittauspöytäkirjat tulevat olemaan koko laitteen käyttöönottotarkastuspöytäkirjan liitteinä.

Mittauksia varten Normetilla on käytössä Metrel MI-3394 -laitetesteri, jonka kalibroinnin voimassaolo päivämäärä kirjataan ylös mittauspöytäkirjaan. Päivämäärän kirjauksen pyynnöllä varmistetaan siitä, että mittaaaja tarkistaa mittarin kalibroinnin voimassaolon aina ennen mittauksen aloitusta. Käyttöönottotarkastusmittauksiin käytettävän testauslaitteen laadun ja oikean toiminnan varmistamiseksi on se kalibroitava vähintään vuoden välein (IEC 61180, 15). Laitetesterillä tehdään suojajohtimen jatkuvuuden mittaus, eristysresistanssimittaus ja korkeajännitetesti. Eristysresistanssimittauksen ja korkeajännitetestin aikana on erityisesti kiinnitettävä huomiota työympäristöön ja siihen, että kukaan ei ole kosketuksissa mitattavaan laitteeseen, koska mittauksen aikana testeri syöttää koejännitteen laitteeseen ja sähköiskun vaara on olemassa (Metrel 2021, 8). Kokoonpanotiimin sähköasentajat suorittavat mittaukset, kun laitteen kaikki sähkökytkennät on tehty.



KUVA 8. Metrel MI-3394 -laitetesteri

6.2.3 Ajoneuvosähköjen ja ohjausjärjestelmän käyttöönotto

Ennen ohjausjärjestelmän käyttöönottoa laitteeseen kytketään ajoneuvosähköt eli 24 V:n tasavirtajärjestelmä. 24 V:n sähköjärjestelmälle ei suoriteta samanlaisia käyttöönottotarkastusmittauksia kuin korkeajännitteisille vaihtovirta- ja tasavirtajärjestelmille. Ennen 24 V -tasavirtajärjestelmän kytkemistä on kuitenkin tarkistettava resistanssi plus- ja miinusnapojen välisistä päävirtakytkennöistä. Mittauksella varmistetaan, että 24 V -akut eivät ole välittömässä oikosulussa ajoneuvoon kytkettäessä.

Laitteen ohjausjärjestelmänä käytetään Normetin kehittämää uudensukupolven NorSmart3-ohjausjärjestelmää. Ohjausjärjestelmä koostuu useista eri ohjausyksiköistä, jotka kytkeytyvät toisiinsa CAN-väylän välityksellä. Ohjausjärjestelmän käyttöönottoon ja testauksiin perehdyin hyvin rajatusti tässä työssä, sillä kyseessä on laaja käsite, josta keskityin vain sähköajoneuvon voimansiirron toiminnan kannalta tärkeisiin aihealueisiin.

Ohjausjärjestelmän kannalta tärkeitä tarkistettavia asioita ovat ohjausyksiköiden ohjelmistoversiot, parametrisoinnit ja lopulta niiden varmuuskopiointi. Sähköajoneuvon voimansiirtoon liittyvillä parametreilla pystytään säätämään ajoakkujen, latureiden ja sähkömoottoreiden toimintaa, jotka vaikuttavat merkittävästi laitteen haluttuun ja turvalliseen toimintaan. Näiden asetusten varmistamiseen voisi käyttää parametrilistaa, josta tarkistetaan laitetyyppi kohtaisesti parametrien arvot. Parametrilistaa ei laadittu tämän työn yhteydessä.

NorSmart3-ohjausjärjestelmän parametrisoinnin lisäksi laitteisiin sisältyy erilaisia proportionaaliventtiilien säätämiä, joita kalibroidaan ohjausjärjestelmän käyttöliittymällä ja laitteen käytöllä. Laitteen valmistuksen ja testausten jälkeen tallennetaan varmuuskopio asetetuista parametriarvoista Normetin käyttämään tuotetiedon hallintajärjestelmään.

