

Joona Ruohoniemi

E-säännön 100 mittausten tutkiminen ja kehittäminen

Oy Testmill Ltd

Opinnäytetyö

Kevät 2019

SeAMK Tekniikka

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: SeAMK Tekniikka

Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Joonas Ruohoniemi

Työn nimi: E-säännön 100 mittausten tutkiminen ja kehittäminen

Ohjaaja: Jarno Arkko

Vuosi: 2019

Sivumäärä: 103

Liitteiden lukumäärä: 0

Maailmanlaajuinen jatkuva suuntautuminen kohti puhtaampaa ja päästöttömämpää liikennettä on jo pitkään aikaa ohjannut autonvalmistajia kehittämään vaihtoehtoisia polttoaineita ja niiden käyttöä sekä muita ratkaisuja ajoneuvojen käyttövoiman suhteen perinteisen polttomoottorin tilalle.

Tällä hetkellä suosituin vaihtoehtoinen voimanlähde polttomoottoreiden tilalle Suomessa on hybridijärjestelmä. Toisena vahvana vaihtoehtona polttomoottoreiden syrjäyttämiseen maassamme ovat täyssähköautot. Molemmissa näistä on korkeajännitteellä toimiva sähköinen voimalinja, joka luo ajoneuvoihin tietynlaisia turvallisuusriskejä. Näitä riskejä pyritään pienentämään muun muassa kansainvälisillä vaatimuksilla ajoneuvoja kohtaan, esimerkiksi vaatimuksilla korkeajännitejärjestelmän eristeiden ominaisuuksien osalta.

Työn tarkoituksena oli selvittää, ovatko toimeksiantajana toimivan akkreditoidun testauslaboratorion Oy Testmill Ltd:n mittauslaitteet sähkö- ja hybridiajoneuvojen korkeajännite-eristeiden eristysvastuksien mittaamiseen vaatimustenmukaisia, sekä määrittää mittausepävarmuus kyseisille mittauksille.

Työn aikana käydään läpi oleellista teoriatietoa sähkö- ja hybridiajoneuvoista, sähkötekniikasta sekä mittaustekniikasta, eritoten mittausepävarmuuden määrittämisestä. Toimeksiantajayrityksen tilasta työn aihealueen osalta työn aloittamishetkellä on tehty nykytila-analyysi vertailua varten.

Työ koostuu kokonaisuudessaan tästä raportista, johon saavutetut tulokset ovat kirjattu ylös niin, että ne olisivat mahdollisimman hyödyllisiä toimeksiantajan tulevissa töissä ja että tuloksia olisi myös mahdollisimman helppo käyttää toimeksiantajan tarpeiden mukaisesti tulevissa töissä.

Avainsanat: sähköajoneuvo, hybridiautot, mittaus, resistanssi, akkreditointi

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of technology

Degree programme: Mechanical Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Joonas Ruohoniemi

Title of thesis: Examining and developing of measurements of UNECE regulation No 100

Supervisor: Jarno Arkko

Year: 2019 Number of pages: 103 Number of appendices: 0

The constant worldwide orientation towards cleaner and more emission-free traffic has directed automotive industry for a long time already to develop alternative fuels, their use and other solutions for vehicle propulsion instead of conventional internal combustion engines.

At the moment the most popular alternative propulsion system in Finland is, instead of the internal combustion engine, a hybrid system. Another alternative propulsion system to consider for displacing internal combustion engines in Finland is full electric cars (Battery Electric Vehicles, BEV). In both systems there is an electric power line that uses a high-voltage electricity. The high-voltage system of hybrid and electric cars creates safety risks of a certain kind in these vehicles. The aim is to reduce these risks with international requirements for these kinds of vehicles, with requirements to the characteristics of insulation in the high-voltage system, for example.

The main task of the thesis was to clarify, if the principal company's measuring devices for measuring the insulation resistance of high-voltage insulators from hybrid and electric vehicles complied with the requirements set by the UNECE regulation number 100. Another task was to define the uncertainty of measurement for these kinds of insulation resistance measurements. The principal company of the thesis was Oy Testmill Ltd, an accredited testing laboratory. Their main business is all kinds of vehicles.

Essential theoretical information about hybrid and electric vehicles, electrical engineering and measurement technology was discussed in the thesis. In the beginning, a present state analysis was made for the principal company about their status in the area in which the thesis would focus on. The present state analysis was made for possible comparison purposes.

Keywords: electric vehicle, hybrid cars, measurement, resistance, accreditation

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	1
Thesis abstract.....	2
SISÄLTÖ	2
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo.....	5
Käytetyt termit ja lyhenteet	7
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Työn taustat	9
1.2 Työn tavoitteet	10
1.3 Yhteistyötahot	10
2 SÄHKÖ- JA HYBRIDIAJONEUVOT	12
2.1 Hybridiajoneuvot.....	12
2.1.1 Rinnakaishybridi.....	14
2.1.2 Sarjahybridi	16
2.1.3 Jaetun tehon hybridi	18
2.1.4 Hybridien luokitus sähköisen tehon perusteella.....	20
2.1.5 Hybridijärjestelmän edut ja heikkoudet.....	21
2.2 Sähköajoneuvot.....	22
2.2.1 Ladattavat hybridit.....	23
2.2.2 Täyssähköautot.....	24
2.3 Sähköinen voimansiirtojärjestelmä	26
2.4 Sähköiset energiavarastot	28
2.5 Suomalaiset sähköajoneuvot.....	31
3 SÄHKÖTEKNIikka	38
3.1 Sähkövaraus ja sähkövirta.....	39
3.2 Tasavirta ja vaihtovirta	42
3.3 Resistanssi ja konduktanssi.....	42
3.3.1 Lämpötilan vaikutus resistanssiin	44
3.3.2 Resistiivisyys ja konduktiivisuus	46
3.3.3 Johtimen resistanssi	47
3.4 Johteet, puolijohteet ja eristeet	47

3.5 Eristysvastuksen mittaaminen	49
3.6 E-säännön 100 mukainen eristysvastuksen mittaaminen	51
3.7 Akkutekniikka	56
4 MITTAUSTEKNIikka	61
4.1 Mittaustekniikan käsitteitä	61
4.2 Mittausepävarmuus ja mittausvirhe	63
4.2.1 Ympäristön olosuhteiden vaikutus mittauksiin	66
4.2.2 Mittausepävarmuus	67
5 NYKYTILA-ANALYYSI	81
6 TULOKSET	86
6.1 Sähkö- ja hybridi ajoneuvojen eristeisiin liittyvät vaatimukset	86
6.2 Mittausepävarmuuden määrittäminen eristysvastusmittauksessa	87
7 YHTEENVETO	99
LÄHTEET	100

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Jalasjärven Juustoportin sähköautojen latauspisteet. Valkoisen Teslan takana Fortumin pikalatauspiste	24
Kuva 2. Linkker-sähkölinja-auto	33
Kuva 3. Suomalainen Toroidion 1MW -konseptiauto.....	35
Kuva 4. Suomalainen RMK E2 -sähkömoottoripyörä	36
Kuvio 1. Arvojen (V_b), (V_1) ja (V_2) mittaaminen.....	53
Kuvio 2. Arvon (V_1) mittaaminen.....	54
Kuvio 3. Arvon (V_2') mittaaminen.....	55
Kuvio 4. Normaalijakauma.	71
Kuvio 5. Tasajakauma.	72
Kuvio 6. Esimerkki herkkyyškertoimesta.	77
Kuvio 7. Epävarmuustekijöiden neliöllinen summaus korostaa suurimpia epävarmuustekijöitä.....	79
Taulukko 1. Superkondensaattoreiden ominaisuuksia verrattuna tavallisiin lyijyakkuihin	30
Taulukko 2. Linkker-sähkölinja-auton tekniset tiedot	33
Taulukko 3. Fluke 1550C -eristysvastusmittarin tekniset tiedot	82
Taulukko 4. Fluke 1550C -eristysvastusmittarin mittaustarkkuudet.....	83
Taulukko 5. Metrel MI 3242 MicroOhm 2A tekniset ominaisuudet	84

Taulukko 6. Eristysvastusmittauksen esimerkkitapauksen tulokset taulukoituna. .97

Käytetyt termit ja lyhenteet

Eriste	Sähkövirran kulun sille tarkoituksettomaan paikkaan pääsyn estämiseen tarkoitettu, sähköä johtamattomasta materiaalista valmistettu osa.
Eristysvastus	Eristeen sähkövirran johtumista vastustava ominaisuus, jonka suure on ohmi (Ω).
Hybridiajoneuvo	Ajoneuvo, joka on varustettu kahdella eri käyttövoiman omaavalla voimanlähteellä, yleensä polttomoottorin sekä sähkömoottorin yhdistelmällä.
Korkeajännite	Jännitteen taso, joka on 60 V - 1500 V tasajännitettä tai 30 V - 1000 V vaihtojännitettä (RMS, tehollisarvo) (UNECE R100).
Mittausepävarmuus	Kuvaa mittaustuloksen vaihtelua ja ilmaisee, kuinka paljon mittaustulos tavallisessa tapauksessa enintään poikkeaa todellisesta arvosta. Mahdollistaa myös mittauksen jäljitettävyyden.
REESS-järjestelmä	Rechargeable Energy Storage System, ladattava energia- varastojärjestelmä. Ladattava energiavarasto, kuten akku, joka luovuttaa sähköenergiaa sähköiselle käyttövoimajärjestelmälle.
Sähköajoneuvo	Ajoneuvo, jossa käytetään ainoastaan sähköä käyttövoimana.
Sähköinen alusta	Sähköliitännöillä yhteen kytkettyjen johtavien osien muodostama kokonaisuus, jonka potentiaalia käytetään viitearvona. Tyypillisesti auton runko, joka on maadoitettu matalajänniteakulla (12 V).

1 JOHDANTO

Maailmanlaajuinen jatkuva suuntautuminen kohti puhtaampaa ja päästöttömämpää liikennettä on jo pitkän aikaa ohjannut autonvalmistajia kehittämään vaihtoehtoisia polttoaineita ja niiden käyttöä sekä muita ratkaisuja ajoneuvojen käyttövoiman suhteen perinteisen polttomoottorin tilalle.

Tällä hetkellä suosituin vaihtoehtoinen voimanlähde polttomoottoreiden tilalle Suomessa on hybridijärjestelmä (Autoalan Tiedotuskeskus 2018; Traficom 2019). Hybridiajoneuvoissa on edelleen useimmiten sähkömoottorin lisäksi polttomoottori. Siinä tapauksessa, kun perinteisen polttomoottorin lisäksi on sähkömoottori, pystytään polttomoottoria käyttämään vain kaikista parhaimmalla hyötysuhdealueella, jolloin taloudellisuus ja ympäristöystävällisyys paranevat. Myös pelkällä sähkövoimalla pystytään liikkumaan pieniä matkoja. (Hietalahti 2011, 3.)

Toisena vahvana vaihtoehtona polttomoottoreiden syrjäyttämiseen maassamme ovat täyssähköautot (Traficom 2019), jotka nimensä mukaisesti käyttävät ainoastaan sähköä käyttövoimanaan. Monet autonvalmistajat, jotka ovat tähän asti kehittäneet ainoastaan polttomoottoreita, ovat viime vuosien aikana alkaneet kehittää myös täysin sähköisellä voimalinjalla varustettuja ajoneuvoja polttomoottorikäyttöisten mallien rinnalle.

Vaihtoehtoiset käyttövoimat ovat varsin tuore ilmiö liikenteessä, mutta ne kasvattavat suosiotaan vauhdikkaasti, vaikkakin niiden kokonaismäärä on vielä vaatimaton (Liikennefakta 2018). Artikkelissa kerrotaan, että vuonna 2017 vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivista ensirekisteröidyistä henkilöautoista 88 % oli sähköä hyödyntävällä käyttövoimalla varustettu. Myös niiden määrän kehitys on ollut todella nopeaa, sillä pelkkiä täyssähköautoja ensirekisteröitiin vuonna 2008 vain 5 kappaletta ja vuonna 2017 jo 502 kappaletta.

Liikennefaktan (2018) mukaan vuonna 2017 uusia henkilöautoja ensirekisteröitiin 0,4 % vähemmän kuin edellisvuonna, mutta siitä huolimatta vaihtoehtoisten käyttövoimien ensirekisteröintimäärä kasvoi 117 prosentilla, toki vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimiviin ajoneuvoihin kuuluvat sähköajoneuvojen ja ladattavien hybridien li-

säksi myös kaasu- ja flexifuel-ajoneuvot. Artikkelista ilmeni, että kokonaisuudessaan vuonna 2017 vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivia henkilöautoja ensirekisteröitiin 3489 kappaletta, joista 433 kappaletta oli kaasukäyttöisiä henkilöautoja. Artikkelissa kerrotaan myös, että valmistajat eivät enää tarjoa malleihinsa flexifuel-vaihtoehtoa, joten niiden myynti käytännössä loppunut kokonaan.

1.1 Työn taustat

Koska useimmiten, kun ajoneuvossa on käytössä sähkömoottori auton liikuttamiseen, kyseinen järjestelmä toimii korkeajännitteisellä sähkövirralla. Korkeajännitteiset sähköpiirit tarvitsevat sitä vahvempia sähköeristeitä, mitä suuremmista jännite-tasoista on kyse. Eristeiden tehtävänä on pitää jännitteelliset osat siten eristettyinä, ettei jokin normaalisti jännitteetön komponentti tulisi jännitteelliseksi ja pahimmassa tapauksessa aiheuttaisi sähköiskua ihmiselle.

Tässä työssä tutkitaan edellä mainittujen eristeiden eristysvastusta, eli eristeiden kykyä vastustaa sähkövirran kulkua. Eristysvastuksen mittaamiseen on olemassa tarkoituksenmukaisia mittaustulokkeita. Koska työn toimeksiantajana on akkreditoitu testauslaboratorio, on myös mittaustapahtuman mittausepävarmuus määritettävä tarkasti, jotta voidaan antaa luotettavia, päteviä ja jäljitettäviä mittaustuloksia asiakkaille.

Mittausepävarmuuden määrittäminen toimii tässä työssä keskeisemmässä asemassa, sillä sen määrittäminen on tarkkaa ja monimutkaista laskentatyötä, missä pitää ottaa kaikki mittaustulokseen vaikuttavat tekijät huomioon ja määrittää niiden vaikutus mittaustapahtumaan ja -tuloksiin.

Yhdeksi työn tavoitteeksi kuuluu myös selvittää, onko työn toimeksiantajan laitteistot säädösten ja vaatimusten mukaisia eristysvastuksen mittaamista varten.

1.2 Työn tavoitteet

Tärkein ja ensisijainen tavoite tässä työssä on sähkö- ja hybridiajoneuvojen korkeajännitejärjestelmän eristeiden eristysvastusmittausten mittausepävarmuuden määrittäminen niin mittauslaitteistojen kuin itse mittaustapahtumankin osalta. Työhön kuuluu myös selvittää, täyttääkö yritykseen jo valmiiksi tähän tarkoitukseen hankitut mittauslaitteistot asetetut vaatimukset. Tavoitteena on myös selvittää, miten mittausympäristön olosuhteet vaikuttavat mittaustuloksiin ja miten ne on otettava huomioon jäljitettävän mittaustapahtuman suorittamiseksi.

Eräänä sivutuotteena työstä syntyy myös standardin SFS-EN ISO/IEC 17025:2005 vaatimaa jatkuvaa parannusta toimeksiantajayritykselle.

1.3 Yhteistyötahot

Opinnäytetyön toimeksiantajana ja tärkeimpänä yhteistyökumppanina toimii Oy Testmill Ltd, joka on akkreditoitu testauslaboratorio. Oy Testmill Ltd on suomalainen, Seinäjoella sijaitseva erityisesti ajoneuvoihin erikoistunut asiantuntijayritys, joka tuottaa testaus-, tarkastus- ja sertifiointipalveluita. Yrityksen asiakkaina on ajoneuvojen valmistajia, maahantuojia ja kauppiaita. (Saari 2019.)

Yrityksen toiminta on alkanut jo vuonna 2000 aputoiminimellä Testmill, ja nykyinen osakeyhtiö on perustettu vuonna 2013. Yritys työllistää neljä henkilöä. (Saari 2019.)

Tutkimuslaitoksena Oy Testmill Ltd on Saaren (2019) mukaan puolueeton ja riippumaton kolmas osapuoli. Oy Testmill Ltd on akkreditoitu testauslaboratorio T196, Suomen nimeämä ja ilmoittama tutkimuslaitos TL-0004 ja 17/S.

Tutkimuslaitos suorittaa Saaren (2019) mukaan muun muassa koko ajoneuvon tyyppihyväksyntöjä, monivaiheisia tyyppihyväksyntöjä sekä komponenttihyväksyntöjä. Oy Testmill Ltd on ollut mukana tutkimuslaitoksena noin 40:ssä koko ajoneuvon EY-tyyppihyväksyntäprosessissa.

Oy Testmill Ltd on hyväksytty asiantuntija HA-0002/HC-0002, joka suorittaa pien-sarjatyypin hyväksyntöjä ja antaa asiantuntijalausuntoja yksittäishyväksyntää ja katsastuksia varten kaikissa ajoneuvoluokissa. Yritys antaa vuosittain yli 2000 hyväksyttyä asiantuntijan lausuntoa (Saari 2019).

Yritys toimii myös Liikenne- ja viestintävirasto Traficom:n sopimuskumppanina, jonka kautta tehdään yksittäishyväksyntäpalveluita kaikille ajoneuvoluokille (Saari 2019).

Yrityksen muita testaus- ja asiantuntijapalveluita Saaren (2019) mukaan ovat

- staattiset ja dynaamiset kuormituskokeet
- venymäliuskamittaukset
- paineen, siirtymän, kiihtyvyyden ja äänenpaineen mittaukset ja testaukset
- koulutuspalvelut
- säädösseuranta.

Saaren (2019) mukaan yritys tekee myös ISO 9001- ja 14001 -järjestelmien sertifiointeja eri toimialoille, joita ovat muun muassa

- ajoneuvojen ja niiden osien valmistajat
- ajoneuvokauppa
- insinööripalvelut
- katsastustoiminta ja muu testaus
- koneiden ja laitteiden valmistajat
- metalliteollisuus.

2 SÄHKÖ- JA HYBRIDIAJONEUVOT

2.1 Hybridiajoneuvot

Hybridiajoneuvoilla tarkoitetaan ajoneuvoja, joissa on kaksi tai useampia erilaisia voimanlähteitä. Yleisimmin hybridiajoneuvot on varustettu kahdella voimanlähteellä: ensisijaisena voimanlähteenä on yleensä perinteinen polttomoottori ja toisena sähkömoottori tai -moottoreita energiavarastoineen. (Hietalahti 2011, 3.)

Hybridivoimansiirrossa polttomoottori on edelleen ajoneuvon tärkein voimanlähde, mutta sen heikkouksia pyritään vähentämään sähkömoottorin ja siihen kytketyn energiavaraston avulla. Energiaa voidaan hybridijärjestelmissä varastoida vauhtipyörien, superkondensaattoreiden tai kaikista yleisimmin akkujen avulla. Näiden energiavarastojen ja sähkömoottoreiden avulla hybridiajoneuvoissa pyritään tehostamaan polttomoottorin toimintaa paremman kokonaishyötysuhteen saavuttamiseksi. (Hietalahti 2011, 21.)

Ajoneuvon ottama keskimääräinen teho pyritään tuottamaan polttomoottorin avulla, jolloin polttomoottori saadaan asetettua toimimaan kaikista optimaalisimmalle hyötysuhdealueelle mahdollisimman tasaisesti. Energiavarastoon kytketyn sähkömoottorin avulla voidaan avustaa polttomoottoria erilaisissa kuormitustilojen vaihteluissa, kuten huippukuormituksessa ja jarrutusenergian talteenotossa. Tällöin polttomoottori voidaan mitoittaa tarvittua huipputehoa pienemmäksi, jolloin saavutetaan entistä taloudellisempaa ja ympäristöystävällisempää ajoa. (Hietalahti 2011, 21.)

Hybridijärjestelmän ajatus on yksinkertainen. Useimmat polttomoottorikäyttöiset ajoneuvot pystyvät tuottamaan paljon enemmän tehoa kuin mitä useimmiten normaaleissa ajo-olosuhteissa tarvitaan. Sähkömoottoreita käytetään tehostamaan polttomoottorin toimintaa niillä polttomoottorin pyörimisnopeus- ja kuormitusalueilla, jotka eivät ole polttomoottorin hyötysuhteen kannalta tehokkaimmillaan. Hybridijärjestelmässä voidaan käyttää suhteessa pienempää polttomoottoria verrattuna vastaavaan, tavanomaiseen polttomoottorikäyttöiseen ajoneuvoon, jolloin saavutetaan pienempi polttoaineenkulutus ja pakokaasupäästöt suorituskyvystä tinkimättä. Kun sähkömoottoria käytetään avustamaan polttomoottorin toimintaa ja polttomoottoria

pystytään käyttämään paremmin parhaimmalla hyötysuhdealueella, saavutetaan edelleen lisää parannettua polttoainetaloutta sekä vähennettyjä pakokaasupäästöjä. (Erjavec 2013, 116.)

Hybridiajoneuvojen voimansiirto pyritään useimmiten suunnittelemaan siten, että polttomoottoria saadaan käytettyä kaikista parhaalla hyötysuhdealueella, jolla saadaan parannettua ajoneuvon taloudellisuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Valmistajat valitsevatkin useasti portaattoman CVT (Continuously Variable Transmission) -vaihteiston hybridiajoneuvojen polttomoottorin voimansiirtojärjestelmäksi, jolla välitysuhteet saadaan tarkemmin säädettyä mahdollisimman lähelle polttomoottorin parasta hyötysuhdealuetta. (Erjavec 2013, 120.)

Hybridiajoneuvojen polttomoottoreiden apusähköjärjestelmät toimivat tyypillisesti edelleen perinteisellä 12 V tasajännitteellä, jossa akun negatiivinen napa kytketään ajoneuvon runkoon (Hietalahti 2011, 32). Apusähköjärjestelmän akun negatiivisen navan kytkemistä ajoneuvon runkoon kutsutaan sähköiseksi alustaksi (UNECE R100).

Hybridiajoneuvojen ajoakkujen jännitetaso on puolestaan ajoneuvon omaan apusähköjärjestelmään verrattuna huomattavasti korkeampi, tyypillisesti jopa satoja voltteja. Ajoakkujärjestelmän negatiivinen napa voidaan myös kytkeä ajoneuvon runkoon, mutta tällöin syntyy sähköturvallisuusriski, koska ajoakkujärjestelmä saattaa mahdollisesti kytkeytyä henkilöiden kautta ajoneuvon runkoon. Lisäksi järjestelmässä on ongelmia, mikäli järjestelmää on ladattava verkkovirralla; ajoneuvon maadoituksen nollapotentiaali eroaa verkkosyötöstä muodostetun tasajännitteen ns. negatiivisesta jännitteestä. Useimmiten ajoakkujärjestelmä on toteutettu kelluvana sähköisenä järjestelmänä, jossa myös ajoakkujärjestelmän negatiivinen napa on kaapeloitu ja eristetty, eikä kytketty ajoneuvon runkoon. Tämä järjestelmä on sähköturvallisuuden kannalta parempi vaihtoehto, ja lisäksi se helpottaa myös ajoakkujen lataamista verkkovirralla. (Hietalahti 2011, 32.)

Tällä hetkellä henkilöautomarkkinoiden laajin ja monipuolisin hybridimallisto on Toyotalla, jolla on Euroopan markkinoilla valittavana 15 erilaista hybridimallia, ja maailmanlaajuisesti 33. Vuonna 2016 joka kolmas myyty Toyota oli hybridi. (Toyota Suomi, [Viitattu 29.1.2019].)