6.2.4 Jäähdytysjärjestelmän käyttöönotto ja testaus

Jäähdytysjärjestelmän käyttöönotossa on tärkeää täyttää järjestelmä oikean tyyppisillä nesteillä ja määrillä, jotta järjestelmä toimii suunnitellun mukaisesti. Jäähdytysjärjestelmään täytetään jäähdytysyksikön öljy, kylmäaine ja jäähdytyspiirien jäähdytysnesteet. Erityisesti jäähdytyspiirien jäähdytysnesteiden tyyppeihin on kiinnitettävä huomiota, sillä laitteissa on omat jäähdytyspiirit ajoakuille ja te-

hoelektroniikalle. Ajoakkujen jäähdytyspiirissä on käytettävä turvallisuussyistä alhaisen sähkönjohtavuuden omaavaa jäähdytysnestettä. Tehoelektroniikan jäähdytykseen käytetään tavallista jäähdytysnestettä. Ajoakkujen jäähdytysnesteen alhaisella sähkönjohtavuudella varmistutaan, siitä että laite pysyy turvallisena tilanteessa, jossa ajoakut altistuvat ulkoiselle vauriolle ja jäähdytysneste pääsee vuotamaan ajoakkujen kennoihin. Jäähdytysnesteiden määrät on oltava riittävät, sillä liian vähäinen nesteen määrä vaurioittaa nesteiden kiertopumppuja.

Jäähdytysjärjestelmän jäähdytysteho testataan asettamalla ohjaamon ilmastointi ja ajoakkujen ja tehoelektroniikan jäähdytystoiminnot samanaikaisesti päälle. Koekäytön aikana seurataan molempien jäähdytyspiirien paineita, jotka eivät saa laskea käytön aikana. Ajoakkujen jäähdytysnesteestä otetaan näyte tuotannon loppuvaiheessa sähkönjohtavuuden varmistamiseksi. Näytteelle tehdään visuaalinen tarkastus mahdollisia värimuutoksia tarkkaillen ja sähkönjohtavuus todetaan erillisellä mittarilla. Jäähdytysnesteen sähkönjohtavuudelle asetettiin raja, joka ei saa ylittyä uusien laitteiden nesteen mittauksissa. Sähkönjohtavuuden korkea arvo voi kertoa järjestelmään sekoittuneista epäpuhtauksista.

6.2.5 Ajoakkujen turvallinen käyttöönotto ja kalibrointi

Normetin kaivossähköajoneuvoissa käytetään litiumionityypin ajoakkuja, jotka on kalibroitava laitteen käyttöönoton yhteydessä. Kalibrointi suoritetaan lataamalla ajoakut täyteen, kun akut on yhdistetty ajoneuvon ohjausjärjestelmään. Ennen kuin ajoakkuja ladataan täyteen, on testattava ajoakkujen lataukseen liittyvät turvatoiminnot. Näistä tärkeimpiä ovat vikatilanteisiin ja hätäseispysäytyksiin perustuvat toiminnot. Vikatilanteissa ja hätäseispainikkeen aktivoimisen tulee erottaa ajoakut erotuskontaktoreilla ajoneuvon sähköjärjestelmästä suojaten laitteen käyttäjät hätätilanteissa.

6.2.6 Ajosähkömoottoreiden kalibrointi

Ajosähkömoottoreiden kalibrointi on tärkeä vaihe sähköajoneuvon voimansiirron käyttöönotossa ja siksi kalibrointivaiheen ohjeiden tarpeellisuutta tuli myös selvittää. Ajosähkömoottorin kalibroinnissa kalibroidaan sähkömoottorin resolver, joka mittaa sähkömoottorin kierrosasteita.

Ennen kalibroinnin aloittamista on alustan hydrauliiikan oltava toimintakuntoinen jarrujärjestelmän osalta. Jarrujärjestelmän käyttöönotto on välttämätön ennen kalibroitua, koska ajomoottoreita ajetaan kalibroinnin aikana ja jarrut pitää pystyä vapauttamaan.

Resolverin kalibroinnin ohjeita oli aloitettu, ja ne olivat viimeistelyä vaille valmiit. Aloitettua ohjetta koekäytettiin kalibroituvaiheen suorittamiseen. Kokeilun jälkeen kävi ilmi, että kalibrointiin käytetyn ohjelmiston käyttöohjeet olivat puutteelliset. Kalibrointiin käytössä oleva ohjelmisto on ajosähkömoottorin valmistajan tarjoama ohjelmisto, jossa voidaan muuttaa ajosähkömoottorin parametreja ja signaalitietoja. Ohjetta viimeisteltiin lisäämällä ohjeeseen parametri- ja signaalitieto-valikkojen käytönopastusta.

6.2.7 Hydrauliiikka ja jarrujärjestelmä

Hydrauliiikan ollessa yksi turvatoimintoihin perustuva järjestelmä on se säädettävä, tarkastettava ja testattava oikein. Hydrauliiikasta säädetään alustan hydraulipumppu, jolla luodaan hätäseis-toiminnon ja laitteen käyttöpaine.

Osa hydrauliiikkajärjestelmän komponenteista tulee esisäädetyinä, joten niitä ei tarvitse erikseen säätää. Esisäädetyistä komponenteista tarkastetaan paineiden oikeellisuus mahdollisten komponenttinvirheiden löytämiseksi. Hydrauliiikkajärjestelmän paineet tarkastetaan painemittarilla ja laitteen ohjausjärjestelmän mittauksilla. Tällä varmistutaan siitä, että jarrujärjestelmän paineanturit on kalibroitu oikein.

6.2.8 Suojalukitukset

Vaaratilanteiden välttämiseksi laitteiden ohjauspiirit sisältävät suojalukituksia, joilla suojataan laitetta sekä laitteen käyttäjää ja ympäristöä. Suojalukitusten toiminnallisuuden varmistus on tuoteturvallisuuden ja laadunvarmistuksen kannalta tärkeä vaihe laitteiden toiminnallisissa testauksissa.

Laitteen käynnistäminen on estettävä turvatoiminnoilla ja suojausmenetelmillä niin, että käynnistys on mahdollista vain tilanteissa, joissa riskit vaaratilanteisiin ovat matalimmillaan. Vastaavasti myös laitteen jarrujenvapautuksenesto- ja hätäpysäytystoimintojen on toimittava suojaavina toimintoina niin, että ne pystyvät keskeyttämään laitteen toimintoja. Aktivoituneen hätäpysäytyksen kuittaus saa olla

mahdollista vain siltä laitteen käyttöpaikalta, jolta pysäytyskäsky aktivoitiin. Laite ei saa olla uudelleen käynnistettävissä, ennen kuin kaikki aktiiviset hätäpysäytyssignaalit on kuitattu. (SFS-EN60204, 46–47–48.)

Laitteen sähkönsyötön suojalukitusten pitää toimia tilanteissa, joissa sähköiskun vaara kasvaa. Näitä tilanteita voi syntyä sähkökeskusten ovien aukaisuista, viallisista komponenteista tai eristysresistanssi-
viasta. Eristysresistanssivian valvontaa varten sähköajoneuvot on varustettu eristysresistanssinvalvonta releellä, joka valvoo laitteen eristysresistanssitilaa. Kun eristysresistanssi alittaa asetetun rajan, valvonta rele aktivoi suojalukitukset sähkönsyötön erotusta varten. Valvontarele toiminta on testattava asettamalla vastus tasavirtapiiriin plus- ja miinuskiskojen välille. Ennen vastuksen asettamista on varmistettava, että ajoakut on erotettu kiskoista. Vastuksen resistanssin on oltava riittävän pieni, jotta valvontareleeseen asetettu alaraja alittuu. Toiminta on todettu, kun ajoneuvon ohjausjärjestelmä ilmoittaa eristysvastushäiriöstä. (SFS-EN60204, 47; UNECE R100, 25.)

Suojalukituksia on myös oltava erilaisten toimintarajojen yhteydessä, kuten nopeuksien, paineiden ja sijaintien valvonnassa (SFS-EN60204, 51). Jos jarrujärjestelmien paineet eivät ole normaalin käyttöpaineen tasolla tai jokin laitteen osa, kuten tukijalat eivät ole kuljetusasennossa, täytyy ajoneuvon ajo olla estettynä.