Kaikki hybridiajoneuvot eivät ole kuitenkaan rakenteeltaan samanlaisia, vaan eroja on esimerkiksi sen suhteen, miten polttomoottorin tuottamaa liike-energiaa hyödynnetään ja kuinka isossa roolissa sähkömoottori energiavarastointeen järjestelmässä on. Hybridijärjestelmät jaetaan rinnakkais- ja sarjahybrideihin sekä niiden kummankin ominaisuuksia yhdistävään jaetun tehon hybridiin.

2.1.1 Rinnakaishybridi

Rinnakaishybridissä nimensä mukaisesti polttomoottori ja sähkömoottori ovat rinnakkain ja tuottavat mekaanista tehoa vetäville pyörille. Sähkömoottori avustaa polttomoottoria kiihdytyksissä sekä ottaa energiaa talteen jarrutuksissa ja ylimääräistä energiaa polttomoottorin alhaisilla kuormituksilla. (Hietalahti 2011, 24.)

Rinnakaishybridijärjestelmässä on pääsääntöisesti kaksi voimakonetta, yksi polttomoottori sekä yksi sähkömoottori, eikä järjestelmässä tarvita ylimääräisiä energiaa kuluttavia muunnoksia liike-energiasta sähköenergiaksi ja toisinpäin (Hietalahti 2011, 24).

Mikäli rinnakaishybridin energiavarasto mitoitetaan riittävän suureksi, pystytään poltto- ja sähkömoottorit mitoittamaan kokoluokkaa pienemmiksi kuin sarjahybridille, jolla on muuten sama suorituskyky (Hietalahti 2011, 24).

Rinnakaishybridijärjestelmien välillä on eroja sen suhteen, miten sähkömoottori ja voimansiirto ovat kytkettyinä. Sähkömoottorin mekaanisen kytkennän voi toteuttaa välityssuhteineen joko vaihteen tai hihna-/ketjuhammaspyörien avulla. Yleensä sähkömoottori sijoitetaan omalle akselilleen vaihteiston yhteyteen, ja molempien moottoreiden momentti yhdistetään mekaanisella momentintasaajalla. Toinen yleinen tapa on sijoittaa sähkömoottori polttomoottorin vauhtipyörän yhteyteen, jolloin kummatkin moottorit pyörivät aina samaan tahtiin. Mikäli sähkömoottorin ja polttomoottorin kummankin tuottama momentti viedään vaihteiston läpi eteenpäin voimansiirtojärjestelmään, on kyseessä etukytetty ratkaisu, eli ns. pretransmission. Posttransmission eli jälkikytketyssä ratkaisussa sähkömoottorin momentti ei mene lain-

kaan vaihteiston läpi, vaan kytkeytyy suoraan voimansiirtojärjestelmään. Sekä sähkömoottorilla että polttomoottorilla voi olla myös täysin omat vaihteistonsa. (Hietalahti 2011, 24–25.)

Rinnakkaishybridin voimansiirto voi olla toteutettuna myös niin, että eri voimanlähteet tuottavat tehoa eri akseleille. Esimerkiksi etupyöriä voi käyttää pelkästään polttomoottori ja takapyöriä sähkömoottori(t). Järjestelmän etuna on, että ajoneuvosta tulee luontaisesti nelivetoinen, eikä voimansiirtoon tarvita monimutkaisia ja kalliita järjestelmiä ja momentintasaajia, joilla polttomoottorin ja sähkömoottorin toiminta saadaan synkronoitua keskenään sopiviksi. Tällainen ratkaisu vie kuitenkin enemmän tilaa, mikä on puolestaan pois matkustustilojen ja tavaratilan koosta. (Khajepour, Fallah & Goodarzi 2014, 75.)

Tilaongelmaa voidaan kuitenkin korjata käyttämällä sähkömoottorin yhteydessä yksittäistä alennusvaihdetta isokokoisien moniportaisen vaihteiston sijasta tai sijoittamalla sähkömoottorit suoraan ajopyöriin. Ajopyöriin sijoitetut sähkömoottorit vaativat kuitenkin monimutkaisempaa ja kalliimpaa tekniikkaa, lisäksi ajoneuvon jousittamaton massa kasvaa huomattavasti, mikä ei ole ajoneuvon dynamiikan kannalta suotavaa. Ajopyörään sijoitetut sähkömoottorit vaativat myös suurien pitkittäis- ja poikittaiskuormien kestävyys sekä hyvää veden ym. epäpuhtauksien eristystä. Ajoakut latautuvat vain ajoneuvon ollessa liikkeellä, koska sähkö- ja polttomoottorin välillä ei ole enää mekaanista yhteyttä, joten ajoneuvon ollessa paikallaan tyhjäkäynnillä ajoakusto ei lataudu ollenkaan. (Khajepour ym. 2014, 53, 79.)

Rinnakkaishybridillä on mahdollista ajaa pelkän sähkömoottorin voimin kuten täyssähköautollakin. Polttomoottori lataa akkuja silloin, kun ajetaan vähän tehoa polttomoottorilta vaativissa tilanteissa, esimerkiksi maanteillä. Rinnakkaishybridi onkin hyötysuhteeltaan parempi maantiellä kuin kaupunkiajossa missä pysähdysten ja liikkeellelähtöjen määrä kasvaa. (Khajepour ym. 2014, 79.)

Rinnakkaishybridin yksi suurimmista haittapuolista järjestelmän ohjaamisen ja rakenteen monimutkaisuuden lisäksi on polttomoottorin mekaaninen kytkentä voimansiirtoon ja ajopyörille. Koska polttomoottori on mekaanisesti kytkettynä kuormalleen, ei polttomoottoria välttämättä voida käyttää vain yksinomaan kapealle, parhaan hyötysuhteen alueella. (Hietalahti 2011, 24.)

Hietalahti (2011, 24–25) esittää kuusi erilaista rinnakkaishybridin toimintatilaa, joissa poltto- ja sähkömoottorit toimivat keskenään:

- sähköinen toimintatila: ainoastaan sähkömoottorilla liikutetaan ajoneuvoa, polttomoottori on sammutettuna
- Polttomoottoritila: ainoastaan polttomoottorin voimin liikutetaan ajoneuvoa.
- Hybriditila: sähkö- ja polttomoottori molemmat tuottavat tehoa ajoneuvon liikuttamiseen.
- Jaetun tehon tila: polttomoottorilla ladataan energiavarastoa sekä liikutetaan ajoneuvoa, sähkömoottori toimii generaattorina.
- Paikallaan oltaessa: polttomoottorin käydessä ladataan energiavarastoa.
- Regeneratiivinen jarrutus: jarrutusenergiaa otetaan talteen sähkömoottorin toimiessa generaattorina jarrutustilanteissa.

Khajepour:n ym. (2014, 75) mukaan rinnakkaishybridijärjestelmä on suosituin järjestelmärakenne hybridiajoneuvoille.

2.1.2 Sarjahybridi

Erjavec:n (2013, 127) mukaan sarjahybridi on järjestelmä, jossa käytetään yhtä voimanlähdettä tuottamaan energiaa toiselle voimanlähteelle, yleensä siten, että polttomoottori pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköenergiaa sähköiselle ajomoottorille, joka lopuksi tuottaa tehoa ajopyörille.

Sarjahybridi tarvitsee siis aina erillisen sähkögeneraattorin ja -moottorin, eikä järjestelmässä polttomoottori ole enää mekaanisesti kytköksissä ajopyöriin. Polttomoottorin tehtävänä on tuottaa sähköenergiaa ajoakustolle ja sähkömoottorille sekä lämpöenergiaa, jolla mm. lämmitetään ohjaamo. Jarrutustilanteissa sähkömoottoria voidaan käyttää myös generaattorina ottamaan talteen jarrutusenergiaa ns. regeneratiivisessa jarrutuksessa. (Hietalahti 2011, 22.)

Koska polttomoottori ei ole mekaanisesti kytkettynä ajopyöriin, voidaan polttomoottori mitoittaa ja käyttää vain hyötysuhteeltaan kaikista optimaalisimmalla ja tehokkaimmalla alueella riippumatta kuorman pyörimisnopeudesta (Hietalahti 2011, 22).

Sähkömoottori on mitoitettava sarjahybridijärjestelmässä huomattavasti tehokkaammaksi rinnakkaishybridiin verrattuna, koska sähkömoottorin on tuotettava kaikki ajoneuvon liikuttamiseen tarvittava teho. Rinnakkaishybridissä puolestaan sähkömoottorin tarvitsee lähinnä vain tehostaa polttomoottorin toimintaa. Sarjahybridijärjestelmän sähkömoottori pystyy tuottamaan korkeaa vääntömomenttia laajalla pyörimisnopeusalueella portaattomasti, koska järjestelmässä ei välttämättä tarvita erillistä vaihteistoa sähkömoottorin ja ajopyörien välille. (Khajepour ym. 2014, 80.)

Sarjahybridissä siis polttomoottorin tuottama liike-energia muutetaan sähköenergiaksi ja taas takaisin liike-energiaksi. Useista energianmuunnoksista ja niistä aiheutuvista energiahäviöistä johtuen sarjahybridin hyötysuhde voi olla varsinkin pitkään tasaisella kuormitusalueella ajettaessa huonompi kuin tavanomaisella saman kokoisella polttomoottorilla varustetulla polttomoottoriautolla. Sarjahybridi on hyötysuhteeltaan tehokkaimmillaan kaupunkiajossa, jossa liikkeelle lähtöjen ja pysähdysten määrä kasvaa, koska jarruttaessa saadaan tehokkaasti talteen auton liike-energiaa regeneratiivisessa jarrutuksessa. (Khajepour ym. 2014, 80.)

Koska sarjahybridijärjestelmässä ajopyöriä käyttää vain sähkömoottorit, järjestelmän rakenne mahdollistaa ns. napamoottoreiden käytön, jolloin tilaa vieviä vetoakseleita ei enää tarvita (Khajepour ym. 2014, 80). Napamoottorit ovat ajoneuvon ajopyörien yhteyteen integroituja sähkömoottoreita, ks. luku 2.1.1.

Hietalahden (2011, 23) mukaan myös sarjahybridijärjestelmällä on toteutettavissa kuusi erilaista toimintatilaa:

- Ajo pelkästään sähköllä: sähkömoottorille syötetään energiaa ainoastaan energiavarastolta, polttomoottori on sammutettuna.
- Ajo polttomoottorilla: polttomoottori tuottaa generaattorin avulla kaiken sähkömoottorin tarvitseman tehon.
- Hybriditila: sähkömoottorille syötetään energiaa sekä polttomoottorin ja energiavaraston avulla.

- Jaetun tehon tila: sähkömoottorille ja energiavarastolle molemmille syötetään polttomoottori-generaattorin tuottamaa sähköenergiaa.
- Paikallaan oltaessa polttomoottori-generaattori lataa energiavarastoa.
- Regeneratiivinen jarrutus: jarrutusenergiaa otetaan talteen sähkömoottorin toimiessa generaattorina jarrutustilanteissa.

2.1.3 Jaetun tehon hybridi

Jaetun tehon hybridi, tai ns. sekahybridi, yhdistää sekä sarja- että rinnakkaishybridin parhaimpia ominaisuuksia. Jaetun tehon hybridi siis jakaa omanlaisen vaihteistonsa avulla polttomoottorin tuottamaa tehoa joko suoraan mekaanisesti ajopyörille kuten rinnakkaishybridi tai muuntaa polttomoottorin tuottaman liike-energian sähköenergiaksi, joka muutetaan takaisin liike-energiaksi sähköisen ajomoottorin avulla kuten sarjahybridissä. (Khajepour ym. 2014, 81–82.)

Tässä hybridijärjestelmässä käytetään useimmiten sähköisesti ohjattua portaatonta vaihteistoa (E-CVT, Electronically controlled Continuously Variable Transmission) yhdistämään polttomoottorin sekä sähkömoottorin tuottama teho ajopyörille, kuin myös ohjaamaan polttomoottorin tuottamaa tehoa generaattorille. Eri voimakoneiden yhdistämiseen käytetään planeettavaihteistoa, jolla saadaan toteutettua joko kahden sisääntuloakselin ja yhden ulostuloakselin yhdistelmä tai yhden sisääntuloakselin ja kahden ulostuloakselin yhdistelmä ajotilanteen ja -olosuhteiden luoman tarpeen mukaan. (Khajepour ym. 2014, 82.)

Hietalahden (2011, 27) mukaan sekahybridijärjestelmä muodostuu yleensä polttomoottorin, kahden sähkökoneen (sähköinen ajomoottori ja generaattori) sekä planeettavaihteiston yhdistelmästä. Yhdistelmä on fyysisesti toteutettu siten, että ajoneuvon polttomoottori on kytkettynä planeettavaihteiston planeetankannattimeen, ajomoottori kehäpyörään ja generaattori on kytketty aurinkopyörään. Tällaisella rakenneratkaisulla polttomoottorin pyörintänopeutta ja kuormitusta voidaan säätää generaattorin avulla, ja sähkömoottorilla voidaan avustaa polttomoottoria tuottamalla kuormalle lisämomenttia. Lisäksi järjestelmän kaksi sähkökonetta ja planeettavaihteisto toimivat portaattomana vaihteistona, jonka etuna on pyörimisnopeuden

ja vääntömomentin suhteen säädettävyys vapaasti, yleensä parhaalle polttomoottorin hyötysuhdealueelle.

Jaetun tehon hybridijärjestelmä voi olla joko polttomoottoripainotteinen tai sähköpainotteinen. Polttomoottoripainotteisessa jaetun tehon hybridin toiminnassa on paljon yhteistä rinnakkaishybridin kanssa, koska polttomoottori on tässä järjestelmässä enemmän aktiivisena, kun taas sähköpainotteinen jaetun tehon hybridi käyttää enemmän sähkömoottoria muistuttaen enemmän sarjahybridiiä. (Khajepour ym. 2014, 82.)

Khajepour ym. (2014, 82) esittävät, että jaetun tehon hybridijärjestelmän suurimpiin etuihin kuuluu ominaisuus, jolla polttomoottori voidaan mekaanisesti erottaa sähkömoottorista ja näin ollen saavutetaan enemmän joustavuutta voimanhallinnan suhteen. Tätä ominaisuutta käyttämällä voidaan kompensoida tavanomaisen polttomoottorin väännön puutetta alhaisemmilla pyörintänopeuksilla sähkömoottoria hyödyntämällä, kunnes polttomoottori saavuttaa optimaalisen kierrosalueen. Näin ollen jaetun tehon hybridissä polttomoottori on pienempi, joustamattomampi mutta suorituskykyisempi kuin tavanomaisessa polttomoottoriajoneuvossa.

Järjestelmän heikkoutena on monimutkainen ja siten myös kalliimpi rakenne. Järjestelmässä generaattori on myös mitoitettava vastaamaan polttomoottorin suurinta vääntömomenttia. Lisäksi järjestelmä luotettavuus on hieman heikempi kuin rinnakkaishybridijärjestelmällä, sillä generaattorin tai siihen liittyvän elektroniikan rikkoutessa koko voimansiirtojärjestelmä menettää toimintakykynsä, kun taas rinnakkaishybridin polttomoottori voi edelleen jatkaa toimintaansa siitä huolimatta, että voimansiirron sähköinen osa on rikkoutunut. (Hietalahti 2011, 27.)

2.1.4 Hybridien luokitus sähköisen tehon perusteella

Yleisesti ottaen hybridiajoneuvot jaotellaan aiemmin mainituilla tavoilla sen mukaan, miten poltto- ja sähkömoottori ovat kytköksissä toisiinsa sekä ajopyöriin. Hybridiajoneuvot voidaan kuitenkin luokitella myös sähköisten ominaisuuksiensa perusteella toimintaominaisuuksiensa ja maksimitehon mukaisesti kolmeen eri luokkaan: mikro-, kevyt- ja täyshybrideihin. Näistä kaksi ensimmäisenä mainittua perustuvat useimmiten rinnakkaishybridivoimansiirtoon, joskin tavallista pienemmässä järjestelmäkoossa. (Hietalahti 2011, 27.)

Mikrohybridijärjestelmässä sähkömoottoreilla ei tuoteta tehoa laisinkaan suoraan ajopyörille, vaan hybridiominaisuuksia järjestelmässä ovat ainoastaan ns. start-stop -ominaisuus sekä kyky jarrutusenergian talteenottoon eli regeneratiiviseen jarrutukseen (Khajepour ym. 2014, 73). Mikrohybridijärjestelmää ei tämän tarkemmin käsitellä tässä työssä, koska järjestelmä ei sisällä korkeajännitteistä akustoa virtapiireineen, mitä tämän työn aihe koskettaa.

Kevythybridijärjestelmän sähkömoottorin suurin tehtävä on pienentää polttomoottorin heikkouksia ja parantaa hyötysuhdetta silloin, kun polttomoottori ei käy parhaimmalla hyötysuhdealueella. Sähkömoottorilla tuotetaan lisätehoa ajopyörille, kun polttomoottori on huonolla hyötysuhdealueella. Kevythybrideillä ei kuitenkaan pysty ajamaan pelkästään sähkövoimalla, vaan sähkömoottori ainoastaan avustaa ja tehostaa polttomoottorin toimintaa. Kevythybridijärjestelmä sisältää yleisesti myös start-stop -ominaisuuden sekä regeneratiivisen jarrutusjärjestelmän. Kevythybridijärjestelmä perustuu useimmiten rinnakkaishybridirakenteeseen. Kevythybridijärjestelmässä sähkömoottori on useimmiten mitoitettu siten, että se pystyy tuottamaan noin 10 % polttomoottorin suurimmasta tehosta käytettäväksi ajopyörille. (Khajepour ym. 2014, 73–74.)

Täyshybridin sähköinen ajojärjestelmä on selvästi aiemmin mainittuja tehokkaampi, sillä täyshybridijärjestelmän sähkömoottori mitoitetaan siten, että se pystyy tuottamaan vähintään 40 % polttomoottorin maksimitehosta. Täyshybridijärjestelmän ajoakusto ja sähkömoottori ovat suhteessa niin isoja, että ne mahdollistavat enemmän joustavuutta polttomoottorin mitoittamiseen. Toisin sanoen suurempien ajoakustojen ja sähkömoottorin ansiosta polttomoottorin koon supistaminen eli ns. downsizing

on mahdollista ilman, että ajoneuvon suorituskyky juurikaan kärsii, mutta kuitenkin ajoneuvon polttoainetaloudellisuus ja päästöt paranevat selvästi. Täyshybridiajoneuvolla on myös mahdollista ajaa pelkästään sähkövoimalla. (Khajepour ym. 2014, 74.)

2.1.5 Hybridijärjestelmän edut ja heikkoudet

Yksi merkittävimmistä hybridijärjestelmän eduista polttomoottoriajoneuvoihin verrattuna on jarrutusenergian talteenotto, jota kutsutaan myös regeneratiiviseksi jarruttamiseksi. (Hietalahti 2011, 3). Hybridiajoneuvojen sähkömoottoreita pystytään käyttämään siis generaattoreina jarrutusilanteissa, jolloin muutoin hukkaan menevä jarrutusenergia saadaan otettua talteen ja muutettua sähköenergiaksi eli regeneroitua, jolla voidaan ladata ajoneuvon energiavarastoa ja käyttää mm. sähköistä ajomoottoria. Tavallisessa polttomoottoriajoneuvossa jarrutusilanteessa ajoneuvon liike-energia muutetaan lämmöksi, joka menee käytännössä hukkaan. (Erjavec 2013, 122.)

Hietalahden (2011, 3) mukaan hybridivoimansiirrolla saadaan vähennettyä ajoneuvojen polttoaineen kulutusta ja päästöjä, sekä parannettua turvallisuutta, ajettavuutta ja ajomukavuutta. Kaksi jälkimmäisenä mainittua lienevät kuitenkin olevan kiinni ajajan mieltymyksistä ja tottumuksista.

Liu (2017, 3) puolestaan kirjoittaa, että tavanomaiseen polttomoottoriajoneuvoon verrattuna kevythybrideillä saavutetaan 15 - 20 % parempi polttoainetaloudellisuus, ja täyshybrideillä puolestaan jopa 40 % parempi polttoainetaloudellisuus kaupunkiajossa, jossa hybridijärjestelmät useimmiten saavuttavat parhaan hyötysuhteensa.

Khajepour ym. (2014, 72) esittävät, että tavanomaisiin polttomoottoriajoneuvoihin verrattuna polttoainetalouden ja päästöarvojen paranemisen lisäksi hybridiajoneuvojen toiminta- ja ylläpitokustannukset ovat pienemmät, moottorin ja jarrujen elinikä pitenee optimaalisemman käytön myötä sekä ajoneuvon tuottama melusaaste vähenee.

Hybridijärjestelmän avulla voidaan ajoneuvon polttomoottori mitoittaa huomattavasti pienemmäksi kuin tavanomaisessa polttomoottoriajoneuvossa ja siltikin ajoneuvon suorituskyky pysyy samalla tasolla polttomoottoriajoneuvon kanssa. Koska polttomoottori pystytään alimitoittamaan, paranee ajoneuvon polttoainetaloudellisuus sekä pakokaasupäästöt ilman, että suorituskyvystä joudutaan tinkimään. (Khajepour ym. 2014, 74.)

Hybridijärjestelmien heikkoutena on voimansiirtojärjestelmän monimutkainen ja sen myötä myös tavanomaista polttomoottoriajoneuvoa kalliimpi voimansiirtojärjestelmän rakenne. Hybridiajoneuvojen hintaa nostavat myös kalliit ajoakustot, joiden hinta nousee myös sähköisen tehon mukana sitä mukaa, mitä isompia akustoja käytetään. Ajoakustot ovat myös huomattavan painavia, mikä lisää huomattavasti ajoneuvon painoa sekä myös hieman heikentää suorituskykyä. (Khajepour ym. 2014, 74.)

2.2 Sähköajoneuvot

Vaihtoehtoiset käyttövoimat ovat varsin tuore ilmiö liikenteessä, mutta kasvattavat suosiotaan vauhdikkaasti, vaikkakin niiden kokonaismäärä on vielä vaatimaton (Liikennefakta 2018). Muun maailman kehityssuunnasta poiketen Suomessa sähköajoneuvojen määrän kasvu painottuu ladattaviin hybrideihin, kun muualla maailmassa täyssähköautot ovat suosituimpi vaihtoehto (Vesa 2018). Artikkelin mukaan kaikista sähköä hyödyntävistä henkilöautoista vain 16 % on täyssähköautoja Suomessa, kun muualla maailmassa määrä on noin 60 %.

Täyssähköautojen yleistymistä Suomessa hidastaa Vesan (2018) mukaan heikko saatavuus pitkin toimitusaikoinen sekä vielä ainakin toistaiseksi myös mallikirjon suppeus. Ladattavien hybridien suosio selittyy artikkelin mukaan nopeammilla toimitusajoilla, huomattavasti laajemmilla mallistoilla sekä pidemmällä toimintasäteillä.

Täyssähköautojen lisäksi myös ladattavat hybridiajoneuvot käsitellään tässä kappaleessa, sillä tilastoissa ladattavat hybridiajoneuvot luokitellaan myös sähköajoneuvoiksi täyssähköajoneuvojen lisäksi siitakin huolimatta, että ne ovat varustettu sähkömoottorin lisäksi myös polttomoottorilla.

2.2.1 Ladattavat hybridit

Ladattavat hybridit (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV) ovat sähköajoneuvoiksi luokiteltavia ajoneuvoja, joissa yhdistyy täyshybridi- ja täyssähköajoneuvojen ominaisuuksia. Ladattavan hybridin akustoa voi ladata ulkoisesta energianlähteestä, suoraan verkkovirralla tai sähköajoneuvojen latauspisteessä. Kuten tavanomainen hybridikin, myös ladattava hybridi on varustettu polttomoottorilla. Useimmiten ladattavan hybridin järjestelmärakenteena on sarja- tai jaetun tehon hybridijärjestelmä. Polttomoottoria käytetään siis useimmiten vain tuottamaan sähköenergiaa ajomoottorille sekä sen energiavarastolle. (Khajepour ym. 2014, 85.)

Ladattavat hybridit pyrkivät ensisijaisesti toimimaan ainoastaan sähköä avulla, jolla saavutetaan 30 - 90 kilometrin toimintasäde. Kun ajoakuston varaus laskee tietylle tasolle, ajoneuvon polttomoottori käynnistyy varaamaan ajoakustoa ja/tai tuottamaan tehoa ajopyörille. Myös ladattavat hybriditkin, kuten muutkin hybridit, mahdollistavat jarrutusenergian talteenoton regeneratiivisessa jarrutuksessa. (Liu 2017, 4.)

Ladattavien hybridien etuihin kuuluu vähäisempi riippuvuus latausverkostosta sekä laajempi kokonaistoimintasäde polttomoottorin ansiosta täyssähköautoihin verrattuna, mutta ovat kuitenkin vähemmän riippuvaisia polttoaineesta, kuin tavanomaiset polttomoottoriajoneuvot. Ladattavilla hybrideillä voi hetkellisesti ajaa täysin pako-kaasupäästöttömästi ajoakuston kapasiteetin antaman toimintasäteen puitteissa. Koska ladattavat hybridit ovat varustettu pienemmällä akustolla kuin täyssähköajoneuvot, ovat ne myös halvempia hankintahinnaltaan, vaikka niissä on akuston lisäksi myös polttomoottori. (Khajepour ym. 2014, 86.)

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom:n tilastokannasta (2019) käy ilmi, että 31.12.2018 oli liikennekäytössä olevia ladattavia hybridiautoja yhteensä 13095 kappaletta. Ylivoimaisesti suurin osa tästä määrästä on ottomoottorin ja sähkömoottorin yhdistäviä ladattavia hybrideitä, kaikkiaan 12061 kappaletta. Jäljelle jäävät 1034 kappaletta ovat puolestaan dieselmootorin ja sähkömoottorin omaavia ladattavia hybrideitä.

Vuoden 2018 kolmatta kvartaalia edeltävän vuoden aikana ladattavien hybridien määrä kasvoi jopa 146 % (Karsimus 2018, 2).

2.2.2 Täyssähköautot

Kaikessa yksinkertaisuudessaan täyssähköautot ovat pelkästään sähköenergialla liikkuvia autoja, jotka sisältävät yhden tai useamman sähkömoottorin auton liikuttamiseen sekä energiavaraston (akun), johon sähköenergiaa varastoidaan. Sähköisen energiavaraston avulla toimivat kaikki autot toimilaitteet. Täyssähköautojen energijärjestelmä ladataan ulkoisen energialähteen avulla, esimerkiksi kotona verkkovirralla tai matkan varrella sähköajoneuvojen latauspisteellä (kuva 1). (Khajepour ym. 2014, 48.)

Monilta huoltoasemilta ympäri Suomen löytyykin jo sähköautoille tarkoitettuja latauspisteitä, esimerkiksi Jalasjärvellä sijaitsevalla Juustoportilla (kuva 1), josta löytyy peräti 8 Teslan Supercharger -latausasemaa sekä Fortumin pikalatauspiste, jossa pystyy ladata muitakin sähköautoja. Lisäksi Juustoportti (2017) kertoo julkaisussaan, että se aikoo rakentaa omia helppokäyttöisiä latauspisteitä ladattaville hybrideille ja tarjoaa latauspalvelua aluksi ilmaiseksi.



Kuva 1. Jalasjärven Juustoportin sähköautojen latauspisteet. Valkoisen Teslan takana Fortumin pikalatauspiste. (Juustoportti 2017.)

Täyssähköautot ovat myös kykeneväisiä regeneratiiviseen jarrutukseen, jonka avulla akustoa voidaan ladata. Lisäksi täyssähköautoissa voi olla myös esimerkiksi aurinkopaneeleja, joilla varataan akustoa. (Khajepour ym. 2014, 48.)

Täyssähköautot kykenevät käytön aikana täysin päästöttömään ajoon, koska energiaa ei tuoteta polttoainetta polttamalla kuten tavanomaisissa autoissa, vaan energia saadaan energiavarastosta, johon energiaa on etukäteen ladattu, sekä ajon aikaisista latausjärjestelmistä, muun muassa aurinkopaneeleiden ja regeneratiivisen jarrutuksen avulla. On kuitenkin otettava huomioon, että kokonaisuudessa täyssähköauton käytöstä voi syntyä kasvihuonepäästöjä siitä riippuen, miten energiavarastoon syötetty sähköenergia on tuotettu. Uusiutuville energiamuodoilla tuotettu sähkö voi olla täysin päästötöntä, mutta esimerkiksi kivihiilellä tuotettu sähkö synnyttääkin kasvihuonepäästöjä. (Khajepour ym. 2014, 48.)

Khajepour ym. (2014, 48) kertovat kuitenkin, että vaikka täyssähköautoa ladattaisiinkin sähköenergialla, joka on tuotettu kivihiiltä polttamalla, on sen hiilidioksidipäästöt kolmanneksesta jopa puoleen pienemmät kuin tavanomaisella polttomootoriautolla. Lisäksi kerrotaan, että täyssähköautolla saavutetaan vähintään 75 %:n energiatehokkuus, kun tavanomaisella polttomootoriautolla energiatehokkuus voi olla huonoimmillaan vain 15 %.

Täyssähköautot ovat kustannustehokkaampia ylläpitää kuin tavanomaiset polttomootoriautot, sillä niissä on huomattavasti vähemmän mekaanisia liikkuvia osia ja sitä myötä myös vähemmän jatkuvaa voitelua tarvitsevia osia, eikä niissä myöskään tarvita kalliita pakokaasujen hallintajärjestelmiä. Sähkö on myös halvempaa kuin polttoaine. (Khajepour ym. 2014, 48.)

Täyssähköautojen heikkouksia ovat akkujen huonompi energiatiheys nestemäisiin polttoaineisiin verrattuna ja sen myötä lyhyempi käyttösaide yhdellä latauksella kuin polttomootoriautolla yhdellä tankillisella polttoainetta, sekä akustojen latausaika; 4 - 8 tuntia kotona ja vähintään 30 minuuttia latauspisteellä. Etenkin jos autoa joutuu lataamaan kesken matkan, voi matkan kesto pitkittyä reilusti. Ajoakusto myös painaa runsaasti, mikä heikentää auton energiatehokkuutta, ja lisäksi akustot ovat myös erittäin kalliita, mikä lisää täyssähköautojen hankintahintaa tuntuvasti. (Khajepour ym. 2014, 48–49.)

Täyssähköautoja oli liikennekäytössä 31.12.2018 kaikkiaan 2404 kappaletta, ilmenee Liikenne- ja viestintävirasto Traficomien tilastokannasta (2019). Edellisvuoden täyssähköautokantaan verrattuna täyssähköautojen määrä nousi noin 64 % (Karsimus 2018, 2).

Hietalahden (2011, 3) mukaan täyssähköautot ovat odottaneet tulemistaan jo vuosikymmeniä. Hän pitää erittäin todennäköisenä, että kun täyssähköautot lyövät toden teolla läpi, yleistyvät ne katukuvassa hyvinkin nopeasti.

Täyssähköauton järjestelmän pääkomponentit ovat kaasupoljinyksikkö, sähkömoottorien ohjainlaitteet/-järjestelmät, akusto sekä sähköiset ajomoottorit (Khajepour ym. 2014, 48).

2.3 Sähköinen voimansiirtojärjestelmä

Sähköinen voimansiirtojärjestelmä hyödyntää saman tyyppisiä komponentteja kuin hybridijärjestelmä käyttää omassa sähköisessä tehonsiirroksaan. Voimansiirtojärjestelmä sähköisessä voimansiirroksaan on mahdollista rakentaa sähköisten toimilaitteiden ominaisuuksia optimoiden. Järjestelmässä on sähköinen energiavarasto ja sähkömoottori(t), joiden avulla sähköenergia muutetaan autoa liikuttavaksi mekaaniseksi liike-energiaksi, pyörimisliikkeeksi. (Hietalahti 2011, 29.)

Sähköinen voimansiirtojärjestelmä sisältää elektronisia sekä mekaanisia moduuleita. Elektronisiin moduuleihin sisältyy alijärjestelmiä, kuten sähköiset ajomoottorit, energiavarastot (akut, kondensaattorit ja vauhtipyörät), sekä tehoelektroniikkaa sähkömoottoreiden ja energiavarastojen välillä, kuten latausohjaimet, invertterit ja muuntimet. Mekaanisiin moduuleihin kuuluu vaihteisto ja tasauspyörästö, mikäli ajoneuvo on sellaisilla varustettu, sekä itse ajopyörät. (Khajepour ym. 2014, 49.)

Sähköisiä voimansiirtojärjestelmiä on kahta erilaista sen mukaan, miten vääntömomentti ajopyörille välitetään. Yksinkertaisimmillaan sähkömoottorit pyörittävät suoraan ajopyöriä ilman minkäänlaista vaihteistoa, tai sähkömoottorit saattavat olla integroituna ajopyöriin, jolloin edes vetoakseleita ei tarvita. Voimansiirtojärjestelmä sähköajoneuvoissa on voitu toteuttaa myös kuten tavanomaisissa ajoneuvoissa, jossa sähkömoottorin momentti ohjataan kytkimen tai momentinmuuntimen kautta

vaihteistoon ja eteenpäin vetopyörästöille ja -akseleille. Tällainen ratkaisu tuo kuitenkin järjestelmään ylimääräistä monimutkaisuutta, painoa ja lisäkustannuksia. Lisäksi ajoneuvon kokonaishyötysuhde saattaa heikentyä, kun voimansiirrossa on enemmän komponentteja, joilla jokaisella on omat hyötysuhteensa ja tehohäviönsä. (Khajepour ym. 2014, 50–51.)

Liittämällä sähkömoottorit tuottamaan momenttia suoraan ajopyörille ilman vaihteistoja saavutetaan enemmän joustavuutta sähkövoimajärjestelmästä. Ilman vaihteistoa toteutettu järjestelmä on myös huomattavasti helpommin muutettavissa neliveitoseksi järjestelmäksi kuin tavanomaisen auton kaltaisella voimansiirrolla varustettu auto, joka voi olla saatavilla lisävarusteena sähkö- ja hybridautoihin. (Khajepour ym. 2014, 51.)

Sähkökoneiden ohjainlaitteet. Sähkö- ja hybridaajoneuvojen sähkökoneiden tehoa ohjataan tehoelektroniikalla toteutetuilla ohjainlaitteilla. Tehoelektroniikkalaitteistolla muutetaan sähköistä jännite- ja virtatasoja sekä taajuutta, ja näistä laitteistoista käytetään nimitystä suuntaajat. Sähkökoneiden ohjainlaitteina käytettävät suuntaajat ovat tehoelektroniikan peruskytkeäjä. (Hietalahti 2011, 63.) Hänen mukaan suuntaajien tehtävät ovat

- muuntaa vaihtojännite tasajännitteeksi (tasasuuntaaja, AC-DC -muunnin)
- muuntaa tasajännite vaihtojännitteeksi halutulla taajuudella (vaihtosuuntaajat, ns. invertterit)
- muuntaa vaihtojännitteen taajuutta (toistosuuntaajat, AC-AC -muunnin)
- muuntaa tasajännitteen jännite- tai virtatasoa (hakkuritehonlähteet, DC-DC -muunnin)

Samaa suuntauslaitetta pystytään käyttämään tilanteen mukaan sekä tasasuuntaajana että vaihtosuuntaajana. Suuntaajien primäärinen tehtävä sähkö- ja hybridaajoneuvoissa on ohjata tasavirta- ja vaihtomoottoreita, eli säätää niiden pyörimisnopeutta, tehoa ja vääntöä. Suuntaajat koostuvat tehopuolihoiteista, ja tärkeimpiä näistä ovat piidiodit, tehotransistorit ja tyristorit. (Hietalahti 2011, 63.)

2.4 Sähköiset energiavarastot

Ajoneuvokäytössä energiavarastoilta vaaditaan hyvää tehopainosuhdetta, tarpeeksi pitkää elinikää, turvallista toimintaa sekä kustannustehokasta hintaa. Tutkituimmat ja potentiaalisimmat energiavarastotyypit ovat erilaiset sähkökemialliset akut, joita käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.7, sekä superkondensaattorit ja vauhtipyörät. Sähköisiltä energiavarastoilta vaaditaan myös tehokkuutta, sillä hybridivoimansiirron suorituskyvyn tulee olla verrattavissa polttomoottorikäyttöisen ajoneuvon suorituskykyyn. Näitä suorituskykyvaatimuksia ovat muun muassa kiihtyvyys, nousukyky, toimintasäde sekä huippunopeus. Vaatimukseen kuuluvat myös toimintavarmuus raskaissa olosuhteissa. (Hietalahti 2011, 91.)

Energiavaraston elinikää voidaan ilmoittaa käyttökertaikänä tai vuosissa. Käyttökertaikä eli lataussyklien määrä kertoo, kuinka monta kertaa energiavarasto voidaan purkaa ja uudelleen ladata elinikänsä aikana. Käyttökertaiän ilmoittamisessa käytettävä lukumäärä koostuu syvä-purkaussykleistä, jolloin yhden syklin aikana energiavaraston kapasiteetista käytetään noin 80 %. (Hietalahti 2011, 92.)

Sekä akku- että superkondensaattorijärjestelmät koostuvat lähes poikkeuksetta monesta vakiojännitteisestä akkukennosta tai superkondensaattoriyksiköstä. Koko järjestelmän jännitetasoa saadaan nostettua, kun yksittäisiä akkukennoja tai superkondensaattoriyksiköitä kytketään sarjaan, jolloin koko sarjakytkentä on sen tasoinen, kuin sen heikoin osa. Järjestelmän akkukennot tai superkondensaattoriyksiköt tulisi aina olla samankokoisia keskenään, sillä järjestelmän pienimmän kapasiteetin omaava osa tulee ladattaessa täyteen ensimmäisenä, jolloin muut jäävät alivara-etuiksi, mutta jos latausta jatketaan, järjestelmän pienimmän kapasiteetin osa ylilatautuu ja tämän seurauksena sen elinikä lyhenee merkittävästi. (Hietalahti 2011, 92.)

Energiavaraston yhteyteen voidaan kuitenkin kytkeä valvontayksikkö, jolla pystytään mahdollistamaan kapasiteetiltaan erikokoisten akkukennojen tai superkondensaattoriyksiköiden käyttö samassa järjestelmässä, jolloin jokaista yksikköä voidaan ladata ja purkaa niiden omien ominaisuuksiensa mukaan. (Hietalahti 2011, 93.)

Superkondensaattorit. Superkondensaattorin luokitellaan eri luokkaan kuin tavanomaiset kondensaattorit, koska ne sijoittuvat ominaisuuksiltaan akkujen ja tavanomaisten kondensaattoreiden välille. Tavanomaisen kondensaattorin parempia puolia superkondensaattoreihin verrattuna ovat parempi jännitteen- ja virrankesto, mutta puolestaan superkondensaattoreiden kapasiteetin suuruutta ilmaiseva kapasitanssi on tavanomaisiin kondensaattoreihin verrattuna hyvinkin suuri. Kapasitanssin suuretunnus on (C) ja mittayksikkönä on faradi (F). Superkondensaattorit ovat myös suhteellisen tuore keksintö, sillä niitä on ollut saatavilla kaupallisesti viimeisen vuosikymmenen ajan. (Hietalahti 2011, 106.)

Superkondensaattori muodostuu kahdesta elektrodista, joiden välillä on eristemateriaalia, sekä elektrolyytinestettä. Elektrodien materiaalina käytetään huokoista aktiivihäilyä, joka on sijoitettu alumiinikalvojen päälle. Superkondensaattoria ladatessa elektrodit varautuvat, elektrolyytin positiiviset ionit (ks. kappale 3) kulkevat kondensaattorin negatiiviselle elektrodille ja negatiiviset ionit puolestaan kulkevat positiiviselle elektrodille. Superkondensaattoreiden erittäin suuri kapasitanssi (jopa 4000 F) johtuu elektrodien suuresta pinta-alasta sekä varausten välisistä lyhyistä etäisyyksistä. (Hietalahti 2011, 106.)

Taulukossa 1 on vertailtu superkondensaattoreiden ominaisuuksia perinteisiin lyijyakkuihin. Superkondensaattoreiden suurimpia etuja ovat suuri tehotiheys, huomattava syväpurkaussyklien lukumäärä sekä hyvin lyhyt lataus- ja purkausaika. Superkondensaattoreilla on myös hyvin pitkä elinikä, arviolta noin kymmenen vuotta. Mikäli superkondensaattorin täyteen varatun kennon kapasitanssi laskee 20 - 30 % tai kun sen sisäinen resistanssi kaksinkertaistuu, katsotaan superkondensaattorin olevan elinkaarensa lopussa. (Hietalahti 2011, 107.)

Taulukko 1. Superkondensaattoreiden ominaisuuksia verrattuna tavallisiin lyijyakuihin (Hietalahti 2011, 107).

	Superkondensaattori	Lyijyakku
Purkausaika	1 - 30 s	0,3 - 3 h
Latausaika	1 - 30 s	1 - 5 h
Energiatiheys (Wh/kg)	1 - 11	20 - 100
Tehotiheys (W/kg)	1000 - 10 000	50 - 200
Lataus/purkaushyötysuhde	0,90 - 0,95	0,70 - 0,85
Käyttölämpötila	-40 °C - +70 °C	-20 °C - +60 °C
Lataussyklien lkm.	>500 000	500 - 2 000

Hietalahden (2011, 107) mukaan superkondensaattoriin varastoitu energia on verrannollinen sen jännitteen neliöön. Tämän vuoksi superkondensaattorin hyödyntämiseksi tarvitaan tehoelektroniikkaa, koska superkondensaattori toimii laajalla jännitealueella, mutta muut tehonsiirtojärjestelmien toimilaitteet puolestaan tarvitsevat yleensä vakioidun jännitteen.

Superkondensaattoreita tarvitaan yleensä useita sarjaan kytkettynä halutun korkean jännitteen saavuttamiseksi, sillä yksittäisen superkondensaattorikennon maksimijännite on vain muutaman voltin verran. Superkondensaattoreita kytkettäessä sarjaan täytyy superkondensaattorikennot suojata mahdolliselta ylijännitteeltä erillisillä jännitteen tasauspiireillä. (Hietalahti 2011, 107.)

Superkondensaattoreita pystytään varaamaan ja purkamaan tavallisiin lyijyakkuihin verrattuna korkeammilla virroilla sekä paremmalla hyötysuhteella. Superkondensaattoreita ladattaessa ja purettaessa korkea hyötysuhde johtuu huomattavasti akkuja pienemmästä ekvivalenttisesta sarjaresistanssista sekä sähkökenttään varastoitavan energian luonteesta. Superkondensaattoreiden hyötysuhde pysyy korkeana, vaikka se purettaisiinkin puoleen sen nimellisestä jännitteestä. Näiden ominaisuuksien myötä superkondensaattorit sopivat hyvin suuritehoisten työkoneiden ja ajoneuvojen pienenergisten tehopiikkien tasaajiksi. (Hietalahti 2011, 107.)

2.5 Suomalaiset sähköajoneuvot

Suomessakaan kotimaiset sähköautot eivät ole mikään täysin uusi asia, sillä Suomessa valmistettiin 1980- ja 1990-luvuilla ELCAT-pienpakettiautoja kevyen tavarankäyttöön erityisesti kaupunkikeskeiseen käyttöön (Hietalahti 2011, 3).

ELCAT-sähköpakettiautot olivat kuitenkin hyvin yksinkertaisesti toteutettuja, sillä ne olivat toteutettu Subaru valmistaman pienpakettiauton pohjalta yksinkertaisesti asentamalla polttomoottorin tilalle sähkömoottori, joka pyöritti vauhtipyörää ja edelleen vaihteistoa. Energiavara-asteena toimi useampi perinteinen 12 voltin jännitteellä toimiva lyijyakku. Tällaisella yhdistelmällä ei saavutettu toimintasädeä kuin oletettavasti joitain kymmeniä kilometrejä, ja oletettavasti akkujen teho heikkeni hyvinkin nopeasti niiden ikääntyessä.

Viime aikoina Suomessa on suunniteltu ja toteutettu erilaisia uusia, innovatiivisia sähköajoneuvoja eri käyttötarkoituksiin. Näistä ehkä merkittävin on Linkker-yhtiön suunnittelema ja valmistama täyssähköinen, paikallisliikenteeseen suunniteltu linja-auto, joita on käytössä jo esimerkiksi pääkaupunkiseudulla. (Linkker 2019.)

Linkker - Suomalainen sähkölinja-auto. Linkker-sähkölinja-autot syntyivät Teke-sin eBUS-projektin pohjalta sen jälkeen, kun projektissa kehitetyt ja testatut sähkölinja-autot olivat todettu toimiviksi todellisessa linjaliikenteessä Suomen olosuhteissa. eBUS-hanke käynnistyi vuonna 2012, mutta Linkker on syntynyt jo yli kymmenen vuotta sitten. (Linkker Oy, [viitattu 4.3.2019].)

Vuonna 2007 Linkker alkoi kehittää omaa sähköistä voimansiirtoaan, ja ensimmäinen linja-auto kehitettiin vuonna 2011. Linja-autossa käytettiin aiemmin perinteisiin diesel linja-autoihin suunniteltua kevyttä korirakennetta sekä Linkkerin voimansiirtojärjestelmää. (EnergiaKokeilut.fi, [viitattu 5.3.2019].)

Linkker-yritys on perustettu vuonna 2014, ja ensimmäiset linja-autot (kuva 2) toimitettiin vuonna 2016. Linja-autoja toimitetaan Suomeen, Ruotsiin, Tanskaan, Venäjälle ja Singaporeen (Linkker 2019).

Linkkerin ([viitattu 5.3.2019]) mukaan heidän kehittämä LinkDrive-voimansiirtojärjestelmä on kevyt, ei vie matkustamolta tilaa ja on suunniteltu hyvinkin pitkällä elinkaarella. Lisäksi voimansiirtojärjestelmän pääkomponentit ovat sijoitettu auton takaosaan, josta niihin on helppo päästä käsiksi huoltoluukun kautta. Voimansiirtojärjestelmän latauksen kerrotaan olevan tehokas, jolla vähennetään uudelleen latauksien määrää ja mahdollistetaan linja-autojen jatkuva liikennöinti.

Linkkerin linja-autoissa käytetään korkealaatuisesta alumiinista valmistettua, kevytrakenteista unibody-tyyppistä LinkLight-nimistä korirakennetta, joka on suunniteltu kestämään käytössä 25 vuotta. Korirakenne yhdistää suuren hyötykuorman sekä pienen painon, jotka yhdessä pienentävät energian kulutusta ja lisäävät linja-autojen tehokkuutta. Lisäksi LinkLight-korirakenteen kerrotaan omaavan hyvän rakennelujuuden sekä korkean turvallisuuden. (Linkker Oy, [viitattu 5.3.2019].)

EnergiaKokeilut.fi:n ([viitattu 5.3.2019]) mukaan Linkkerin sähkölinja-autot ovat suunniteltu nimenomaan lyhyille kaupunkien paikallisliikennereiteille, sillä linja-auton toimintasäde on noin 30 kilometriä ja ne ovat suunniteltu ladattaviksi pääte-pysäkeillä. Julkaisussa kerrotaan myös, että LinkDrive-voimansiirtojärjestelmä on todettu toimivaksi myös pakkaskaleilla talviolosuhteissa akkukapasiteetin ja sopivan varustelun ansiosta. Linkker ([viitattu 5.3.2019]) puolestaan kertoo, että heidän linja-autonsa toimii jopa alle -25 °C lämpötilassa sekä kovassa lumisateessa, ja että linja-autot ovat varustettu energiatehokkailla lisälaitteilla ja eristetyillä, kaksikerroksisilla laseilla varustetulla rungolla, mitkä takaavat vakaan toiminnan myös haastavissa olosuhteissa.