6.3 Käyttöönottotarkastuspöytäkirjan ja työohjeiden dokumentointi

Laitteelle tehdyistä tarkistuksista ja testauksista täytetään käyttöönottotarkastuspöytäkirja laadun valvomisen ja mahdollisten jälkiselvittelyiden tueksi. Käyttöönottotarkastuspöytäkirja sisältää dokumentoinnin kannalta tärkeitä tietoja, kuten käyttöön otetun laitteen sarjanumeron, tarkastuksen aloituspäivämäärän ja listan laitteelle tehdyistä tarkistuksista, mittauksista ja testauksista. Asettelin käyttöönottotarkastuspöytäkirjan sisällön laadunvarmistusprosessin mukaiseen järjestykseen, jotta pöytäkirja ohjeistaa käyttöönottajaa tekemään sähköajoneuvon käyttöönoton turvallisessa järjestyksessä (LIITE 3).

Käyttöönottotarkastuspöytäkirjan tueksi tehtiin yksityiskohtaisempia testausohjeita. Testausohjeiden tekoa varten perehdyttiin Normetin ohjemalleihin ja vaatimuksiin, jotta tiedettiin, mitä ohjeiden tulisi sisältää asiakirjana ja mitä turvallisuuteen liittyviä seikkoja tulisi aina työohjeissa nostaa esille.

Kaikkiin työohjeisiin suunniteltiin käytettäväksi samanlainen pohja, josta lukija löytää tärkeimmät avaintiedot ohjeesta dokumentoinnin ylläpitoa ja työtehtävän suorittamista varten. Dokumentoinnin kannalta tärkeitä asioita ovat dokumentointinumero ja versiohistoria. Versiohistoriasta käy ilmi, miksi ohjetta on milloinkin päivitetty ja kenen toimesta. Lisäksi ohjeen päivitykseen vaaditaan toiselta henkilöltä päivitetyn ohjeen tarkastus ja hyväksyntä.

Työtehtävän tehokkaan aloituksen tukemiseksi on työohjeessa oltava tehtävän suorittamiseen oleellisia tietoja. Työtehtävän suorittamiseen oleellisia tietoja ovat tarvittavat erikoistyökalut, apuvälineet ja henkilömäärä. Näiden lisäksi ohjeisiin otettiin ensimmäiseksi vaiheeksi tarkistaa turvallisuuteen liittyvät asiat ja esivalmistelut, jotka tulisi olla tehtynä ennen testauksen aloittamista.

Käyttöönottotarkastuspöytäkirja pohjalle, täytetyille pöytäkirjoille ja testaukseen käytettäville työohjeille oli suunniteltava toimiva ja jokaista osastoa palveleva dokumentointitapa. Käyttöönottotarkastuspöytäkirjan pohja tallennettiin tuotetiedon hallintajärjestelmään, josta se löytyy jokaisen osaston tarpeisiin. Testausohjeet tallennettiin yksittäisinä tiedostoina tuotetiedon hallintajärjestelmään, jotta niitä voidaan ylläpitää ja päivittää tarvittaessa helposti.

Käyttöönottotarkastuspöytäkirjaan lisättiin hyperlinkit työohjeisiin. Hyperlinkki avaa käyttöönotto- tai testausvaiheeseen liittyvän työohjeen tuotetiedon hallintajärjestelmästä. Tällä saatiin vähennettyä työohjeiden ylimääräiseen etsiskelyyn menevää aikaa tuotannossa ja varmistutaan siitä, että lukija saa ohjeen viimeisimmän version.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, mitä käyttöönottotarkistuksia ja testauksia pitää tehdä tuotannosta valmistuvalle kaivossähköajoneuvolle ja minkälaista dokumentointia niihin liittyen tarvitaan. Käyttöönottotarkistuksista ja testauksista oli tavoite luoda vakiintuva käyttöönottoprosessi kaivossähköajoneuvolle, jolla tehdään laadunvarmistus tuotteelle ja varmistetaan siitä, että tuotannon työntekijät ja loppukäyttäjät voivat ottaa laitteen käyttöön turvallisesti.