Linkker on saanut EU-tyyppihyväksynnän, jonka on myöntänyt Liikenteen Turvallisuusvirasto Trafi (Nykyisin Liikenne- ja viestintävirasto Traficom) direktiivin 2007/46/EC mukaisesti. Linkkerin tyyppihyväksyntätestit suoritettiin pääsääntöisesti Suomessa, ja niissä oli mukana muun muassa myös tämän työn toimeksiantajana toimiva Testmill Oy Ltd. (Linkker Oy, [viitattu 5.3.2019]; Saari 2019.) Linkkerin teknisiä tietoja on esitetty taulukossa 2.



Kuva 2. Linkker-sähkölinja-auto (EnergiaKokeilut.fi, [viitattu 5.3.2019]).

Taulukko 2. Linkker-sähkölinja-auton tekniset tiedot (Linkker Oy, [Viitattu 5.3.2019]).

Pituus	12818mm
Akseliväli	6750mm
Istuinpaikat	43 + 4 tilapäisistuinta
Omamassa	10500kg
Hyötykuorman massa	5500kg
Sähkömoottorin teho	180kW
Sähkömoottorin vääntö	7824Nm
Energiavaraston kapasiteetti	LTO 55kWh/63.5kWh
Uudelleenlatausten määrä	15000 takuunalaisena, 18000 odotettu elinikä
Latausteho	350kW

Toroidion - Suomalainen sähkökäyttöinen superauto. Toroidion on vuonna 2011 perustettu suomalainen yritys, joka on perustamisestaan lähtien kehittänyt täysin uudenlaista sähköistä voimalinjaa, josta pyritään tekemään mahdollisimman kilpailukykyinen LeMansin 24 tunnin kisassa. Toroidionin on perustanut Pasi Pennanen, joka on toiminut 20 vuotta autoalalla suunnittelemassa ja rakentamassa konsepti- ja tuotantoautoja. (Toroidion, [viitattu 5.3.2019].)

Toroidionin ([viitattu 5.3.2019]) mukaan heidän kehittämä voimalinja toimii yllättävän pienellä jännitteellä, tyypillisesti 40 V - 90 V:n tasavirralla sekä 200 A:n maksimivirralla, ja voimalinjaa pystytään käyttämään useissa eri sovellutuksissa, kuten autoissa, vesikulkuneuvoissa, lentokoneteollisuudessa sekä teollisuuden koneissa. Heidän ensimmäinen konseptiautonsa, joka kantaa nimeä 1MW, on tieliikennelaillinen, täysin Suomessa suunniteltu, kehitetty ja rakennettu superauto. Nimensä mukaisesti Toroidionin 1MW-konseptiautossa on tehoa yhden megawatin verran.

Toroidion ([viitattu 5.3.2019]) myös mainostaa voimalinjaansa kevyillä komponenteilla, skaalattavalla suorituskyvyllä, kevyillä korkeasuorituskykyisillä akuilla, nopealla akun vaihdolla sekä kuljettajan ja huoltomekaanikon turvallisuudella.

Toroidion ([viitattu 6.3.2019]) mukaan heidän voimalinjansa tarjoaa tieliikenneajoneuvoille korkean hyötysuhteen pidemmällä toimintasäteellä ja pienemmillä akuilla, korkean väännön laajalla kierrosalueella, mahdollisuuden ladata tavallisesta 240 V:n AC-verkkovirtapistokkeesta, mahdollisuuden vaihtaa ajoneuvon akusto nopeasti, alhaisia hankinta- ja käyttökustannuksia, hiljaisuutta sekä joustavuutta ajoneuvon rakenteeseen ilman tavanomaisen voimansiirron aiheuttamia rajoituksia.

Laihon (2018) artikkelissa kerrotaan, että Toroidion 1MW -konseptiauton (kuva 3) erikoisuutena on alhainen toimintajännite: peräti vain 48 voltia, lisäksi auton energiankulutus on todistettu pienemmäksi kuin muilla markkinoilla olevilla sähköautoilla. Myös suoravetoinen voimansiirto ilman vaihteistoa on mainittu Toroidionin erikoisuudeksi. Artikkelin mukaan Toroidionin tuotanto lähtee aluksi käyntiin 75 yksikön vuosituotantovauhtia, kun rahoitus saadaan ensin järjestettyä loppuun, sillä kolme vuotta sitten järjestetyssä joukkorahoituksessa ei saatu kerättyä tarpeeksi varoja. Rahoituksen puutteesta huolimatta kysyntää artikkelin mukaan autolle kyllä olisi.



Kuva 3. Suomalainen Toroidion 1MW -konseptiauto (Toroidion, [viitattu 4.3.2019]).

RMK E2 - Suomalainen sähkömoottoripyörä. RMK Vehicle Corporation on Seinäjoella sijaitseva suomalainen aloitteleva yritys, joka on kehittänyt ja rakentanut E2-nimellä kulkevan sähkömoottoripyörän, jota ollaan tuomassa markkinoille. Moottoripyörän pääsuunnittelijana on toiminut Teemu Saukkio, jolta myös idea koko moottoripyörän kehittämiseen on lähtenyt. Moottoripyörän tuotanto on tarkoitus aloittaa vuoden 2019 aikana. (Tervola 2018.)

RMK Vehicle Corporation (2018) mukaan E2-sähkömoottoripyörän valmistus pyritään aloittamaan vuoden 2019 loppupuolella, ja ensimmäiset pyörät pyritään toimittamaan asiakkaille vuoden 2020 alussa.

E2-sähkömoottoripyörän (kuva 4) akuston koko voidaan mitoittaa eri kokoiseksi asiakkaan toiveiden mukaan, ja näin ollen saavutetaan 200 - 300 kilometrin toimintasäde. Moottoripyörän sisäänrakennetulla laturilla saavutetaan 80 %:n varaustila noin 2 - 3 tunnin latauksella. Vaikka akusto on suhteellisen kookas, jää moottoripyörän painoksi siitä huolimatta n. 200 kg. Moottoripyörän sähkömoottori tuottaa 50 kW:n tehon ja vääntöä 320 Nm, moottoripyörän huippunopeus on rajoitettu 160 kilometriin tunnissa. (RMK Vehicle Corporation 2018.)



Kuva 4. Suomalainen RMK E2 -sähkömoottoripyörä (RMK Vehicle Corporation 2018).

Moottoripyörän runko on hieman erityylinen kuin tavanomaisissa moottoripyörissä, jotta akustolle on saatu enemmän tilaa (RMK Vehicle Corporation 2018). Moottoripyörän akusto on sijoitettu kohtaan, jossa tavallisesti olisi polttomoottori. Akusto ulottuu myös ns. polttoainetankin kohdalle, ja onkin koteloitu päältä niin, että se muistuttaa perinteisen moottoripyörän polttoainetankkia.

E2-sähkömoottoripyörän yksi suurimmista erikoisuuksista on keskiötön takavanne-sähkömoottoriyhdistelmä, jossa ei siis ole laisinkaan tavanomaisiin vanteisiin kuuluvia pintoja tai puolia. Takavanne-sähkömoottoriyhdistelmä on täysin uusi innovaatio moottoripyörissä, ja on pyörän suunnittelijan Teemu Saukkion suunnittelema. (Tervola 2018.)

RMK Vehicle Corporationin (2018) mukaan siitä huolimatta, että takavanteeseen on integroitu pyörää liikuttava sähkömoottori, on moottoripyörän jousittamaton massa verrattavissa tavanomaisiin moottoripyöriin. Takavanne-sähkömoottoriyhdistelmän ansiosta moottoripyörän pyörivä massa on huomattavasti pienempi tavanomaisiin moottoripyöriin verrattuna, sillä pyörivä massa koostuu lähinnä itse renkaasta ja vanteen ulkokehästä.

Yhtenä merkittävänä erikoisuutena E2-sähkömoottoripyörässä voidaan pitää myös sitä, ettei siinä ole takapyörälle omaa erillistä jarrujärjestelmää, vaan takapyörää

jarrutetaan ainoastaan sähkömoottorin avulla, jolloin sähkömoottori toimii generaattorina, ja varaa akustoa jarrutuksesta talteen otetulla energialla. Moottoripyörässä ei myöskään ole erillistä mittaristoa ohjaustangon päällä, vaan ns. ”polttoainetankin” päällä on infonäyttö, josta ilmenee muun muassa ajonopeus sekä akun varaustaso. Moottoripyörän ominaisuuksiin kuuluu myös navigaattori, jonka ajo-ohjeet toistetaan infonäytölle. Moottoripyörään luvataan myös päivityksiä millä mahdollistetaan uusia ominaisuuksia ja lisätään mahdollisuuksia muuttaa sitä, miten olet vuorovaikutuksessa moottoripyörän kanssa. (RMK Vehicle Corporation 2018.)

3 SÄHKÖTEKNIikka

Sähkö ei ole varsinaisesti mitään käsin kosketeltavaa, sillä sähkö on eräänlainen kemiallinen reaktio. Emme pysty tuntemaan, näkemään tai muuten havaitsemaan sähköä, mutta pystymme havaitsemaan sen aiheuttamat ilmiöt ja vaikutukset välillisesti.

Ahorannan (2016, 12) mukaan sähkö esiintyy aineessa positiivisina (+) ja negatiivisina (-) varauksina, joiden välistä voimavaikutusta määritteli 1780-luvulla ranskalainen Charles de Coulomb. Tanskalainen fyysikko Niels Bohr kehitti 1900-luvun alkuvuosina oman atomimallinsa, jolla pystytään selittämään muun muassa sähköilmiöt. Atomin rakenne on atomin ydin ja elektronit, jotka kiertävät atomin ydintä radoillaan, joita voi olla useita. Atomin ytimessä on positiivisesti varautuneita protoneita ja sähköisesti neutraaleita neutroneita, ja ydintä kiertävät negatiivisesti varautuneet elektronit. (Ahoranta 2016, 12–13.)

Atomin uloimman elektronikuoren elektronit ovat niitä, jotka osallistuvat sähkönsäilyttämiseen eli vaikuttavat aineen sähkönsäilyttämiskykyyn, ja joilla atomit myös liittyvät toisiinsa. (Ahoranta 2016, 13).

Eri aineiden atomien rakenne on erilainen, eli protonien, neutronien ja elektronien määrä vaihtelee. Atomien ytimissä olevien protonien ja neutronien summa ilmoittaa atomin massaluvun. Esimerkiksi litiumilla on ytimessään kolme protonia ja neljä neutronia, joista atomimassaksi saadaan seitsemän. Elektroneja on puolestaan kolme, joten elektronikuoria litiumilla on kaksi, koska ensimmäiselle kuorelle mahtuu vain kaksi elektronia. Toisena esimerkkinä mainittakoon alumiini, jolla on ytimessään 13 protonia ja 14 neutronia ja täten atomimassaksi tulee 27. Elektroneja alumiinilla on 13, jotka jakautuvat kolmelle elektronikuorelle. (Ahoranta 2016, 13.)

Ahoranta (2016, 14) kertoo, että jos atomin ytimessä on protoneja yhtä paljon kuin ydintä kiertäviä elektroneja, on atomi tällöin ympäristöönsä nähden sähköneutraali. Atomin varaus voi siis olla positiivinen, jos yksi elektroni poistuu, tai negatiivinen, jos siihen lisätään yksi tai useampi elektroni. Näitä kutsutaan positiivisiksi tai negatiivisiksi ioneiksi varauksensa mukaan. Näin ollen atomin uloin elektronikuori ja sen elektronit ratkaisevat jokaisen aineen sähköisen ja kemiallisen käyttäytymisen.

Hautalan ja Peltosen (2014, 239) mukaan tavallisessa atomissa on yhtä paljon protoneja ja elektroneja, eli atomi on siis ulospäin varaukseton. Kuitenkin atomia, josta tulee positiivinen ioni, eli elektroneja poistuu elektronikuorelta, kutsutaan myös kationiksi. Jos taas atomi saa ylimääräisiä elektroneja eli siitä tulee negatiivinen ioni, kutsutaan sitä myös anioniksi. Sähkön yksi yleisimmistä mittaussuureista on jännite, jonka suuretunnus on U , ja mittayksikkö on voltti (V) (Ahoranta 2016, 23).

3.1 Sähkövaraus ja sähkövirta

Atomin elektronin ja protonin sähkövaraus on pienin luonnossa esiintyvä sähkövaraus, jonka suuruudeksi on tutkimuksissa todettu olevan $1,6 \times 10^{-19}$ ampeerisekuntia (As). Sähkövarauksen suuretunnukseksi on Q ja mittayksikkönä coulombi (C), joka vastaa perussuureilla ilmoitettuna ampeerisekuntia. (Ahoranta 2016, 15.)

Hautala ja Peltonen (2014, 239) kertovat, että pienintä luonnossa esiintyvää varauksista, joka on yhden elektronin tai protonin varaus, kutsutaan myös alkeisvaraukseksi.

Sähkövirta määritellään tietyssä ajassa johtimen läpi kulkeneen sähkövarauksen mukaan. Sähkövirran suuretunnus on I ja mittayksikkö on ampeeri, jonka tunnus on A. Sähkövirran voimakkuus saadaan laskettua kaavan (1) mukaan johtimen läpi tietyssä ajassa kulkevan sähkövarauksen määrästä, esimerkiksi jos johtimen läpi kulkee 1 As:n sähkövaraus 1 sekunnissa, on sähkövirran voimakkuus 1 ampeeri. (Ahoranta 2016, 15.)

Sähkövirta määritetään kaavalla

$$I = \frac{Q}{t}, \tag{1}$$

missä

- I on sähkövirta
- Q on sähkövaraus
- t on aika

Metallit ovat hyviä sähkönjohtimia, koska niiden uloimman elektronikuoren elektronit eivät kuulu mihinkään atomiin kiinteästi, vaan pystyvät herkästi siirtymään atomista toiseen. Vapaita elektroneja on metalleissa paljon ja ulkoisen sähkölähteen avulla ne liikkuvat helposti atomista toiseen. Suljetun virtapiirin metallijohtimissa vapait elektronit virtaavat jännitelähteen --navasta +-napaan. (Ahoranta 2016, 16.)

Ahorannan (2016, 16) mukaan sähkön kulkua kuvataan historiallisista syistä elektronivirran sijaan sähkövirralla, ja koska sähkövirran kulkusuunta määritettiin ennen kuin sähkövirran muodostumista elektronivirrasta tunnettiin, sovittiin sähkövirran kulkusuunnaksi positiivisen sähkön kulkusuunta +-navasta --napaan. Sähkövirta kulkee siis elektronivirtaa päinvastaiseen suuntaan, ja tämä suuntasopimus on jätetty voimaan, koska sähkön kulkusuunnalla ei ole käytännön merkitystä.

Ahoranta (2016, 19) kertoo, että sähkövirralla on myös erilaisia vaikutuksia, joiden välityksellä sähköä pystyy havaitsemaan. Sähkövirran aiheuttamat vaikutukset jaetaan hänen mukaan eri ryhmiin, jotka ovat

- lämpövaikutus
- valovaikutus
- magneettiset vaikutukset
- kemialliset vaikutukset
- fysiologiset vaikutukset.

Sähkövirran vaikutuksia käytetään hyväksi eri tavoin monissa käyttökohteissa, esimerkiksi lämpövaikutusta saadaan syöttämällä sähkövirtaa vastuselementin vastuslangalle, joka alkaa sähkövirran vaikutuksesta lämpenemään, ja täten lämmittää edelleen ympäristöään. Sähkövirran lämpövaikutusta käytetään hyväksi myös muun muassa sulakkeissa, joiden sisällä oleva metallilanka sulaa poikki liian suuren sähkövirran vaikutuksesta. (Ahoranta 2016, 19.)

Sähkövirran lämpövaikutuksella pystytään synnyttämään myös näkyvää valoa hehku- ja halogeenilampuissa, joissa valon tuotto perustuu lämpösäteilyyn, mikä saadaan aikaan johtamalla vastuslangan läpi entistä suurempaa virtaa, jolloin lanka alkaa hehkua. Hehku- ja halogeenilamppujen valon tuotto ei siis perustu varsinaisesti sähkövirran valovaikutukseen, kuten LED-, loiste- ja purkauslampuissa, joissa

lampun sisällä syntyvä ultraviolettisäteily muuttuu näkyväksi valoksi lampun sisäpinnan loisteainekerroksessa. (Ahoranta 2016, 20.)

Kaiuttimet, sähkömoottorit ja -generaattorit, muuntajat, sähkömagneetit ja releet perustuvat sähkövirran magneettiseen vaikutukseen. Näissä kaikissa on jonkinlainen käämitys, johon sähkövirtaa johdetaan, ja esimerkiksi sähkömagneetin käämityksen sisällä oleva rautasydän alkaa vetää muita rautakappaleita puoleensa käämiin johdetun sähkövirran vaikutuksesta. (Ahoranta 2016, 20.)

Sähkövirran kemiallisia vaikutuksia ovat muun muassa akkujen ja paristojen toimintaperiaate, metallien päällystäminen ja syöpyminen sekä metallien erottaminen toisistaan. Metalliesineitä päällystetään sähkövirran avulla esimerkiksi kromilla, sinkillä, nikkelillä, hopealla ja kullalla. Eräs erityisesti autoteollisuuteen liittyvä metallin päällystys on galvanointi, eli teräsesineiden päällystäminen sinkillä teräksen korroosiota vastaan. Metallien puhdistus ja pinnoitus sähkökemiallisesti tapahtuvat kahden metallin ollessa johtavassa yhteydessä elektrolyyttiliuoksessa. Metalleista epäjalompi on liitetty jännitelähteen +-napaan, ja jalompi --napaan. Positiiviseen napaan yhdistetty metalli liukenee elektrolyyttiin ja sähkövirran kuljettamana siirtyy negatiiviseen napaan yhdistettyyn metalliin. (Ahoranta 2016, 21.)

Sähkökemiallinen korrosio aiheutuu galvanisesta sähköparista, joka syntyy, kun elektrolyytissä on kaksi metallia johtavassa yhteydessä toisiinsa. Näistä metalleista epäjalompi syöpyy, ja on sitä voimakkaampaa, mitä paremmin liitoskohdan elektrolyytti johtaa sähköä. Metallit jaotetaan sähkökemiassa jännitesarjaan, jossa positiivisen jännitteen omaavat metallit luokitellaan jalometalleiksi ja negatiivisen jännitteen omaavat epäjaloiksi metalleiksi. Metallit syöpyvät sitä helpommin, mitä epäjalompia ne ovat. Esimerkiksi alumiini, sinkki, rauta ja kromi ovat epäjaloja metalleja ja kupari, hopea ja kulta ovat jalometalleja. (Ahoranta 2016, 21–22.)

Sähkövirran fysiologisiin vaikutuksiin kuuluu ihmisten ja eläimien aistihavainnot ja toimintakäskyt, jotka välittyvät sähkövirran avulla hermoja pitkin jännitesignaaleina. Näitä jännitesignaaleja voidaan myös seurata, esimerkiksi sydämen toimintaa ohjaavia jännitepulsseja pystytään mittaamaan EKG-käyrällä. Ulkopuolinen sähkövirta ihmiskehossa häiritsee ja jopa estää kehon normaalitoimintoja ja voivat siksi olla

erityisen vaarallisia. Tilanteesta riippuen altistuminen kehon ulkopuoliselle sähkövirralle voi aiheuttaa kouristuksia, sydämen kammiovärinää, palovammoja, kehon nesteiden kiehumista sekä solujen tuhoutumista. (Ahoranta 2016, 22.)

3.2 Tasavirta ja vaihtovirta

Tasajännitelähteen +- ja --napojen välillä vaikuttaa vakiosuuruisena pysyvä jännite. Tasajännitelähteen napaisuus pysyy samana koko ajan, ja sähkövirta kulkee aina samaan suuntaan, eli jännitelähteen +-navasta --napaan. (Ahoranta 2016, 27.) Toisin sanoen tasajännite on saman suuruisena pysyvä sähköjännite, jonka jännitetasossa tapahtuu vain vähän muutoksia. Tasavirran määrä riippuu virtaa ottavan laitteen tehosta, mutta tasavirran suunta pysyy koko ajan samana edellä mainitulla tavalla.

Vaihtovirran ja -jännitteen luonne eroaa tasajännitteestä/-virrasta siten, että vaihtojännitteen napaisuus vaihtelee tietyllä taajuudella. Vaihtojännitteen taajuus ilmaisee vaihtojännitteen jaksojen lukumäärän tietyn ajan sisällä. Vaihtojännitteen jakso muodostuu positiivisen ja negatiivisen jännitteen puolijaksoista, jotka kuvaavat jännitteen tasoa ajan suhteen negatiivisilla ja positiivisilla jännitetasoilla. Taajuuden suure on f ja yksikkönä on käytössä hertsi, jonka tunnus on Hz. Yhden hertsin taajuus tarkoittaa yhtä vaihtojännitejaksoa per sekunti. (Ahoranta 2016, 28–29.)

3.3 Resistanssi ja konduktanssi

Eri aineiden vapaiden elektronien määrä ja niiden mahdollisuus liikkua vaihtelee, minkä takia eri aineet johtavat sähköä eri tavalla. Elektronien kulkua voikin verrata esimerkiksi veden kulkemiseen eri aineiden lävitse. Vesi läpäisee hiekan helposti, mutta saven läpäisy ei suju yhtä helposti. Samoin tavoin sähkö kulkee kuparilangan läpi hyvin, mutta huonommin rautalangan läpi. Jokainen aine vastustaa sähkövirran kulkua kullekin aineelle ominaisella tavalla, ja tätä aineen sähkövirran kulkua vastustava ominaisuus on nimeltään resistanssi. (Ahoranta 2016, 32.)

Hautalan ja Peltosen (2014, 272) mukaan kaikkia virtapiiriin kytkettäviä laitteita, jotka vastustavat sähkövirran läpikulua eli omaavat resistanssia, kutsutaan vastukseksi tai kuormaksi.

Resistanssin mittayksikkö on ohmi, jonka tunnus on kreikkalainen iso oomega -kirjain Ω . Suuretunnukseksi resistanssilla on R . Resistanssin yksikkö määritetään kaavan (2) mukaan siten, että jos johtimen läpi kulkee yhden voltin jännitteellä yhden ampeerin sähkövirta, on johtimen resistanssi yhden ohmin verran.

Resistanssi määritetään kaavalla

$$R = \frac{U}{I}, \quad (2)$$

missä

R on resistanssi

U on jännite

I on sähkövirta

Harvemmin käytetty mittaussuure konduktanssi on resistanssin käänteisarvo, jonka suuretunnus on G ja mittayksikkö on siemens (S). Konduktanssi määritetään resistanssista kaavan (3) mukaisesti. (Ahoranta 2016, 33.)

Konduktanssi määritetään kaavalla

$$G = \frac{1}{R}, \quad (3)$$

missä

G on konduktanssi

R on resistanssi

Kaavan (3) määritelmästä voidaan päätellä muun muassa, että yhden ohmin resistanssin omaavan vastuksen konduktanssi on 1 siemens, ja 10 ohmin resistanssilla vastuksen konduktanssi on $\frac{1}{10} \text{ S} = 0,1 \text{ S}$ (Ahoranta 2016, 33).

Ohmin laki. Ohmin laki syntyi 1820-luvulla saksalaisen Georg Simon Ohmin tekemän tutkimuksen tuloksena, kun hän tutki, miten virtapiirejä voitaisiin tutkia matemaattisia menetelmiä käyttäen. Ohmin laki on hänen tärkein havaintonsa, joka koskee virtapiirin jännitteen, virran ja resistanssin välistä yhteyttä. Ohmin lain avulla voidaan päätellä kytkennän virran, jännitteen ja resistanssin muutokset, sekä laskea virran, jännitteen ja resistanssin suuruus riippumatta siitä, onko vastus kytketty tasa- tai vaihtojännitteeseen. Ohmin laki esitetään kaavan (4) mukaisesti. (Ahoranta 2016, 41.)

Ohmin laki määritetään kaavalla

$$I = \frac{U}{R}, \quad (4)$$

missä

I on sähkövirta

U on jännite

R on resistanssi

Ohmin laista saadaan ratkaistua mikä vain kolmesta muuttujasta, mikäli kaksi muuta muuttujaa tunnetaan. Kuten kaavasta (4) ilmenee, on sähkövirta I ohmin lain mukaan suoraan verrannollinen jännitteeseen U ja kääntäen verrannollinen resistanssiin R .

3.3.1 Lämpötilan vaikutus resistanssiin

Aineiden atomeille ja molekyyille on ominaista, että lämpötilan kasvaessa niiden värähtely lisääntyy, jolloin vapaat elektronit pääsevät kulkemaan huonommin aineessa, sillä niiden törmäily atomeihin lisääntyy lämpötilan noustessa. Samaan aikaan lämpötilan kasvaminen irrottaa vapaita elektroneja atomeista, mikä puolestaan lisää aineen kykyä johtaa sähköä. (Ahoranta 2016, 38.)

Metalleille on ominaista, että lämpötilan noustessa aineen resistanssi kasvaa, sillä lämpötilan nousun aiheuttama atomien lisääntyvä värähtely kasvattaa aineen resistanssia enemmän kuin vapautuvien elektronien määrä pienentää sitä. Puolestaan muun muassa hiilelle ja puolijohteille on tyypillistä, että lämpötilan nousu vaikuttaa aineen resistanssiin alentavasti, koska kasvava vapaiden elektronien määrä pienentää aineen resistanssia enemmän, kuin mitä atomien värähtely kasvattaa sitä. Tästä syystä puolijohteita käytetään runsaasti esimerkiksi lämpötilatunnistimissa. Elektroniikkapiireissä puolestaan pyritään käyttämään metalliseosta, jonka resistanssi reagoisi mahdollisimman vähän ympäristön lämpötilaan. (Ahoranta 2016, 38–39.)

Jokaisella aineella on oma resistanssin lämpötilakerroin (α), joka määrittää sen, kuinka paljon aineen resistanssi muuttuu lämpötilan muuttuessa. Aineen resistanssin muutos (ΔR) riippuu aineen alkuperäisestä resistanssista (R_a), edellä mainitusta aineen resistanssin lämpötilakertoimesta (α) sekä lämpötilan muutoksesta (Δt). Resistanssin muutos yhtälönä on esitetty kaavassa (5). Kaavan avulla voi päätellä, että

resistanssin muutos on suoraan verrannollinen alkuperäiseen resistanssiin (ΔR), resistanssin lämpötilakertoimeen (α) sekä lämpötilan muutokseen (Δt). (Ahoranta 2016, 39.)

Resistanssin muutos yhtälönä

$$\Delta R = R_a * \alpha * \Delta t, \quad (5)$$

missä

ΔR on aineen resistanssin muutos

R_a on aineen alkuperäinen resistanssi

α on aineen resistanssin lämpötilakerroin

Δt on lämpötilan muutos

Resistanssi voidaan laskea uudessa lämpötilassa lisäämällä tai vähentämällä resistanssin muutos alkuperäisestä resistanssiarvosta kaavan (6) mukaisesti (Ahoranta 2016, 41).

Resistanssi uudessa lämpötilassa

$$R = R_a \pm \Delta R, \quad (6)$$

missä

R on resistanssi uudessa lämpötilassa

R_a on aineen alkuperäinen resistanssi

ΔR on aineen resistanssin muutos

Edellisiä kaavoja (5 ja 6) käyttämällä voidaan johtaa yksi yhtälö kaavan (7) mukaan, jolla saadaan ratkaistua resistanssi uudessa lämpötilassa (Ahoranta 2016, 41).

Resistanssi uudessa lämpötilassa

$$R = R_a * (1 + \alpha * \Delta t), \quad (7)$$

missä

R on resistanssi uudessa lämpötilassa

R_a on aineen alkuperäinen resistanssi

α on aineen resistanssin lämpötilakerroin

Δt on lämpötilan muutos

3.3.2 Resistiivisyys ja konduktiivisuus

Jokaisella aineella on omia ominaisuuksiaan, joita vertaillaan muihin aineisiin ominaisuuksien avulla. Aineiden eri ominaisuuksia ovat kokeellisesti määritettyjä, ja niitä ovat muun muassa aineen tiheys, lämmönjohtavuus, sulamislämpötila ja sähkönjohtavuus. Sähkönjohtavuus eli resistiivisyys ilmaisee aineen kykyä johtaa sähkövirtaa. Aineen resistiivisyys määritetään 1 metrin mittaisen ja 1 neliömillimetrin poikkipinta-alan omaavan kappaleen resistanssina. Mitä pienempi aineen resistiivisyyden ominaisarvo on, sitä paremmin aine johtaa sähköä, eli sen parempi johde kyseinen aine on. (Ahoranta 2016, 33.)

Resistiivisyyden suuretunnuksena käytetään kreikkalaista roo-kirjainta ρ , ja sen yksikkö on Ωm tai $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Aine, jonka resistiivisyys on korkeintaan $10\,000\ \Omega\text{m}$, luokitellaan johtavaksi materiaaliksi. Eristävänä materiaalina pidetään ainetta, jonka resistiivisyys on yli $10^9\ \Omega\text{m}$. (Ahoranta 2016, 33–34.)

Konduktiivisuus on resistiivisyyden käänteisarvo, jolla ilmaistaan resistiivisyyden rinnalla aineen sähkönjohtamiskykyä. Konduktiivisuus saadaan määritettyä kaavan (8) mukaisesti. Konduktiivisuudella ilmaistaan, kuinka hyvin sähköä aine johtaa. Konduktiivisuuden suuretunnus on kreikkalainen gamma-kirjain γ . (Ahoranta 2016, 35.)

Konduktiivisuus määritetään kaavalla

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (8)$$

missä

γ on konduktiivisuus
 ρ on resistiivisyys

Resistiivisyydellä voidaan siis ilmoittaa, kuinka suuren vastuksen aine aiheuttaa sähkönsä kulkeutumiselle, ja konduktiivisuudella ilmaistaan, miten hyvin aine johtaa sähköä. Näin ollen siis hyvin sähköä johtavan aineen konduktiivisuuden arvo on suuri, ja resistiivisyyden arvo on pieni. (Ahoranta 2016, 35.)

3.3.3 Johtimen resistanssi

Johtimen resistanssi (R) riippuu johtimen pituudesta (l), johtimen poikkipinta-alasta (A) sekä aineen resistiivisyydestä (ρ), joka saadaan määritettyä kaavan (9) mukaisesti (Hautala & Peltonen 2014, 272).

Johdinmateriaalin resistiivisyyden ilmaisuun käytetään 1 metrin mittaisen ja 1 neliömillimetrin poikkipinta-alaisen johtimen resistanssia. Kaavan (9) mukaisesti määritettynä johtimen resistanssi on kääntäen verrannollinen sen pinta-alaan, eli johtimen poikkipinta-alan kasvaessa sen resistanssi pienenee ja toisinpäin. Näin ollen johtimen resistanssia voi nostaa johdinaineen resistiivisyyden kasvu, johtimen pituuden kasvu sekä johtimen johdinmateriaalin poikkipinta-alan pienentyminen. (Ahoranta 2016, 36.)

Johtimen resistanssi määritetään kaavalla

$$R = \rho * \frac{l}{A}, \quad (9)$$

missä

R on johtimen resistanssi

ρ on johdinmateriaalin resistiivisyys

l on johtimen pituus

A on johtimen poikkipinta-ala

3.4 Johteet, puolijohteet ja eristeet

Kaikki olemassa olevat aineet jaotellaan kolmeen eri ryhmään sen mukaan, kuinka paljon niissä on vapaita elektroneja tai muita varauksenkuljettajia ja kuinka hyvin ne liikkuvat aineessa, eli toisin sanoen aineet jaotellaan niiden sähkönjohtamiskyvyn mukaan johteisiin, puolijohteisiin ja eristeisiin (Ahoranta 2016, 18).

Johteiksi luetellaan aineet, joissa elektronit osallistuvat helposti sähkön kuljettamiseen. Johteista yleisimpiä ovat metallit, erityisesti kupari ja alumiini. Myös epämetalleista hiili luokitellaan johteeksi, jota käytetään muun muassa elektroniikkapiirien vastuksissa ja sähkömoottoreiden ja -generaattoreiden hiiliharjoissa. (Ahoranta 2016, 18.)

Puolijohteiksi luokiteltavissa aineissa sähkön kuljettamiseen osallistuvia varauksenkuljettajia on paljon vähemmän kuin johteissa. Puolijohteiden sähköä kuljettavien varaustenkuljettajien määrä riippuu aineeseen lisätyn seosteen määrästä, joita ovat esimerkiksi arseeni ja boori. Puolijohteita käytetään diodeissa, mikropiireissä, aurinkokennoissa, epälineaarisisissa vastuksissa ja transistoreissa. (Ahoranta 2016, 18.)

Eristeaineiden elektronit eivät osallistu sähkön kuljettamiseen, koska elektronit pysyvät tiukasti kiinni atomeissaan. Tavanomaisesti eristeaineena käytetään muoveja, kumeja, lasia, bakeliittia ja paperia. (Ahoranta 2016, 18.)

Hautalan ja Peltolan (2014, 259) mukaan paras mahdollinen eriste on tyhjiö, koska tyhjiössä ei ole mitään ainetta, joka voisi kuljettaa sähköä. Kuitenkin kaikilla aineellisilla eristeillä on olemassa oma läpilyöntilujuus, jolla kuvataan suurinta sähkökentän voimakkuutta, jolla läpilyöntiä ei tapahdu. Kyseinen aineen läpilyöntilujuuden ylitys tarkoittaa sitä, että sähkökentän energia kasvaa niin suureksi, että se riittää irrottamaan atomeista tai molekyyleistä elektroneja kuljettamaan sähköä. Esimerkiksi ilman läpilyöntilujuuden ylittyminen ilmenee fyysisesti sähköisenä kipinäintinä tai valokaarena.

Ahorannan (2016, 110) mukaan läpilyönti tapahtuu, kun eristeessä syntyy voimakas virta liian voimakkaaksi kasvaneen sähkökentän aiheuttamana. Hän kertoo, että eristeen sähköinen lujuus kuvastaa kyseistä sähkökentän voimakkuutta, jolla läpilyönti tapahtuu. Tarkemmin sanoen jännitteen noustessa riittävän suureksi, alkaa eristeen atomeista irrota paljon elektroneja, jolloin yhtäkkäinen läpilyönti tapahtuu. Hänen mukaan sähköinen lujuus ilmoitetaan muodossa kilovolttia per millimetri (kV/mm). Esimerkkinä hän mainitsee ilman sähköiseksi lujuudeksi 3 kV/mm ja PVC-muovin sähköiseksi lujuudeksi 20 kV/mm.

Aron ym. (2015, 442) mukaan sähkölujuus kiinteällä eristeellä riippuu

- eristeen homogeenisuudesta ja jännitystilasta
- eristeen mitoista (paksuus, pinta-ala, tilavuus)
- testausolosuhteista (lämpötila, kosteus, lika, kaasun tai nesteen paine)
- eristeen kokemista mekaanisista, termisistä, sähköisistä sekä kemiallisista käsittelyistä ja rasituksista
- koejännitteestä ja sen noususuhdanteesta sekä taajuudesta

- testattavan eristeen asennuksesta (puristukset, raot)
- testauslaitteen mitoista ja ominaisuuksista (elektrodien muoto, pinta-ala, kaarevuudet ja lämmönjohtavuus)
- itse testausmenetelmästä ja sen ajallisesta kulusta.

Eristeen ominaisuuksiin ja ominaisarvoihin vaikuttaa eristeen materiaalin lisäksi myös eristeen fyysiset mitat, kuten esimerkiksi eristeen paksuus, joten myös eristeen mitat on otettava huomioon sopivaa eristystä suunniteltaessa (Aro ym. 2015, 441).

3.5 Eristysvastuksen mittaaminen

Eristysvastuksen eli eristysresistanssin mittaamisella tutkitaan sähköeristeiden eristysominaisuuksia sekä eristeen kuntoa ja näin ollen tehdään johtopäätöksiä eristeen turvallisuudesta. Yksinkertaisimmissa eristysvastusmittareissa elektroniset piirit synnyttävät tarvittavan mittausjännitteen mittarin paristojännitteestä. Mittausjännitettä voidaan säätää, ja yleisimmät mittausjännitteet ovat 100 V, 250 V, 500 V ja 1 000 V. Käytettävä mittausjännite valitaan mittauskohteen nimellisjännitteen mukaan. (Ahoranta 2016, 66.)

Eristysrakenteiden on oltava riittävän suuria sähkölujuudeltaan ja mekaaniselta lujuudeltaan, jotta ne täyttävät vaatimuksensa ja suoriutuvat tehtävästään. Eristysrakenteen kunnan arvioimisessa tärkeimpinä kriteereinä ovatkin juuri sähkölujuus ja mekaaninen lujuus. Korkeajännitteisen laitteen kunnan seurantaan käytetään eristeen toimintakyvyn kannalta merkittäviin ominaisuuksiin epäsuorasti liittyviä suureita, joita voidaan mitata mahdollisimman yksinkertaisesti ja luotettavasti. Tämän työn osalta tärkein tällainen epäsuora suure on eristysresistanssi. (Aro ym. 2015, 190.)

Eristysresistanssin mittauksia suoritetaan yleensä eristeiden vaurioiden ja ikääntymisen aiheuttaman kunnan heikkenemisen seuraamiseksi sekä käyttöönottotarkistusten yhteydessä talosähköpuolella sekä suurjännitetekniikassa (Chauvin-Arnoux, [viitattu 15.3.2019]).

Fluken (2015) mukaan eristeille tehtäviä eristysvastuksen testausmittauksia suoritetaan ennen kaikkea yleisen turvallisuuden takia, jolloin hengenvaarallisia ja mahdollisesti tulipaloon johtavia oikosulkuja pystytään ennaltaehkäisemään. Lisäksi eristysvastusten testaamisella suojataan ja pidennetään sähköjärjestelmien ja -moottoreiden käyttöikä. Eristysvastusmittauksen mittausmenetelmä tulee kuitenkin määritellä tarkistettavan laitteiston sekä tarkistuksen syyn mukaisesti.

Tämän työn osalta eristysresistanssin mittaus kuitenkin perustuu siihen, että ovatko sähkö- ja hybridiajoneuvojen korkeajännitejärjestelmän eristeet turvallisia ja vaatimusten mukaisia, jotta järjestelmälle tai ajoneuville voidaan myöntää tyyppihyväksyntä niiden osalta.

Aron ym. (2015, 191) kertovat, että eristysresistanssin mittaamisella voidaan myös havaita eristeen vaurioita, joita esimerkiksi kosteus on saattanut eristeelle aiheuttaa. He kertovat, että muutaman kilovoltin jännitteellä suoritettava eristysresistanssin mittaus ei vaadi kalliita laitteistoja sekä se on myös nopea suorittaa. Eristysresistanssin mittauksesta ei heidän mukaan kuitenkaan voi tehdä kovinkaan syvällisiä johtopäätöksiä eristeiden kunnosta.

Aron ym. (2015, 191) mukaan eristysvastuksen mittauksessa mittaustuloksena käytetään yleensä mittauksen aloittamisesta 1 minuutin kuluttua saatavaa eristysresistanssin arvoa.

Laadunvalvontasyistä suoritettavassa eristysvastustestauksissa mittaustuloksia otetaan yleensä viisi. Näytteiden ottomäärää lisätään viidellä, jos ensimmäisessä jaksossa yhden mittaustuloksen lukema poikkeaa yli 15 % mediaanista. (Aron ym. 2015, 442.)

Aron ym. (2015, 443) mukaan eristysvastuksen kunnan testausmenetelmiä ovat

- jännitteen nosto nopeasti 10 - 20 sekunnin ajan, nostonopeus yleensä 500 V/s
- kahdenkymmenen sekunnin porrasmenetelmä: testausaika kullakin jännitetasolla 20 s.
- jännitteen nosto hitaasti 120 - 240 s vakionopeudella
- kuudenkymmenen sekunnin porrasmenetelmä: testausaika kullakin jännitetasolla 60 s

- jännitteen nosto erittäin hitaasti 300 - 600 s, jännitteen nostonopeus 1 - 200 V/s.

3.6 E-säännön numero 100 mukainen eristysvastuksen mittaaminen

Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission säännön (UN/ECE) 2015/505 nro 100 liitteessä 4A kerrotaan, että "Ajoneuvon kunkin korkeajänniteväylän eristysresistanssi on mitattava tai määritettävä laskemalla korkeajänniteväylän kunkin osan tai yksikön mittaustulosten perusteella". Eli siis jokaiselle korkeajänniteväylälle sähkö- ja hybridiajoneuvoissa tulee suorittaa kyseisen E-säännön vaatimat mittaukset erikseen.

UNECE R100 -säännön puitteissa tehtävät eristysvastuksen mittaukset voidaan suorittaa kahdella eri tavalla, jotka perustuvat jännitteellisten osien sähkövarauksen mittaamiseen tai eristysvastuksen mittaamiseen. Ennen mittauksia on kuitenkin selvitettävä mitattavan virtapiirin jännitealue. Laitteistoon voidaan tehdä erotusvastuksen mittaamiseen tarvittavia muutoksia. Jos eristysvastusmittauksessa mitattavat arvot eivät ole vakaita, voidaan järjestelmään tehdä mittauksen vaatimat muutokset esimerkiksi poistamalla epävakauden aiheuttaja tai keskeyttää sen toiminta. Tällöin on kuitenkin esitettävä, ettei muutos vaikuta jännitteellisten osien ja sähköisen alustan väliseen eristysresistanssiin. (UNECE R100.)

Kaksi annettua tapaa mitata eristysvastus ovat "mittaus käyttäen ajoneuvon ulkopuolelta saatavaa virtaa" sekä "Mittaus käyttäen ajoneuvon omaa REESS-järjestelmää tasajännitelähteenä". (UNECE R100).

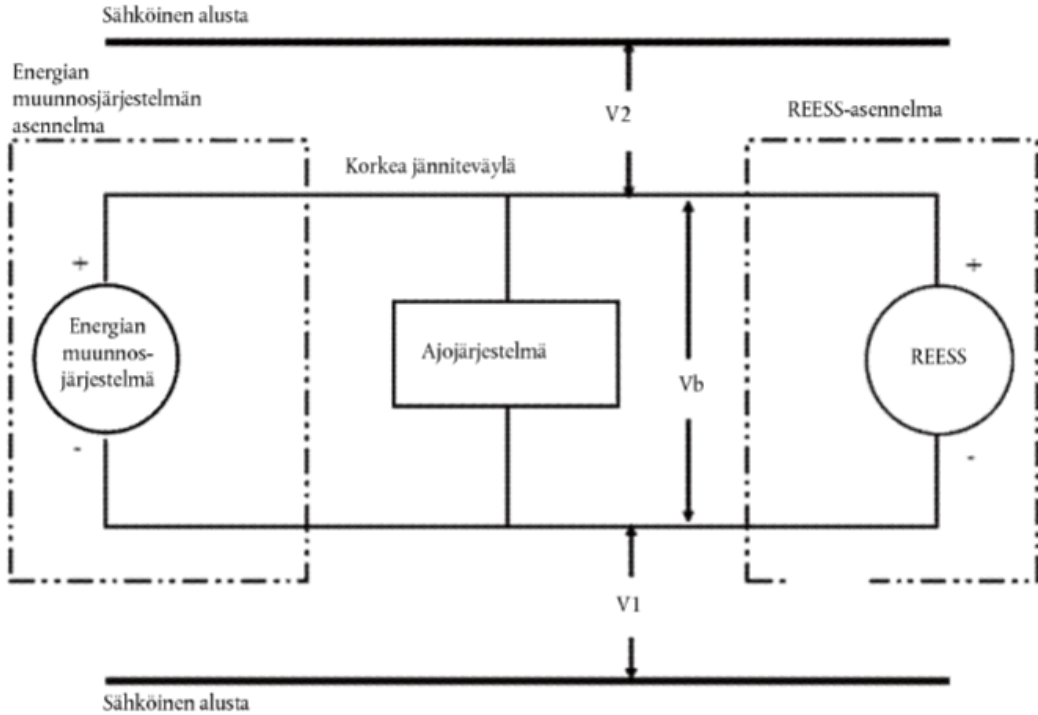
Mittauksessa, jossa käytetään ajoneuvon ulkopuolelta saatavaa virtaa, "on käytettävä välinettä, johon voidaan johtaa tasavirta, jonka jännite on suurempi kuin korkeajänniteväylän toimintajännite". Eristysvastuksen mittaus tällä menetelmällä tapahtuu siten, että ajoneuvon jännitteellisten osien ja sähköisen alustan välille kytketään eristysresistanssin mittauslaite. Ajoneuvon jännitteellisten osien ja sähköisen alustan välinen eristysvastus mitataan korkeajänniteväylän toimintajännitteen tasosta enintään puolet pienemmällä tasajännitteellä. Kuitenkin jos mitattavassa jär-

jestelmässä on useita eri jännitealueita, eivätkä kaikki järjestelmän kaikki komponentit kestä koko muun piirin jännitettä, voidaan näiden komponenttien ja sähköisen alustan välinen eristysvastus mitata erikseen osien komponenttien ollessa irti kytkettyinä. (UNECE R100.)

Toinen vaihtoehto jännitteellisten osien ja sähköisen alustan välisen eristysvastuksen mittaamiseen on ”Mittaus käyttäen ajoneuvon omaa REESS-järjestelmää tasajännitelähteenä”. Tällöin korkeajänniteväylään syötetään virtaa ajoneuvon omasta energiavarastosta, jolloin korkeajänniteväylän ja energiavaraston jännite on oltava vähintään ajoneuvon valmistajan ilmoittaman toimintajännitteen tasolla koko mittauksen ajan. (UNECE R100.)

Tämän eristysvastusmittauksen suorittamiseen tulee käyttää jännitemittaria, jolla mitataan testissä tasavirta-arvoja, sekä lisäksi mittarin sisäisen resistanssin tulee olla 10 MΩ. Mittaustapahtuma suoritetaan viidessä vaiheessa, joista saatujen tulosten avulla lasketaan eristysresistanssi kaavan (12) mukaan. (UNECE R100.)

Ensimmäisessä vaiheessa ”jännite mitataan kuvion 1 osoittamalla tavalla, ja korkeajänniteväylän jännite (V_b) kirjataan. Arvon (V_b) on oltava vähintään ajoneuvon valmistajan ilmoittama REESS-järjestelmän ja/tai energianmuunnosjärjestelmän nimellistoimintajännite”.



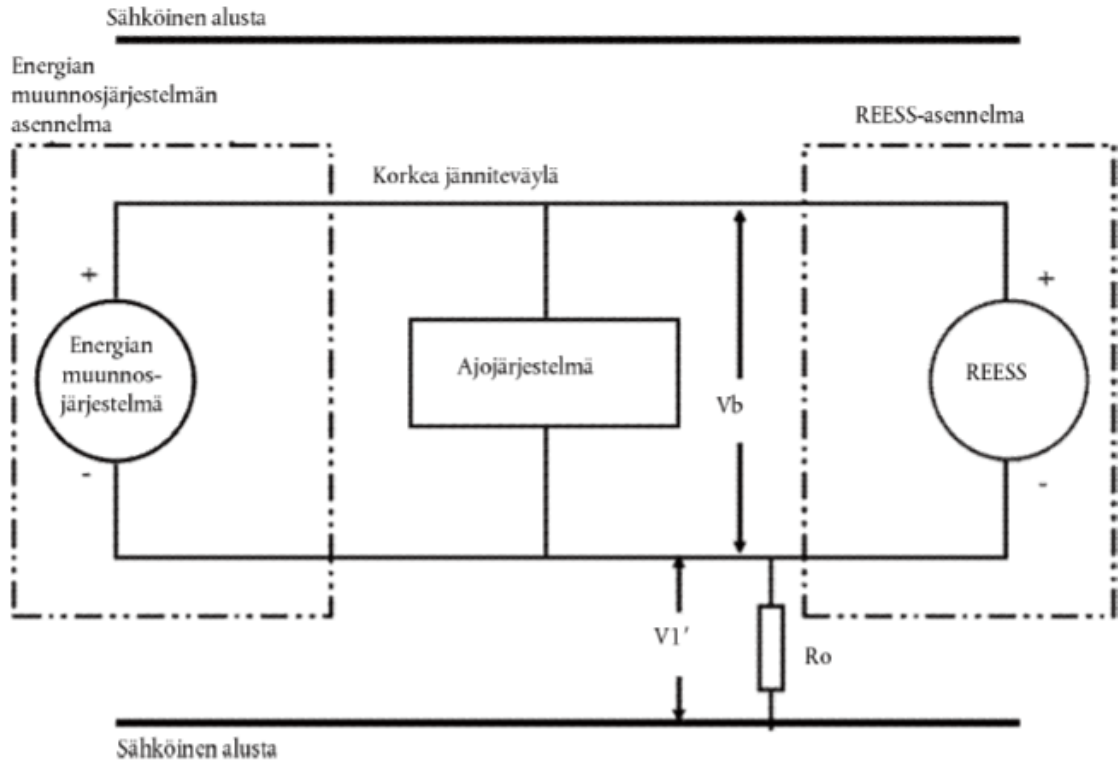
Kuvio 1. Arvojen (V_b), (V_1) ja (V_2) mittaaminen (UNECE R100).