Opinnäytetyön alussa käsittelin sähköajoneuvotekniikkaa yleisellä tasolla. Tämän jälkeen käsittelin teoriaosassa sähköasennusten käyttöönottotarkistuksia sähköturvallisuuslain ja koneturvallisuuden standardin EN 60204 vaatimukset huomioiden. Sähköturvallisuuslaissa on määritelty, millä työkokemuksella ja koulutuksella katsotaan, että henkilö on sähköalan ammattihenkilö ja täten pätevä tekemään sähköasennusten käyttöönottotarkistuksia. Standardissa EN 60204 on ohjeistettu, miten sähkölaitteisto todennetaan vaatimusten mukaiseksi mittauksilla ja tarkistuksilla.

Teoriaosuuden jälkeen perehdyin Normetin laadunvarmistusprosessiin työskennellessäni osana laatuorganisaatiota. Käyttöönottoprosessin sisältöä ajatellen hankin syvällisempää tietoa akkukäyttöisistä kaivosajoneuvoista haastattelemalla Normetin tuotekehityksen suunnittelijoita ja protolaitteasentajia.

Laadunvarmistusprosessiin, teoriaosuuteen ja akkukäyttöisen kaivosajoneuvon tekniikkaan pohjautuen tehtiin käyttöönottoprosessi, joka soveltuu kaikille akkukäyttöisille kaivosajoneuvoilla laitetyypistä riippumatta. Laadun ja tuoteturvallisuuden varmistamisen tueksi ja dokumentointia varten tehtiin prosessille käyttöönottopöytäkirja, mittauspöytäkirjat ja työohjeet. Käyttöönottotarkastuspöytäkirja sisältää ajoneuvon käyttöönoton kaikki vaiheet järjestyksessä, millä varmistetaan turvallinen työjärjestys prosessissa. Kaikkia työvaiheita ei vielä dokumentoitu työohjeiksi tämän opinnäytetyön aikana, mutta puuttuvat ohjeet tullaan tekemään käyttöönottotarkastuspöytäkirjan tueksi.

Opinnäytetyön aihe oli mielenkiintoinen ja opettavainen. Sain arvokasta tietotaitoa kaivosajoneuvo- ja sähköajoneuvotekniikasta, niiden vaatimuksista työturvallisuuden kannalta ja valmistavan yrityksen laadunvarmistusprosessista. Mielestäni onnistuin työssäni hyvin, sillä käytin tiedonlähteinä monipuolisesti erilaisia lähteitä, kuten kirjallisuutta, standardeja, lakia ja alan asiantuntijoiden haastatteluita. Opinnäytetyön tavoitteisiin päästiin, ja työssä luotiin yrityksen tuotannolle vakiintuva käyttöönottoprosessi kaivossähköajoneuvoille, jota voidaan myös hyödyntää pohjatietona muidenkin yrityksen osastojen toimintaan.

Opinnäytetyön aikana tuli esille muutama jatkokehitysidea kaivoslaitteen laadunvarmistukseen. Laadunvarmistusprosessin kehitysideaat koskevat ohjausjärjestelmien parametrisointia ja sähköasennusten tarkastusta. Ohjausjärjestelmien parametrisoinnin laadunvarmistusta varten voisi suunnitella automatisoitua parametrien tarkistusta ja lisätä sen yhdeksi osaksi laitteen laadunvarmistusprosessia. Lisäksi sähköasennusten kytkentöjen lämpökuvauksen ja CAN-väylä yhteyden laadun tarkistuksen mahdollisuutta osana laadunvarmistusprosessia kannattaa tutkia.