Toisessa vaiheessa "mitataan ja kirjataan korkeajänniteväylän negatiivisen puolen ja sähköisen alustan välinen jännite (V_1)" kuvion 1 mukaisesti (UNECE R100).

Kolmannessa vaiheessa "mitataan ja kirjataan korkeajänniteväylän positiivisen puolen ja sähköisen alustan välinen jännite (V_2)" kuvion 1 mukaisesti (UNECE R100).

Neljännessä vaiheessa edetään siten, että:

jos (V_1) on suurempi tai yhtä suuri kuin (V_2), korkeajänniteväylän negatiivisen puolen ja sähköisen alustan väliin asetetaan tunnettu normiresistanssi (R_o). Kun (R_o) on asennettuna, mitataan korkeajänniteväylän negatiivisen puolen ja sähköisen alustan välinen jännite (V_1') kuvion 2 mukaisesti (UNECE R100.)



Kuvio 2. Arvon (V_1') mittaaminen (UNECE R100).

Tämän jälkeen lasketaan sähköinen erotus (R_i) kaavan (10) mukaisesti.

Sähköinen erotus määritetään kaavalla

$$R_i = R_o * \left(\frac{V_b}{V_1'} - \frac{V_b}{V_1} \right), \quad (10)$$

missä

R_i on sähköinen erotus

R_o on tunnettu normiresistanssi

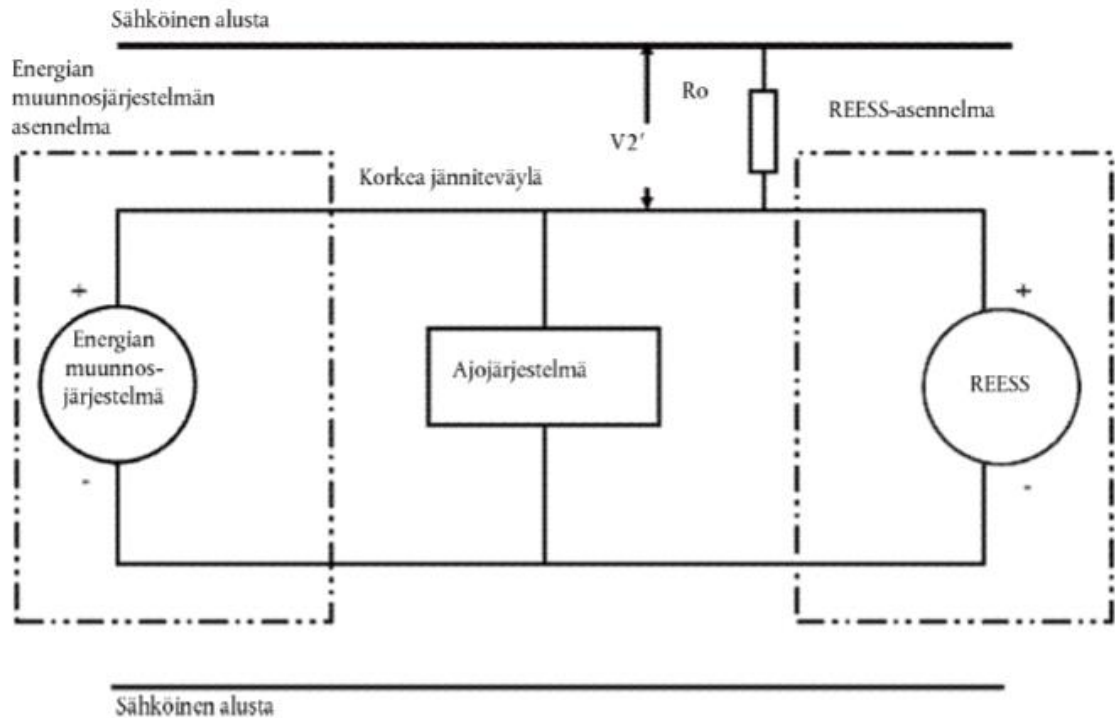
V_b on korkeajänniteväylän jännite

V_1 on korkeajänniteväylän negatiivisen puolen ja sähköisen alustan välinen jännite

V_1' on korkeajänniteväylän negatiivisen puolen ja sähköisen alustan välinen jännite normivastus (R_o) asennettuna

Jos puolestaan:

(V_2) on suurempi tai yhtä suuri kuin (V_1), korkeajänniteväylän positiivisen puolen ja sähköisen alustan väliin asetetaan tunnettu normiresistanssi (R_o). Kun (R_o) on asennettuna, mitataan korkeajänniteväylän positiivisen puolen ja sähköisen alustan välinen jännite (V_2') (kuvio 3). Sähköinen erotus (R_i) lasketaan esitetystä kaavasta (11): Sähköisen erotuksen arvo (R_o) (Ω) jaetaan korkeajänniteväylän nimellisellä toimintajännitteellä (V_b)(V). (UNECE R100.)



Kuvio 3. Arvon (V_2') mittaaminen (UNECE R100).

Sähköinen erotus määritetään kaavalla

$$R_i = R_o * \left(\frac{V_b}{V_2'} - \frac{V_b}{V_2} \right), \quad (11)$$

missä

R_i on sähköinen erotus

R_o on tunnettu normiresistanssi

V_b on korkeajänniteväylän jännite

V_2 on korkeajänniteväylän positiivisen puolen ja sähköisen alustan välinen jännite

V_2' on korkeajänniteväylän positiivisen puolen ja sähköisen alustan välinen jännite normivastus (R_o) asennettuna

Viidennessä vaiheessa lasketaan eristysresistanssi kaavan (12) mukaisesti jakamalla sähköisen erotuksen (R_o) (Ω) arvo korkeajänniteväylän toimintajännitteellä (V_b) (V). Huomion arvoisena seikkana sähköisen erotuksen (R_o) tulisi olla alhaisimman vaaditun eristysresistanssin arvo kerrottuna ajoneuvon toimintajännitteellä ± 20 %. Tällaista R_o -arvoa käyttämällä saadaan jännitemittauksille hyvä tarkkuus, mutta R_o -arvon ei kuitenkaan tarvitse olla täsmälleen kuten edellä esitetty. (UNECE R100.)

Eristysresistanssi määritetään kaavalla

$$R = \frac{R_i}{V_b}, \quad (12)$$

missä

- R on eristysresistanssi
- R_i on sähköisen erotuksen arvo
- V_b on korkeajänniteväylän jännite

3.7 Akkutekniikka

Perinteinen ratkaisu varastoida energiaa kulkuneuvoissa on erilaisten akkutekniologioiden käyttäminen. Akku on eräänlainen sähkökemiallinen järjestelmä, jossa tapahtuu kemiallisia reaktioita akun lataamisen ja purkamisen aiheuttamana. (Hietalahti 2011, 95.)

Akut koostuvat positiivisesta ja negatiivisesta elektrodista (katodi ja anodi), elektrolyytistä jonka tehtävänä on johtaa ioneja sekä erottimesta, joka erottaa elektrodit toisistaan. Erilaiset akut jaetaan lyijy-, litium- ja alkaliakkuihin käytetyn akkuteknologian mukaan. (Ahoranta 2016, 314.)

Tavanomaisissa polttomoottoriautoissa sähköisenä energiavarastona käytetään yleisesti perinteistä lyijyakkua yksinkertaisuutensa ja edullisuutensa vuoksi, mutta koska niiden hyötysuhde suurilla virroilla on alhainen ja myös elinikä suhteellisen lyhyt, on kehittyneemmät akkuteknologiat, erityisesti nikkeli-metallihybridi- sekä litiumioniakut yleistyneet sähkö- ja hybridiajoneuvoissa. Näiden kehittyneempien akkutekniologioiden etuja lyijyakkuihin verrattuna ovat suurempi energia- ja tehotehiys, parempi hyötysuhde sekä pidempi käyttöikä. (Hietalahti 2011, 100.)

Akkujen lataus-purkaussyklien määrä vaikuttaa eniten akun elinikään. Akuissa, joissa toiminta perustuu kemialliseen reaktioon, jokainen lataus- ja purkukerta kuluttaa akkua. Esimerkiksi lyijyakuille korkea lämpötila sekä jatkuvat lataus-purkaussykliä aiheuttavat lyijyelektrodien sulfatoitumista heikentäen akun kapasiteettia, ja samantapaista kulumista tapahtuu NiMH- (nikkeli-metallihybridi) ja Li-ion-akuissa, joissa elektrodeissa tapahtuu eräänlaista pilaantumista tai elektrolyyttiin sekoittuu epäpuhtauksia heikentäen varastointikapasiteettia. Akku katsotaan loppuun kulu-neeksi, kun sen täyteen varaaminen jää alle 80 % kapasiteetista verrattuna uuteen

akkuun. Akun elinikä on myös suuresti riippuvainen akun käyttötavasta ja -olosuhteista, sekä akun huoltamisesta ja kunnossapidosta. (Hietalahti 2011, 103–104.)

Akun kapasiteetti ilmaisee, kuinka monta tuntia täyteen varattua akkua voidaan kuormittaa tietyn suuruisella virralla siihen asti, kunnes akun jännitetaso laskee minimijännitteen tasolle. Kapasiteetin ilmaisuun käytetään yleisesti ampeeritunteja (Ah). (Hietalahti 2011, 102.)

Nykyään akkujen kehitystyö painottuu lähinnä akkujen viiden tärkeimmän ominaisuuden väliseen optimointiin, jotka ovat teho, energia, hinta, turvallisuus ja elinikä. Jos akun tehotiheyttä halutaan nostaa, joudutaan myös akun jännitettä nostamaan, joka puolestaan lyhentää akun elinikää ja turvallisuutta sekä kasvattaa valmistuskustannuksia. Jos puolestaan akun energiatiheyttä halutaan parantaa, kärsii puolestaan akun tehotiheys. Jos akun kaikkia fyysisiä ominaisuuksia halutaan parantaa, kasvavat akun valmistuskustannukset huomattavasti. Näistä syistä jokainen akkukennotyyppi on ominaisuuksiltaan yksilöllinen ja eräänlainen ominaisuuksien kompromissi, joka voi olla optimoitu esimerkiksi energia- tai tehokennoksi tarpeen mukaan. (Hietalahti 2011, 101.)

Sähkö- ja hybridiajoneuvoissa käytettävät suuret akustot tarvitsevat rinnalleen aina tarkoituksenmukaista hallintaelektroniikkaa (BMS, Battery Management System). Hallintaelektroniikka informoi muita ajoneuvon ohjausyksiköitä sekä kuljettajaa akkujärjestelmän tilasta. Akkujärjestelmän tilan informoiminen on tärkeää, koska hyvä hallintaelektroniikka pidentää akun elinikää sekä varmistaa akuston käyttöturvallisuuden, joka pitää sisällään yleisen sähköturvallisuuden sekä suojauksen vikatilanteissa. (Hietalahti 2011, 101.)

Sähkö- ja hybridiajoneuvojen energiavarastot mitoitetaan yleensä tarvittavan sähköisen huipputehon mukaan. Tällä tavalla mitoitettu akku on energiakapasiteetiltaan useimmiten todellista energiatarvetta huomattavasti suurempi. Tämä taas johtaa siihen, että akun energiakapasiteetista käytetään syklin aikana vain pieni osa, joka puolestaan voi jopa moninkertaistaa akun käyttöikänsä. (Hietalahti 2011, 102.)

Lyijyakut. Perinteisiä lyijyakkuja käytetään ajoneuvoissa polttomoottoreiden käynnistysakkuina ja varavoima-akkuina. Lyijyakkujen tyypeistä ajoneuvokäytössä on erityisesti tehoakku, joka pystyy antamaan hetkellisesti suurta virtaa, mitä esimerkiksi polttomoottorin käynnistäminen vaatii. (Ahoranta 2016, 320.)

Lyijyakun anodina toimii huokoinen lyijylevy (Pb) ja katodina puolestaan lyijyoksidilevy (PbO₂). Lyijyakkujen elektrolyytinä toimii tislattun veden (akkuvesi) ja rikkihapon liuos (H₂SO₄), ja se tuottaa elektrodien välillä kulkevat ionit. Elektrodien välille tulevat erotinlevyt tai -matot eristävät anodin ja katodin toisistaan mutta eivät estä ionien kulkua. (Ahoranta 2016, 321.)

Lyijyakku purettaessa sen anodi ja katodi reagoivat elektrolyytin rikkihapon kanssa muodostaen lyijysulfaattia, vettä ja sähköenergiaa. Akku varattaessa se toimii päinvastoin, eli ulkoisesta jännitelähteestä syötetty sähköenergia muuttaa lyijysulfaatin ja veden takaisin lyijyksi, lyijyoksidiksi sekä rikkihapoksi. Lyijyakun ollessa pitkään käyttämättömänä sen lyijysulfaatti alkaa kiteytyä eikä täten ota enää osaa kemiallisiin prosesseihin, minkä seurauksena akun kapasiteetti sekä virrananto- ja vastaanottamiskyky heikkenevät. (Ahoranta 2016, 321.)

Lyijyakku ladataan monivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa latauslaite syöttää akkuun korkeampaa vakiovirtaa, kunnes kennojännite nousee varausjännitteen maksimiarvon tasolle. Kun varausjännitteen maksimiarvo on saavutettu, lasketaan latausvirtaa, kunnes akku on täyteen varattu. Kolmannen vaiheen ylläpitolataus korvaa itsestään purkautumisen ja säilyttää akussa täyden varauksen. Automaattiset latauslaitteet säätävät varausjännitteen ja -virran akun varaustilan mukaisesti sopivalle tasolle. (Ahoranta 2016, 321.)

Ahorannan (2016, 322) mukaan lyijyakun kapasiteetti ilmoitetaan sähkömääränä, joka akusta saadaan käyttöön tietyssä ajassa alittamatta akun loppujännitettä.

Litiumioniakut. Yhä tehokkaammat ja turvallisemmat litiumioniakut ovat yleistyneet nopeasti, aluksi niitä käytettiin lähinnä kannettavissa elektroniikkalaitteissa, akkukoneissa ja kameroissa, mutta nyt niitä käytetään yhä enemmän myös ajoneuvoissa ja teollisuudessa (Ahoranta 2016, 316).

Ahorannan (2016, 316) mukaan litiumakkujen etuja ovat niiden korkea kennojännite, 3,2 - 3,5 V, tasainen purkauskäyrä, korkea virranantokyky ja alhainen itsestään purkautuminen. Ne tarvitsevat kuitenkin suojakseen turvapiirin, joka valvoo akun lämpötilaa ja kennojännitettä sekä estää kennojen ylilatauksen ja liiallisen purkautumisen.

Täyteen ladatussa litiumioniakussa litiumatomit ovat anodin huokoisessa grafiitissa, ja puretussa akussa katodin litiummetallioksidissa. Litiumioniakkua ladattaessa positiivisesti varautuneet litiumionit kulkevat johtavan elektrolyytin välityksellä positiivisesta katodista negatiiviseen anodiin. Akkua purettaessa ionit liikkuvat päinvastaiseen suuntaan. (Ahoranta 2016, 316.)

Litiumioniakkujen elektrolyytti on litiumsuolaliuosta, ja yleisimmin käytetty katodin metallioksidimateriaali on litiumkobolttioksidia (LCO, LiCoO_2). Litiumakkujen elektrodimateriaali vaikuttaa olennaisesti sen suorituskykyyn ja ominaisuuksiin, ja materiaaleja kehittämällä on saatu parannettua akkujen elinikää, latausaikoja, virranantokykyä, lämpötilakestoisuutta ja ennen kaikkea akkujen turvallisuutta. (Ahoranta 2016, 316–317.)

Alhaisessa lämpötilassa litiumioniakun toiminta heikkenee, minkä seurauksena akun kapasiteetti sekä liitinjännite laskevat. Litiumioniakun sisäinen resistanssi pienentää liitinjännitettä entisestään purkausvirran kasvaessa. (Ahoranta 2016, 317.)

Litiumioniakkujen litium sopii hyvin elektrodimateriaaliksi, koska se on jaksollisen järjestelmän kevyin ja elektronegatiivisin materiaali. Litiumioniakun korkea ominaisjännite ja keveys mahdollistavat sille hyvän energiatiheyden. Litiumioniakkujen tutkimukset painottuvat erityisesti erilaisten elektrodimateriaalien tutkimiseen ja kehittämiseen, joissa akkukennojen käyttöturvallisuuden varmistaminen on erityisen tärkeää varsinkin käytettäessä mahdollisimman halpoja materiaaleja, samalla myös optimoiden akun energia- ja tehosiheyttä. (Hietalahti 2011, 104.)

Litiumioniakuissa eniten käytetty elektrodimateriaali kobolttioksidi on käytössä erityisesti pienissä akkusovellutuksissa, kuten kannettavissa tietokoneissa ja matkapuhelimissa. Ajoneuvojen litiumioniakkuihin on pyritty kehittämään muita vaihtoehtoja kobolttioksidille, sillä koboltti on suhteellisen kallista materiaalia sekä sen käyt-

töön liittyy vakavia sähköturvallisuusriskejä; jos kobolttioksidikenno menettää stabi-
liteettinsa, elektrodin vapaa happi voi sytyttää akun aggressiivisesti tai jopa räjäh-
dysmäisesti palamaan. Kobolttioksidin sekaan voidaan seostaa muun muassa nik-
keliä, alumiinia tai mangaania turvallisuuden parantamiseksi sekä hinnan laske-
miseksi. Myös rautafosfaatin tai mangaanioksidin ja litiumin yhdisteet elektrodimate-
riaaleissa ovat paljon tutkittuja akkukemioita sekä hyviä vaihtoehtoja käytettäväksi
ajoneuvojen akkutyypeiksi. (Hietalahti 2011, 104.)

Hietalahden (2011, 103) mukaan litiumioniakun elinikää pystytään pidentämään
myös käyttämällä akkua hyvin kapealla varaustila-alueella, jolla käyttökertaikää pys-
tytään kasvattamaan parhaimmillaan jopa satoihin tuhansiin sykleihin.

4 MITTAUSTEKNIikka

Ihmisten päivittäiseen toimintaan ovat kuuluneet erilaiset mittaukset läpi historian. Ihmisten arkipäiväiset toimet ja tapahtumat sisältävät paljon erilaista mittaamista. Yksinkertaisimmillaan ne ovat esimerkiksi ruokatuotteiden painon tai tilavuuden mittaamista, ja monimutkaisimmillaan ne voivat olla esimerkiksi Mars-tutkimusta tekevän Curiosity-robotin suorittamia alkuaine-analysointimittauksia. Lähes kaikki teknologian avulla saamamme informaatio perustuu jonkinlaiseen mittaukseen ja sen tuloksiin. (Keinänen & Järvinen 2014, 9.)

Halutun lopputuloksen, esimerkiksi teknisten piirustusten mukainen kappale, saavuttamisen varmistamiseksi on tehtävä mittauksia eri mittausmenetelmillä. Tällä tavoin saadaan myös selville, kuinka paljon korjausta lopputulos vaatii. Luotettava mittaustulos edellyttää kaikkien mittaamattomien seikkojen huomioimista. (Keinänen & Järvinen 2014, 9.)

Pahimmassa tapauksessa väärin tehty tai toteutettu mittaus johtaa virheelliseen päätelmään, jota kuitenkin käsitellään oikeana tietona tai lopputuloksena. Tästä voi seurata esimerkiksi teollisuudessa tai terveydenhuollossa vakavia ja korvaamattomia seuraamuksia. (Keinänen & Järvinen 2014, 9.)

Tässä osiossa käsitellään mittaustekniikkaa työn kannalta oleellisista näkökulmista, painottuen työn kannalta oleellisimpaan mittaamiseen, joka on sähköeristeiden eristysvastuksen mittaaminen sekä mittausepävarmuuden määrittäminen kyseisille mittauksille ohjeen "EA-4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration" mukaisesti, jota myös työn toimeksiantajana toimiva akkreditoitu testauslaboratorio Oy Testmill Ltd käyttää apunaan mittausepävarmuuden määrittämisessä.

4.1 Mittaustekniikan käsitteitä

Mittauslaite, mittalaite, mittausväline tai mittari ovat nimityksiä laitteelle, jolla mitattavasta suureesta saadaan mittauksen tulokset esille. Mittauslaitteella tehtävissä

mittauksissa verrataan mittauskohteen fyysisiä arvoja ja ominaisuuksia reaalimaailman kohteisiin ja tapahtumiin. Pysyviä, ennalta määritettyjä vakiokohteita ja tapahtumia käytetään mittaussyksikköinä, ja mittauksen tulos ilmoitetaan mitatun kohteen ja vertailuyksikön suhteen arvona. Mittauksia voidaan tehdä esimerkiksi mekaanisesti tai optisesti. (Keinänen & Järvinen 2014, 11.)

Tämän työn kannalta oleelliset mittarit ovat yleismittarit, joilla voidaan mitata mm. tasa- ja vaihtovirtaa sekä -jännitettä, eristysvastusmittarit joilla pystytään mittaamaan erityisen suuria resistanssiarvoja sekä vastusmittarit alhaisten resistanssiarvojen lukemiseen. Mittausolosuhteiden tutkimiseen sekä mittausepävarmuuden määrittämiseen käytetään apuna myös lämpömittaria sekä kosteusmittaria.

Suureen avulla pystytään ilmaisemaan jonkin esineen tai asian mitattavaa ominaisuutta, esimerkiksi pituutta tai painoa. Suureen lukuarvo ilmoitetaan mitatun lukuarvon ja mittayksikön kertolaskuna. Parametri eli muuttuja ilmoittaa mitattavan esineen tai asian lukuarvoa. (Keinänen & Järvinen 2014, 11–12.)

Kansainvälinen paino- ja mittaustoimisto BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) (2006) on määrittänyt ja standardoinut mittasuureet ja niiden yksiköt SI-järjestelmään. SI-järjestelmässä on määritettyinä muun muassa seitsemän perusmittayksikköä, jotka ovat

- pituus, yksikkönä metri (m)
- massa, yksikkönä kilogramma (kg)
- aika, yksikkönä sekunti (s)
- sähkövirta, yksikkönä ampeeri (A)
- lämpötila, yksikkönä kelvin (K)
- aineen määrä, yksikkönä mooli (mol)
- valon voimakkuus, valovoima, yksikkönä kandela (cd).

Tämän työn kannalta oleelliset perusyksiköt ovat aika, sähkövirta, pituus ja lämpötila.

Ajan yksikkönä käytettävä sekunti on määritetty siten, että se on 9 192 631 770 kertaa sellaisen säteilyn jaksonaika, joka vastaa cesium 133 -atomin siirtymää perustilan ylihienorakenteen kahden energiatason välillä (The International System of Units (SI) 2006).

Sähkövirran määrää ilmaistaan ampeerilla, joka on sellainen ajallisesti muuttumaton sähkövirta, joka kulkiessaan kahdessa suorassa yhdensuuntaisessa, äärettömän pitkässä ja ohuessa johtimessa, joiden poikkileikkaus on ympyrä ja jotka ovat yhden metrin etäisyydellä toisistaan tyhjiössä, aikaansaa johtimien välille $2 \cdot 10^{-7}$ newtonin (N) voiman johtimen metriä kohti. (The International System of Units (SI) 2006).

Pituutta ilmaistaan metreinä, joka on sellaisen matkan pituus, jonka valo kulkee tyhjiössä 1/299 792 458 sekunnissa (The International System of Units (SI) 2006).

Lämpötilan yksikkönä käytetään kandelaa, joka on sellaisen säteilijän valovoima, joka lähettää tiettyyn suuntaan monokromaattista $540 \cdot 10^{12}$ hertsin (hz) taajuisia säteilyä ja jonka säteilyintensiteetti on tähän suuntaan 1/683 wattia steradiaania kohti (The International System of Units (SI) 2006).

4.2 Mittausepävarmuus ja mittausvirhe

Erilaisten mittausten suorittaminen absoluuttisen tarkasti ei ole parhaimmilla ja tarkimmillakaan laitteilla mahdollista, eli saadut mittaustulokset ovat aina jonkin verran virheellisiä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että mittaustuloksia tarvitsisi pitää virheellisinä tai epäluotettavina. (Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

Mittausvirhe tarkoittaa mitattavan suureen todellisen arvon ja mittaamalla saadun arvon eroa. Tekemällä toistomittauksia samasta mitattavasta suureesta voidaan mittausvirheen suuruudelle antaa arvio. Jos jostain syystä toistomittausten tekeminen ei ole mahdollista, ei mittausvirheestä voida antaa arviota. Mittausvirheet jaotel-

laan kolmeen eri ryhmään eri syistä syntyvien mittausrvirheiden mukaan. nämä ryhmät ovat karkea virhe, systemaattinen virhe sekä satunnainen virhe. (Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

Karkea virhe. Mittaustulosten karkea virhe tai inhimillinen virhe tarkoittaa käytännössä samaa kuin arkikielellä puhuttaessa virheellä. Sellaiset mittaustulokset pyritään hylkäämään, joissa epäillään karkeaa virhettä. Karkeita virheitä syntyy esimerkiksi virheellisestä mitta-asteikon lukemisesta, mittalaitteen toimintahäiriöistä sekä tietojen tallennuksen virheistä. Kuitenkin jos mittaajalla ei ole kunnollista käsitystä siitä, mistä erikoinen mittausrarvo saattaisi johtua, ei mittausrpistettä saa hylätä. (Keinänen & Järvinen 2014, 95; Hiltunen ym. 2011, 42.)

Karkeita virheitä voidaan Hiltusen ym. (2011, 42) mukaan vähentää huolellisella työskentelyllä. Havaitut karkeat virheet hylätään tulosten joukosta tai niiden yhteydessä huomautetaan mahdollisesta virheestä.

Systemaattinen virhe. Systemaattinen virhe syntyy käytetystä mittausrlaitteesta tai -menetelmästä. Esimerkiksi teräsmittanauhan käyttö korkeassa lämpötilassa voi teräksen lämpölaajenemisen myötä näyttää liian pieniä lukemia. Tällainen systemaattinen virhe on kuitenkin mahdollista poistaa kalibroimalla mittalaitte standardien mukaisesti. (Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

Satunnainen virhe. Mittauksissa on aina mukana satunnainen eli tilastollinen virhe. Mittalaitteen tarkkuuden kasvaessa myös satunnaisen virheen osuus kasvaa, mutta ei aiheuta harhaa mittausrtuloksiin, mikäli mittauksen toistomäärä on riittävän korkea, sillä eri suuntiin olevat virheet kumoavat toisiaan. Satunnaiselle mittausrvirheelle voidaan laskea myös arvio, jos kyseessä on kokeellinen tutkimus. (Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

Keinänen ja Järvinen (2014, 96–97) luettelevat teoksessaan erilaisia tekijöitä, mitkä aiheuttavat mittausrvirheitä. Kyseisiä tekijöitä ovat mittalaitteesta, mittaajasta, työkalusta ja ympäristötekijöistä johtuvat virheet, joita on tarkennettu seuraavissa luetteloissa.

Mittalaitteesta johtuvia virheitä ovat

- mittalaitteen väärinlukeminen, ns. parallaksivirhe sekä lukematarkkuuden lukuvirheet
- lämpöpiteneimisvirhe, esimerkiksi käsilämmön siirtymisen aiheuttama lämpölaajeneminen
- mittalaitteen kunnan heikentymisestä johtuva virhe, jota voidaan pienentää kalibroimalla mittalaite
- mittalaitteen epäpuhtaudesta aiheutuva virhe
- väärän mittausvoiman aiheuttama virhe.

Mittaajasta johtuvia virheitä ovat

- mittaajan heikentynyt näkökyky
- mittauksen suorittaminen liian kiireellisesti tai hätiköidysti
- mittaajan puutteellinen ammattitaito
- huonosta mittausohjeesta johtuva väärän mittausvälineen tai -menetelmän käyttö
- mittaajan motivaation tai vireystason heikkous.

Työkappaleesta johtuvia virheitä ovat

- poikkeuksellisen suuri tai pieni kappaleen koko
- liian karkea pinnanlaatu
- vaikeasti mitattava tai huonossa asennossa oleva kappale
- mittaajalle tuntematon tai liian pehmeä tai joustava materiaali
- työkappale on epäpuhdas
- työkappaleen kohonnut tai laskenut lämpötila.

Ympäristön aiheuttamia virheitä ovat

- liian heikko tai kirkas valaistus
- mittauskohteen epätoivottu liikkuminen
- ympäristön epäpuhtaudet
- ympäristön lämpötilan poikkeaminen virallisesta 20 °C:n mittauslämpötilasta.

Hiltusen ym. (2011, 42) mukaan erilaisia mittausvirheitä voi syntyä muun muassa

- väärästä mittalaitteen valinnasta
- väärin suoritetusta mittauksesta
- virheellisestä asteikon lukemisesta
- laskuvirheistä
- yksiköiden sekoittamisesta
- kirjoitusvirheistä tai epäselvistä merkinnöistä havaintoja tehdessä
- mittauslaitteiston hetkellisestä toimintavirheestä
- ympäristön olosuhteiden äkillisestä muutoksesta.

Mittausvirheellä on Aron ym. (2015, 448) mukaan suuruus sekä lukuarvo, mutta niitä ei aina tunneta. Näin ollen ennen mittaustulosten toteamista ja käyttöä tulee tunnetut mittausvirheet korjata.

4.2.1 Ympäristön olosuhteiden vaikutus mittauksiin

Mittausympäristön olosuhteet vaikuttavat olennaisesti mittaustuloksiin. Esimerkiksi tämän työn mukaisissa eristysvastuksen mittauksissa ympäristön (sekä mittauskohteen) lämpötila ja ilmankosteus vaikuttavat olennaisesti eristeiden ominaisuuksiin. Virallisten ja kaupallisten mittausten tulee myös olla jäljitettävissä kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin, mikä tarkoittaa katkeamatonta kalibrointien ketjua käytetystä mittausjärjestelmästä mittanormaaleihin tai kansainvälisiin vertailuihin. (Aro ym. 2015, 449.)

Keinäsen ja Järvisen (2014, 97) mukaan yksi merkittävimpiä mittausvirheitä aiheuttava tekijä on lämpötilan vaihtelu, joka tulisi vaativien mittausten toimintaympäristössä olla $20 \pm 0,5$ °C. Lisäksi he mainitsevat, että mittaustilan eri osissa lämpötila saa vaihdella enintään 2 °C sekä lämpötila saa muuttua enintään 0,3 °C tunnissa. Heidän mukaan mittauksia tehtäessä huomionarvoisia ympäristötekijöitä ovat

- lämpötila
- ilman kosteus
- värähtely
- valaistus
- puhtaus

- ilman väreily.

Muun muassa lämpötilan vaikutusta resistanssiin on käsitelty kappaleessa 3.3.1.

4.2.2 Mittausepävarmuus

Jokainen mittaus on tietyissä määrin epätäydellinen, eikä mittaustuloksesta voida tehdä syvällisempiä johtopäätöksiä ennen kuin tulokseen liittyvä mittausepävarmuus tunnetaan (Aro ym. 2015, 450; Hiltunen ym. 2011, 35).

Hiltusen ym. (2011, 35) mukaan mittausepävarmuuslaskelman tekemiseen on olemassa erilaisia ohjeita ja standardeja. Akkreditoidut kalibrointi- testauslaboratoriot, kuten tämän työn toimeksiantajana toimiva Oy Testmill Ltd, käyttävät apunaan ohjetta ”EA-4/02 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration”, johon myös tämän työn päämääriin kuuluva mittausepävarmuuden määrittäminen perustuu.

Kun tunnetut mittausvirheet on korjattu, jää jäljelle mittausepävarmuus, joka yhdessä mittaustuloksen kanssa ilmoittaa oikean arvon tietyllä todennäköisyydellä välillä mittaustulos \pm epävarmuus (Aro ym. 2015, 448).

Mittausepävarmuus tarkoittaa mittaustulosten vaihtelua ja ilmaisee, miten paljon saatu mittaustulos korkeintaan poikkeaa todellisesta arvosta tavallisessa tapauksessa ja ilmaisee myös arviota siitä, kuinka suuri mittausvirhe voi olla (Aro ym. 2015, 450; Keinänen & Järvinen 2014, 98; Hiltunen ym. 2011, 35).

Aron ym. (2015, 450) mukaan mittausepävarmuus kalibroinnissa riippuu

- kalibroinnin kohteena olevan laitteen tai järjestelmän ominaisuuksista
- mittanormaalien epävarmuudesta ja ominaisuuksista
- käytetystä mittausmenetelmästä
- ympäristön olosuhteista
- laskentaohjelmista.

Kun taas puolestaan varsinaisten mittausten epävarmuus riippuu edellisten lisäksi

- mittauskohteesta (kuormitus, virheellinen sovitus ym.)
- mittalaitteen tai -järjestelmän ryöminnästä (drift)
- mittausolosuhteista (lämpötila, ilmankosteus, häiriöt, käyttöjännite yms.)
- mittaajan käyttö- ja lukemavirheistä.

Määritetty tulos mittausepävarmuudesta sisältää rajat ($\pm u$), joiden sisällä odotetaan oikean arvon olevan, sekä todennäköisyyden (ts. luottamustason, kattavuuskertoimen), jolla oikea arvo on määritetyissä rajoissa (Aro ym. 2015, 450).

Aron ym. (2015, 450–451) sekä Hiltusen ym. (2011, 36) mukaan mittausepävarmuus ilmoitetaan tavallisesti kattavuuskertoimella $k = 2$, joka vastaa 95 % luottamustasoa/kattavuusväliä. Tämä tarkoittaa, että 95 % todennäköisyydellä oikea arvo on annetuissa mittausepävarmuuden rajoissa. Toisin sanoen samanlaisella mittausjärjestelmällä 95 % saaduista mittaustuloksista on annetuissa mittausepävarmuuden rajoissa.

Saxholmin ja lisakan (2018) mukaan määrittämällä mittaukselle mittausepävarmuus saadaan mittauksesta uskottavampi, pystytään vertailemaan erilaisia mittausmenetelmiä keskenään, mahdollistetaan mittausten jäljitettävyyden sekä saadaan tulosten käyttäjät samalle viivalle, sillä vaikka he eivät ennestään tunne tarkemmin käytettyä menetelmää, pystyy mittausepävarmuudesta tekemään päätelmiä mittausmenetelmän laadusta. Lisäksi mahdollistetaan laadunhallinnan ja toimintatapojen parantamista, sekä voidaan saavuttaa kustannussäästöjä.

Mittausjärjestelmään vaikuttavia tekijöitä on useita, kuten lämpötila ja häiriöt. Jos sama mittaus toistetaan useita kertoja, liittyy saatuihin tuloksiin aina jonkinlaista hajontaa edellyttäen, että mittalaitteen resoluutio on riittävän pieni. Mutta kuitenkin jos mittaukseen annettuja ohjeita ja määräyksiä noudatetaan, on hajonta yleensä pientä. Toistettaessa mittaus useaan kertaan keskittyvät saadut tulokset mittaustuloksen odotusarvon (keskiarvon, mediaanin) ympärille. Keskiarvosta lasketaan yleisesti keskihajonta s_r sekä keskiarvon epävarmuus u_r . (Aro ym. 2015, 450-451.)

Mittausepävarmuuden määrittämisessä yksi olennaisimmista asioista on epävarmuustekijöiden määrittäminen, eli siis kaikkien eri asioiden ja tekijöiden tunnistaminen ja huomioon ottaminen, jotka vaikuttavat jollakin tavalla mittausepävarmuuteen. Epävarmuustekijät jaotellaan kahteen eri ryhmään, jotka ovat **tyyppi A** ja **tyyppi B**. (Saxholm & lisakka 2018.)

Tyyppi A standardiepävarmuudet määritetään tilastollisin menetelmin ja ilmaistaan mittauksista saatujen arvojen keskiarvon keskihajontana. Kyseessä on siis toistuvien mittausten koostamasta mittausdatasta ja sen tutkimisesta. (Saxholm & lisakka 2018.)

Tyyppi A vaatimukseen kuuluu riittävän laaja mittausten sarja (lukumäärä), tarvittava laajuus täytyy arvioida tapauskohtaisesti. Standardiepävarmuus määritetään tilastollisesti laskemalla mittaussarjan tulosten antaman keskiarvon keskihajonta. (Saxholm & lisakka 2018.)

Jos tyyppi A mittausten lukumäärää on matala, on harkittava tämän tyyppi standardiepävarmuuden arvioinnin luotettavuutta. Jos mittausten lukumäärää ei syystä tai toisesta voida nostaa, on tällöin käytettävä jotain muuta annettua tapaa standardiepävarmuuden määrittämiseksi. (EA-4/20 2013, 7.)

Tyyppi B tekijöiden epävarmuus määritetään jollain muulla tavalla kuin tilastollisella menetelmällä. Tietolähteenä voi olla esimerkiksi aikaisemmat kokemukset ja havainnot, kirjallisuus, valmistajan ilmoittamat tiedot, kalibrointien ja muiden sertifiikaattien tiedot. Tyyppi B epävarmuus ei pienene mittauksia toistamalla, vaan perustuu yhden tai muutaman mittauksen arviointiin. (Saxholm & lisakka 2018; Hiltunen ym. 2011, 38.)

Tyyppi B epävarmuuksia ovat esimerkiksi mittalaitteen resoluutio, spesifikaatio, kirjallisuusarvot tai aiemmat kokemukset. Tyyppi B epävarmuusjakauma on yleensä joko normaalijakauma (kuvio 4) tai tasajakauma (kuvio 5). (Saxholm & lisakka 2018.)

Tyyppi B epävarmuuslaskennassa yhdistetään useita epävarmuustekijöitä keskenään, joilla saattaa olla erimuotoisia todennäköisyysjakaumia, jotta saadaan määri-

tettyä yhdistetty standardiepävarmuus ja siitä edelleen laajennettu epävarmuus (kokonaisuus). Erilaiset epävarmuudet on skaalattava standardiepävarmuuksiksi, jotta niitä voisi vertailla keskenään sekä niiden yhdistäminen olisi mahdollista. (Saxholm & lisakka 2018.)

Mittaus ei voi koskaan olla tarkempi kuin se epävarmuus, jolla mittaukseen käytetty mittalaite on kalibroitu. Epävarmuutta määritettäessä jokaisesta yksittäisestä epävarmuustekijästä on tunnettava sen jakauma, joista yleisimmät ja tämän työn osalta oleelliset ovat normaalijakauma (kuvio 4) ja tasajakauma (kuvio 5). (Hiltunen ym. 2011, 37–38.)

Normaalijakauma. Normaalijakaumassa mittaustulokset jakautuvat todennäköisimmin keskiarvoon x . Mittaustuloksen todennäköisyys (luottamustaso) pienenee, mitä kauemmas edetään jakauman keskihajontasta. Kattavuuskerroin on myös tulkevissa normaalijakauman kuvaajasta (kuvio 4). Normaalijakaumassa mittaustuloksista 68 % sijaitsee välillä keskiarvo x ja jakauman keskihajonta σ_x ja 95 % mittaustuloksista välillä $x \pm 2 \sigma_x$. Tilanteissa, joissa epävarmuustekijän jakauman tyyppiä ei tunneta, oletetaan se useimmiten normaalijakautuneeksi. Normaalijakaumaa noudattaa useasti toistettujen mittausten jakaumat, kuten myös epävarmuus, joka saadaan epävarmuustekijöiden yhdistelmänä. (Saxholm & lisakka 2018; Hiltunen ym. 2011, 37.)

Normaalijakauman standardiepävarmuus voidaan määrittää tilastollisesti laskeamalla keskiarvon keskihajonta kaavan (13) mukaisesti, ja keskihajonta kaavan (14) mukaisesti (Saxholm & lisakka 2018).

Normaalijakauman standardiepävarmuus määritetään kaavalla

$$u(\vec{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} * [(q_1 - \vec{q})^2 + \dots + (q_n - \vec{q})^2]}, \quad (13)$$

missä

\vec{q} on näytteiden keskiarvo

$u(\vec{q})$ on standardiepävarmuus normaalijakautuneelle epävarmuustekijälle

$s(q)$ on keskihajonta

n on näytteiden lukumäärä

q_n on näyte numero n ($n=1, 2, 3, \dots$)

Normaalijakauman keskihajonta määritetään kaavalla

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} * [(q_1 - \vec{q})^2 + \dots + (q_n - \vec{q})^2]}, \quad (14)$$

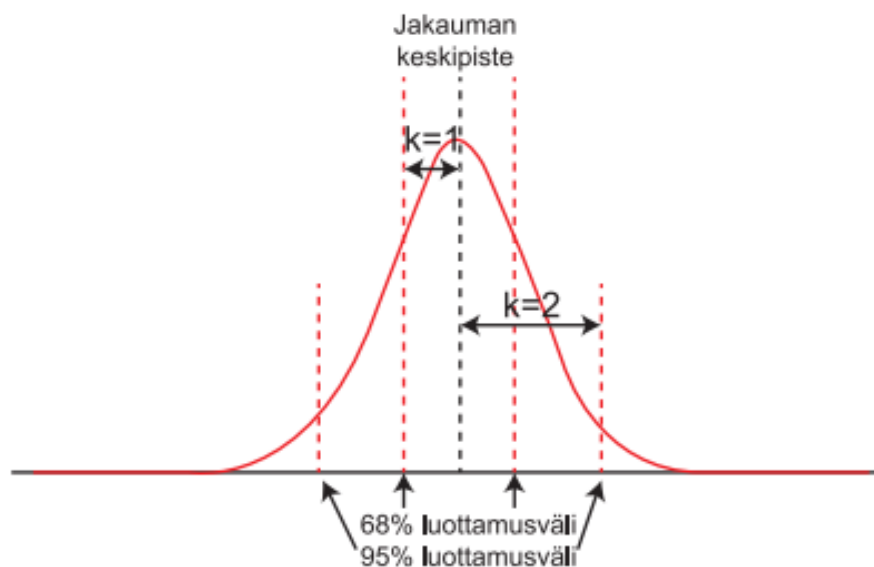
missä

$s(q)$ on keskihajonta

\vec{q} on näytteiden keskiarvo

n on näytteiden lukumäärä

q_n on näyte numero n ($n=1, 2, 3, \dots$)



Kuvio 4. Normaalijakauma (Hiltunen ym. 2011, 37).

Tasajakauma. Tasajakautuneesta mittaustuloksesta voidaan esimerkiksi tietää/olettaa, että tulos sijaitsee 100 %:n varmuudella välillä $x \pm a$ (kuvio 5). Hyvä esimerkki tasajakaumasta on digitaalisen mittalaitteen resoluutiosta aiheutuva epävarmuus, jolloin pyöristyksen johdosta viimeisen näkyvän desimaalin virhe on yhtä suurella todennäköisyydellä (100 %) välillä $\pm 0,5$. Eli siis mitattu arvo voi vaihdella

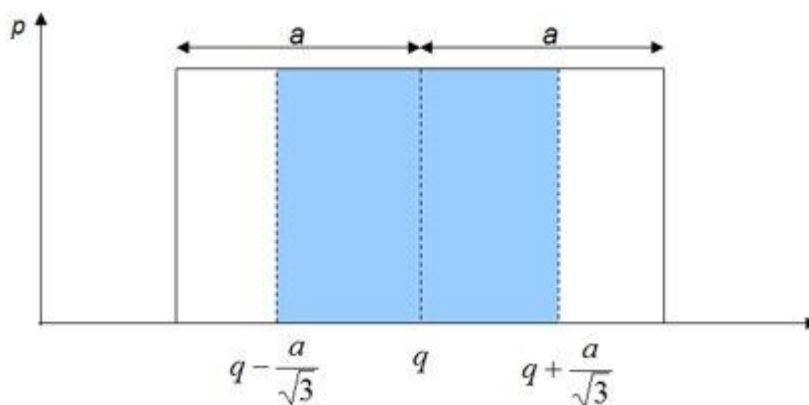
resoluutioalueen sisällä ilman, että se vaikuttaa mittarin lukemaan. Resoluutiosta aiheutetun korjauksen oletetaan yleensä keskimäärin olevan 0, mutta siitä aiheutuva epävarmuus ei ole nolla vaan määritetään kaavan (15) mukaisesti. Myös intuitioon, eli omaan arvioon pohjautuvat arviot jäsennetään tasajakautuneiksi. Tasajakaumasta saadaan laskettua standardiepävarmuus kaavan (15) mukaisesti jakamalla vaihteluvälin puolikas a tekijällä $\sqrt{3}$. (Saxholm & lisakka 2018; Hiltunen ym. 2011, 37–38.)

Tasajakauman standardiepävarmuus määritetään kaavalla

$$u(q) = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad (15)$$

missä

$u(q)$ on standardiepävarmuus tasajakautuneelle epävarmuustekijälle
 a on vaihteluvälin puolikas



p = todennäköisyystiheys

Kuvio 5. Tasajakauma (Saxholm & lisakka 2018).

Saxholm ja lisakka (2018) kertovat, että mittausepävarmuuden määrittämisprosessissa on eri vaiheita, jotka ovat

- olennaisten epävarmuustekijöiden tunnistaminen
- kunkin epävarmuustekijän standardiepävarmuuden arvioiminen
- mittaustapahtuman malliyhtälön esittäminen
- herkkyyskertoimien laskeminen
- epävarmuustekijöiden vaikutusten arviointi toisiinsa sekä korrelaatioiden määrittäminen tarvittaessa
- yhdistetyn standardiepävarmuuden laskeminen
- laajennetun epävarmuuden laskeminen
- tuloksen ja sen epävarmuuden raportointi.

Olennaisten epävarmuustekijöiden tunnistaminen. Mittausepävarmuuden määrittäminen aloitetaan siis tunnistamalla olennaiset epävarmuustekijät. Tämä vaihe on useimmiten epävarmuuslaskennan vaikein osuus, sillä harvoin on tarjolla valmista listausta mittaukseen liittyvistä epävarmuustekijöistä. Epävarmuustekijöiden määrittäminen vaatii kokemusta ja selvitystyötä, ja apua siihen saa esimerkiksi erilaisista työhjeista, oppaista, standardeista ja mahdollisista omista tutkimuksista ja kokeiluista. Kun epävarmuustekijät on selvitetty, työn loput vaiheet ovat pääasiassa matematiikan soveltamista. (Saxholm & Lisakka 2018; Hiltunen ym. 2011, 38.)

Epävarmuustekijöitä määritettäessä kannattaa aluksi listata kaikki sellaiset tekijät, joiden uskoo vaikuttavan tulevaan mittaukseen. Tällä tavoin osoitetaan, että kyseisen epävarmuustekijän olemassaolo on tiedostettu. Vaikka välttämättä jokin epävarmuustekijä ei olisikaan kyseisessä mittauksessa merkityksellinen, voi kyseinen epävarmuustekijä nousta merkittäväksi jossain toisella tavalla suoritettussa mittauksessa. (Saxholm & Lisakka 2018.)