LÄHTEET

- Alacoque, J. 2012. *Direct Eigen Control for Induction Machines and Synchronous Motors*. 1. painos. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/detail.action?docID=1048246>. Viitattu 11.1.2022.
- Barsukov, Y. & Qian J. 2013. *Battery Power Management for Portable Devices*. 1. painos. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/detail.action?docID=1455534>. Viitattu 5.12.2021.
- Ellis, G. 2012. *Control System Design Guide*. 4. painos. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/detail.action?docID=912192>. Viitattu 5.12.2021.
- IEC 61180-1. *High-Voltage Test Techniques for Low-Voltage Equipment Part 1: Definitions, Test and Procedure Requirements*. 2016. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto SFS.
- IEC/TR 61000-5-1. *Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC)*. 2012. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto SFS.
- Ikonix. 2022. *Guide to Electrical Safety Testing*. Saatavissa: <http://go.hipot.com/rs/414-IRJ-976/images/Guide-To-Electrical-Safety-Testing.pdf>. Viitattu 4.2.2022.
- ISO 7010. *Graphical symbols – Safety colours and safety signs – Registered safety signs*. 2019. Geneva: International Organization for Standardization
- Jiuchun, J. & Caiping, Z. 2015. *Fundamentals and Applications of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles*. 1. painos. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/detail.action?docID=1969030>. Viitattu 6.12.2021.
- Jufer, M. 2010. *Electric Drives Design Methodology*. 1. painos. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/reader.action?docID=1143526&ppg=1>. Viitattu 4.12.2021.
- Kauppila, J. 2018. *Rakennusten sähköasennusten tarkastukset*. 4. painos. Saatavissa: <https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.centria.fi/item/235?search=kiertosuunta>. Viitattu 7.11.2021.
- Larminie, J. & Lowry, J. 2012. *Electric vehicle Technology Explained*. 2. painos. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/detail.action?docID=952418&query=electric+vehicle+technology+explained>. Viitattu 10.11.2021.
- Liu, W. 2017. *Hybrid Electric Vehicle System Modelling and Control*. 2. painos. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/detail.action?docID=4791459>. Viitattu 2.1.2022.
- Metrel. 2021. *MI 3394 EU CE MultiTesterXA Instruction manual*.

- Mäkinen, M. 2020. *ST 53.12 Vikavirtasuojat*. Saatavissa: <https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.centria.fi/item/681?search=vikavirtasuoja>. Viitattu 7.11.2021.
- Normet. 2021. Saatavissa: <https://www.normet.com/>. Viitattu 28.10.2021.
- Perdontis, M. 2011. *Battery Manufacturing and Electric and Hybrid Vehicles*. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/detail.action?docID=3020555>. Viitattu 22.1.2022.
- Sarvela, J. 2008. *Kronologia*. Saatavissa: <http://www.jussisarvela.com/kronologia.html>. Viitattu 28.10.2021.
- SFS-6000-1. *Pienjännitesähköasennukset*. 2017. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto SFS.
- SFS-EN 60204-1. *Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset*. 2018. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto SFS.
- STT. 2005. *Työkoneiden valmistaja Normet uusille omistajille*. Saatavissa: <https://www.hs.fi/talous/art-2000004298584.html>. Viitattu 28.10.2021.
- Sähköturvallisuuslaki*. 16.12.2016/1135. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161135#L4P73>. Viitattu 15.11.2021.
- Tiainen, E. 2017. *D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista*. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/ekirjat/Open?id=88>. Viitattu 10.11.2021.
- Tukes. 2021. *Sähköasennusten käyttöönottovaiheen tarkastukset*. Saatavissa: <https://tukes.fi/sahko/sahkoasennusten-kayttoonottovaiheen-tarkastukset#d441778d>. Viitattu 15.11.2021.
- UNECE R100. *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train* 2021. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe UNECE.
- Weixiang, S. & Rui, X. 2019. *Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles*. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.centria.fi/lib/cop-ebooks/reader.action?docID=5630273&ppg=255>. Viitattu 6.12.2021.

(POISTETTU JULKISESTA VERSIOSTA)

(POISTETTU JULKISESTA VERSIOSTA)

(POISTETTU JULKISESTA VERSIOSTA)

(POISTETTU JULKISESTA VERSIOSTA)

(POISTETTU JULKISESTA VERSIOSTA)

(POISTETTU JULKISESTA VERSIOSTA)

(POISTETTU JULKISESTA VERSIOSTA)

(POISTETTU JULKISESTA VERSIOSTA)