Epävarmuustekijöiden määrittämistä voi Saxholmin ja Lisakan (2018) mukaan helpottaa myös ryhmittelemällä erilaisia epävarmuustekijöitä, kuten esimerkiksi

- referenssiin liittyvät epävarmuustekijät
- kalibroinnin kohteeseen liittyvät epävarmuustekijät
- mittausympäristön olosuhteisiin liittyvät epävarmuustekijät
- mittaustapaan liittyvät epävarmuustekijät
- mittauskohteeseen liittyvät epävarmuustekijät
- mittalaitteeseen liittyvät epävarmuustekijät.

Koska useimmiten ei ole olemassa valmista listausta siitä, mitkä kaikki tekijät vaikuttavat mittausepävarmuuteen, eikä täten voida olla varmoja siitä, onko kaikki tarvittavat epävarmuustekijät osatut ottaa huomioon, täytyy sitä arvioida epäsuorilla menetelmillä. Epävarmuustekijöiden arviointia epäsuorin menetelmin voi tehdä tarkastelemalla, vastaako saadut tulokset laskettua epävarmuutta ja vastaako eri menetelmillä saadut tulokset toisiaan epävarmuuksien puitteissa sekä vastaavatko eri paikoissa ja eri laitteilla saadut tulokset toisiaan epävarmuuksien puitteissa. (Saxholm & Lisakka 2018.)

On kuitenkin huomioitava, ettei käänteistä johtopäätöstä voi tehdä perustuen ainoastaan pelkkään toistettavuus- tai hajontatietoon, sillä vaikka esimerkiksi toistettavuus olisi hyvä, ei se yksinään takaa sitä, että epävarmuus olisi arvioitu oikein, sillä taustalla voi olla esimerkiksi jokin systemaattinen virhe, jota ei pystytä päättelemään toistettavuudesta. Toisin sanoen siis mitataan koko ajan jollain samalla tavalla väärin. (Saxholm & Lisakka 2018.)

Kunkin epävarmuustekijän standardiepävarmuuden arvioiminen. Kun kaikki mahdolliset epävarmuustekijät mittaukseen liittyen ovat tunnistettu, täytyy niille määrittää standardiepävarmuus edellä mainittujen kaavojen (13) ja (15) mukaisesti. Samassa yhteydessä pystytään myös ottamaan huomioon tai tekemään mahdollisia korjauksia mittausvirheiden eliminoimiseksi, esimerkiksi mahdollinen kalibrointikorjaus pystytään ottamaan huomioon lopputuloksia ajatellen. (Saxholm & Lisakka 2018.)

Vaikka jollekin työhön liittyvälle epävarmuustekijälle ei määritettäisi tai laskettaisi korjausta mittauksissa, on se otettava kuitenkin huomioon epävarmuutena. Myös mahdollisille mittausvirheiden korjaamiselle, kuten edellä mainittu kalibrointikorjaus, lasketaan oma epävarmuutensa, joka otetaan huomioon yhdessä muiden epävarmuuksien kanssa laskettaessa yhdistettyä standardiepävarmuutta mittausepävarmuuden määrittämisprosessin loppuvaiheilla. (Saxholm & Lisakka 2018.)

Mittaustapahtuman malliyhtälön esittäminen. Koska mittausepävarmuuteen vaikuttavia epävarmuustekijöitä ei voida suoraan vain laskea yhteen, sillä epävarmuustekijät voivat olla eri yksikössä (esimerkiksi voltit, ohmit ja celsiusasteet), ja koska eri epävarmuustekijät vaikuttavat eri tavoin kokonaisepävarmuuteen, on välttämätöntä laatia malliyhtälö mittauksista. Yleensä yksinkertaista mittauksista kuvaava yhtälö on hyvä lähtökohta malliyhtälön muodostamiseksi, ja siihen voidaan tarpeen mukaan lisätä tarvittavia tekijöitä. (Saxholm & Lisakka 2018.)

Täydellisessä tilanteessa käytetyn mittalaitteen näyttämä vastaisi täydellisesti mitattavaa arvoa kaavan (16) tavoin. Tällöin ei myöskään olisi mittauksista liittyviä virhetekijöitä eikä myöskään esimerkiksi kalibrointikorjausta ja sen epävarmuutta. Näin ei kuitenkaan ole, vaan kaikki mittauksista vaikuttavat epävar-

muustekijät on huomioitava ja mittaustapahtuman malliyhtälöä pitää täydentää kaikilla tunnetuilla korjauksilla ja epävarmuustekijöillä. Yksinkertaisimmillaan mittaustapahtuman malliyhtälö on ”ainoastaan” summakaava. (Saxholm & lisakka 2018.)

Täydellisen tilanteen mittaustapahtuman yksinkertainen malliyhtälö

$$t = t_{ind}, \quad (16)$$

missä

t on mittaushkohteen arvo

t_{ind} on mittarin näyttämä

Mikäli malliyhtälössä on mukana useita eri yksiköissä olevia tekijöitä, voidaan niitä käsitellä myös suhteellisina tekijöinä, joka saattaa joissain tapauksissa yksinkertaistaa laskentaa. Toisin sanoen tekijä muutetaan vastaamaan esimerkiksi jotain prosentti- tai promilleosuutta. (Saxholm & lisakka 2018.)

Malliyhtälö muodostetaan lisäämällä edellä esitettyyn kaavaan (16) kaikki tunnistetut epävarmuustekijät kaavan (17) mukaisesti, esimerkkinä mittarin kalibrointikorjaus (*kal*, tyyppi B), mittarin ryömintä (*drift*, tyyppi B) ja mittarin resoluutio (*res*, tyyppi B), jotka sopivat myös osaksi eristysvastusmittauksen mittausepävarmuuden määrittämisen epävarmuustekijöistä. (Saxholm & lisakka 2018; Hiltunen ym. 2011, 43.)

Esimerkki mittaustapahtuman malliyhtälöstä

$$t = t_{ind} + kal + drift + res, \quad (17)$$

missä

t on mittaushkohteen arvo

t_{ind} on mittarin näyttämä

kal on mittarin kalibrointikorjaus

$drift$ on mittarin ryömintä

res on mittarin resoluutio

Herkkyyskertoimien laskeminen. Herkkyyskertoimien laskemisella tarkoitetaan jokaisen epävarmuustekijän vaikutusta (ts. painoarvoa) kokonaisepävarmuuteen. Eli siis lasketaan, kuinka suuresti yksittäinen epävarmuustekijä vaikuttaa lopuksi laskettavaan kokonaisepävarmuuteen, jolloin kaikki epävarmuustekijät yhdistetään. Herkkyyskertoimen tunnuksena on *c*, joka kertoo, paljonko kyseisen epävarmuustekijän arvon muutos vaikuttaa lopulliseen mittaustulokseen, toisin sanoen ”kokonaistuloksen muutos per tutkittavan epävarmuustekijän pieni muutos”. (Saxholm & lisakka 2018.)

Yksittäisen epävarmuustekijän herkkyysskerroin voidaan määrittää mittaustuloksen osittaisderivaatasta kyseisen epävarmuustekijän suhteen, joka vaatii derivointia. Mittaustapahtuman malliyhtälön ollessa yksinkertainen summalauseke, on herkkyysskerroimen määrittäminen yksinkertaista; derivaattaessa summatermin suhteen muut summatermit supistuvat pois. Yleensä herkkyysskerroin voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella myös ilman derivointia numeerisesti, esimerkiksi Excel -taulun avulla. Epävarmuustekijän herkkyysskerroin voidaan määrittää numeerisesti kaavan (18) mukaisesti. (EA-4/20 2013, 9; Saxholm & lisakka 2018.)

Herkkyyskerroin määritetään numeerisesti kaavalla

$$c_i = \frac{\partial R}{\partial R} \approx \frac{\Delta R}{\Delta q} = \frac{R(q) - R(q+u(q))}{q - (q+u(q))} = \frac{R(q) - R(q+u(q))}{u(q)} = \left| \frac{t-t'}{u(q)} \right|, \quad (18)$$

missä

c_i on epävarmuustekijän herkkyysskerroin

R on mittaustulos

q on mittaustulokseen vaikuttava tekijä

$u(q)$ on tulokseen vaikuttavan tekijän q standardiepävarmuus

t on mitattauskohteen arvo

t' on mitattauskohteen arvo, kun epävarmuustekijään on tehty muutos

Arvo t' saadaan, kun haluttuun tulokseen vaikuttavaan epävarmuustekijään tehdään pieni muutos, joka realistisesti on esimerkiksi kyseisen epävarmuustekijän standardiepävarmuuden suuruinen (Saxholm & lisakka 2018). Esimerkkitapauksessa arvo saadaan laskettua kaavan (19) mukaan, jossa lasketaan mittalaitteen näyttämän epävarmuuden vaikutus mittaustulokseen.

Esimerkki arvon t' määrittämisestä

$$t' = (t_{ind} + u(t_{ind})) + kal + drift + res, \quad (19)$$

missä

t' on mitattauskohteen arvo, kun epävarmuustekijään on tehty muutos

t_{ind} on mittarin näyttämä

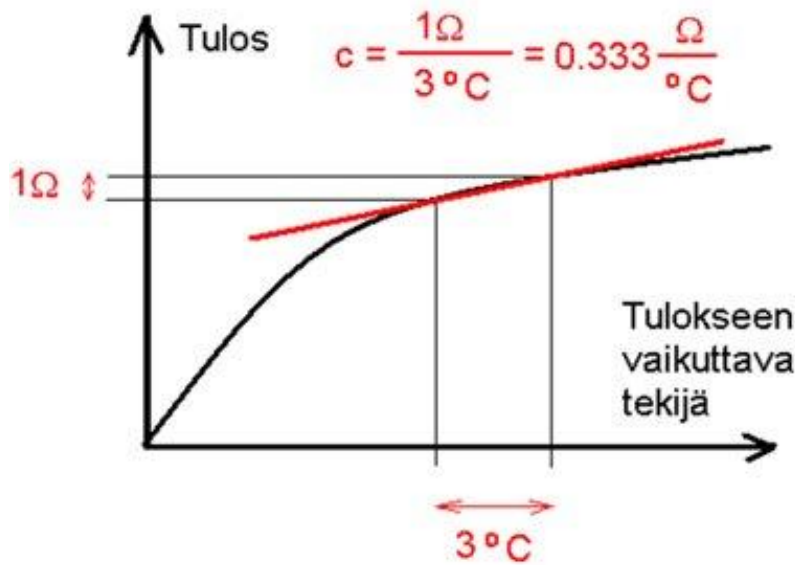
$u(t_{ind})$ on mittarin näyttämän standardiepävarmuus

kal on mittarin kalibroitkorjaus

$drift$ on mittarin ryömintä

res on mittarin resoluutio

Herkkyyskerroimen ollessa derivaatta, se kuvaa paljonko tulos y muuttuu, kun tulokseen vaikuttava tekijä x muuttuu (kuvio 6) (Saxholm & lisakka 2018).



Kuvio 6. Esimerkki herkkyyskertoimesta (Saxholm & lisakka 2018).

Epävarmuustekijän vaikutus kokonaisepävarmuuteen herkkyyskertoimen ja epävarmuustekijän standardiepävarmuuden avulla voidaan määrittää kaavan (20) avulla (Saxholm & lisakka 2018).

Epävarmuustekijän vaikutus kokonaisepävarmuuteen herkkyyskertoimen avulla

$$u_i(R) = c_i * u(q), \quad (20)$$

missä

u_i on vaikutus (mittaustuloksen) kokonaisepävarmuuteen

R on mittaustulos

c_i on tekijän herkkyyskerroin

$u(q)$ on tulokseen vaikuttavan epävarmuustekijän q standardiepävarmuus

Epävarmuustekijöiden vaikutusten arviointi toisiinsa sekä korrelaatioiden määrittäminen tarvittaessa. Yleensä yksittäiset epävarmuustekijät ovat toisistaan riippumattomia eli korreloimattomia, varsinkin silloin, kun epävarmuuslaskelmaa tehdään yksittäiselle mittaustapahtumalle. Tilanne muuttuu, jos epävarmuuslaskelmaa tehdään kokonaiselle kalibrointien ketjulle tai monimutkaiselle laitekokonaisuudelle. (Saxholm & lisakka 2018.)

Tämän työn osalta kyseessä on yksinkertaisesta mittauksesta, johon ei liity kovinkaan montaa epävarmuustekijää, joten voidaan olettaa, että yksittäiset epävarmuustekijät eivät muodosta korrelaatioita toistensa välillä.

Korrelaatioiden määrittämisestä löytyy tarkempaa tietoa ohjeen EA-4/20 liitteestä D.

Yhdistetyn standardiepävarmuuden laskeminen. Yksinkertaisuudessaan aiemmin jokaiselle epävarmuustekijälle määritetty standardiepävarmuus lasketaan yhteen, jotta saadaan muodostettua yhdistetty standardiepävarmuus. (Saxholm & lisakka 2018.)

Yhdistetyn standardiepävarmuuden laskeminen tapahtuu kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa kunkin epävarmuustekijän standardiepävarmuus (u_i) kerrotaan kyseisen epävarmuustekijän herkkyyskerroimella (c_i). Toisessa vaiheessa lasketaan ensimmäisestä vaiheesta saadut arvot neliöllisesti yhteen, eli ensin kerrotaan ensimmäisestä vaiheesta saadut arvot itsellään ja lasketaan ne yhteen, ja lopputuloksesta otetaan neliöjuuri. Kaavassa (21) on koko edellä mainittu laskemisprosessi esitettynä samassa lausekkeessa. (Saxholm & lisakka 2018.)

Yhdistetty standardiepävarmuus määritetään kaavalla

$$u(R) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (c_i u_i)^2} = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + \dots + (c_m u_m)^2}, \quad (21)$$

missä

$u(R)$ on mittauksen yhdistetty standardiepävarmuus

c_i on epävarmuustekijän herkkyyskerroin

u_i on epävarmuustekijän standardiepävarmuus

c_m on epävarmuustekijän m herkkyyskerroin ($m = 1, 2, 3, \dots$)

u_m on epävarmuustekijän m standardiepävarmuus ($m = 1, 2, 3, \dots$)

Yhdistetty standardiepävarmuus määritetään neliöllisellä summauksella normaalin suoran yhteenlaskun sijaan siitä syystä, koska kokonaisepävarmuus koostuu riippumattomista erillisistä epävarmuustekijöistä, joiden jokaisen vaikutussuunta ja suuruus ovat toisiinsa nähden satunnaisia. Joidenkin epävarmuustekijöiden todellinen arvo (jota ei pystytä 100 %:n varmuudella määrittämään) voi olla epävarmuusvälin (vaihteluvälin) yläosassa, toisilla epävarmuustekijöillä todellinen arvo saattaa olla epävarmuusvälin alaosassa. (Saxholm & lisakka 2018.)

Yksittäisten epävarmuustekijöiden standardiepävarmuuksien suora yhteen laskeminen yhdistetyn standardiepävarmuuden määrittämiseksi vastaisi sitä, että jokaisen epävarmuustekijän vaikutus olisi samansuuntainen ja vielä aivan epävarmuusvälin ääripäässä. Tällainen tilanne on kuitenkin todellisuudessa erittäin epätodennäköinen. (Saxholm & lisakka 2018.)

Yksittäisten epävarmuustekijöiden standardiepävarmuuksien neliöllinen yhteenlasku auttaa myös korostamaan suurimpia epävarmuustekijöitä (kuvio 7). Merkittäviä epävarmuustekijöitä on yleensä yksittäisessä epävarmuuslaskelmassa vain yksi tai korkeintaan 2 - 3. (Saxholm & lisakka 2018.)

Tekijät 0,5 & 1: (kasvu/vaikutus on 12 %, ei 50 %)	$\sqrt{(0,5)^2 + (1)^2} = \sqrt{0,25 + 1} = 1,12$
Tekijät 0,2 & 1: (kasvu/vaikutus on 2 %, ei 20 %)	$\sqrt{(0,2)^2 + (1)^2} = \sqrt{0,04 + 1} = 1,02$
Tekijät 0,1 & 1: (kasvu/vaikutus on 0,5 %, ei 10 %)	$\sqrt{(0,1)^2 + (1)^2} = \sqrt{0,01 + 1} = 1,005$

Kuvio 7. Epävarmuustekijöiden neliöllinen summaus korostaa suurimpia epävarmuustekijöitä (Saxholm & lisakka 2018).

Laajennetun epävarmuuden laskeminen. Kertomalla edellisessä kohdassa määritetty yhdistetty standardiepävarmuus kattavuuskertoimella saadaan tulokseksi laajennettu epävarmuus mittaustapahtumalle (kaava (22)). (EA-4/20 2013, 11; Saxholm & lisakka 2018.)

Yhdistetty standardiepävarmuus määritetään kaavalla

$$U(R) = k * u(R), \quad (22)$$

missä

$U(R)$ on mittauksen (R) laajennettu epävarmuus

k on kattavuuskerroin

$u(R)$ on mittauksen (R) yhdistetty standardiepävarmuus

EA-4/20 (2013, 11) mukaan tapauksissa, joissa mitattu arvo muodostaa normaali-jakauman ja lähtöarvoon liittyvä standardiepävarmuus on riittävän luotettava, käytetään kattavuuskerrointa $k = 2$.

Tuloksen ja sen epävarmuuden raportointi. Saxholmin ja lisakan (2018) mukaan epävarmuuslaskennan tulokset ja epävarmuus ilmoitetaan samalla resoluutiolla, yleensä korkeintaan kahdella merkitsevällä numerolla. Tulos pyöristetään heidän mukaan normaalisti yleisten laskusääntöjen mukaan, kuitenkin sillä poikkeuksella, että jos alaspäin pyöristäminen pienentää epävarmuutta yli 5 %, on silloin pyöristettävä tulosta ylöspäin. He mainitsevat kuitenkin, että jos epävarmuus ilmoitetaan kahdella numerolla, jää pyöristys aina alle 5 %, joten edellä mainittua sääntöä ei välttämättä tarvitse huomioida.

Hiltunen ym. (2011, 54) mukaan liian suuri numeroiden määrä antavat väärän kuvan tuloksen tarkkuudesta. Liian vähäinen numeroiden määrä antaa puolestaan vaikutelman todellista huonommasta tarkkuudesta.

Saxholmin ja lisakan (2018) esittämässä mittausepävarmuuden määrittämisen esimerkissä mittaustulos epävarmuuksineen oli esitetty seuraavalla tavalla: $t = 100,17$ °C, $U(t) = 0,65$ °C. Mittaustulos on siis 100,17 celsiusastetta, ja mittausepävarmuus mittaukselle on 0,65 celsiusastetta ylös tai alaspäin, eli todellinen lämpötila-arvo on siis välillä 99,52 - 100,82 °C. Tulokset voi heidän mukaan esittää myös esimerkiksi taulukoituna, josta ilmenee kaikki epävarmuustekijät korjausarvoineen, standardiepävarmuuksineen, jakaumatyyppineen, herkkyyskertoimineen sekä niiden vaikutuksineen kokonaisepävarmuuteen. Myös yhdistetty standardiepävarmuus sekä kattavuuskerroin ovat sisällytettynä taulukkoon.

Hiltunen ym. (2011, 47) esittivät erään mittauksen tuloksia mittausepävarmuuksineen seuraavalla tavalla: "Lyijyn kokonaispitoisuus = $(1,65 \pm 0,15)$ mmol/kg ($k = 2$).", eli siis hyvin samalla tavalla kuin edellä mainittu Saxholmin ja lisakan esittämistapa.

EA-4/20 (2013, 31) ohjeessa oli esitettyä esimerkkitapaus, jossa kalibroitiin normaali vastus, jonka nimellisvastus oli 10 k Ω . Saadut mittaustulokset oli esitetty seuraavalla tavalla: "mitattu vastusarvo 10 k Ω nimellisvastuksen omaavasta vastuksesta 23,00 °C mittaustilassa ja 100 μ A mittaussirralla on $(10\,000,178 \pm 0,017)$ Ω ". Tätä tulosten raportointitapaa lienee syytä käyttää myös ilmoitettaessa tämän työn piiriin kuuluvien eristysvastusresistanssimittauksien tuloksia.

5 NYKYTILA-ANALYYSI

Nykytilan analysoiminen aloitettiin yrityksen yhteyshenkilön kanssa käymällä läpi työhön kuuluvia osa-alueita ja tavoitteita. Tämän jälkeen tuli miettiä, mitä kaikkea oleellista eri osa-alueisiin kuuluu ja minkälaista teoriatietoa tulisi hankkia työn suorittamiseksi. Keskustelut yrityksen yhteyshenkilön kanssa auttoivat hahmottamaan työn kokonaisuutta ja laajuutta. Myös eri työvaiheita pystyi jo jotenkin jaksottamaan.

Kun kokonaisuus hahmottui, aloitettiin koko työn pohjana toimivaan E-sääntöön nro 100 tutustuminen, sillä se vaikutti olevan kaikistaärkevin kohde, mistä työn aloittaa. Tästä seurasi muihin asiaan kuuluviin säädöksiin ja standardeihin tutustuminen. Vaatimusten tiedostamisen jälkeen tuli etsiä teoriatietoa niin sähkö- ja hybridiautoista kuin mittausepävarmuuden määrittämisestä sekä sähkö- ja mittaustekniikasta. Tiedonkeruuta suoritettiin koko työn tekemisen aikana aina työn loppuvaiheille asti. Saatua tietoa alettiin koostaa yhteen samaan dokumenttiin sitä mukaa, kun tietoa kerättiin.

Toimeksiantajayrityksessä suoritettavat eristysresistanssin mittaukset perustuvat UNECE R100 -säännön mukaisiin sähkö- tai hybridiajoneuvojen korkeajännitepuolen eristeiden ominaisuuksien vaatimuksenmukaisuuksien tarkastamiseen esimerkiksi kyseisten ajoneuvojen yksittäis- tai tyyppi hyväksyntäprosesseissa. Jotta yrityksen tekemät eristysresistanssin mittaukset olisivat päteviä ja jäljitettävissä, määritetään mittauksille mittausepävarmuus muun muassa akkreditoituja testauslaboratorioita koskevan EA-4/20-ohjeen mukaisesti.

Toimeksiantajayrityksessä on jo aiemmin tehty UNECE R100 -säännön mukaisia eristysvastusmittauksia kappaleessa 2.5 mainitun Linkker-sähkölinja-auton tyyppi hyväksyntäprosessin yhteydessä hyvällä menestyksellä, sillä ajoneuvolle myönnettiin tyyppi hyväksyntä, ja Linkker-sähkölinja-autoja on jo käytössä joukkoliikenteen kuljetuksissa. Linkkerin lisäksi Oy Testmill Ltd on ollut mukana myös yksityishenkilön toteuttamassa Chevrolet Astro -tila-auton sähkökäyttömuutostyön yksittäishyväksyntäprosessissa. (Saari 2019.)

Yrityksellä on käytössään Fluke 1550C -eristysvastusmittari sekä Metrel MI 3242 MicroOhm 2A -vastusmittari matalien resistanssiarvojen mittaamiseen. Jotta näillä

mittauslaitteilla tehtävät mittaukset olisivat jäljitettävissä, on niihin kumpaankin ole-massa voimassa oleva kalibrointitodistus.

Fluke 1550C -eristysvastusmittari on tarkoitettu nimenomaan eristysvastuksien mit-tauksiin eri suurjännitteisissä käyttökohteissa. Mittauksia pystytään suorittamaan 250 - 5000 V:n jännitteellä 1 TΩ:in asti. (Fluke, [viitattu 2.4.2019].) Mittauslaitteessa on myös monia muita ominaisuuksia, joilla ei kuitenkaan ole tämän työn osalta pai-noarvoa, joten niiden esittely tämän työn yhteydessä lienee tarpeetonta. Taulu-koissa 3. ja 4. on esitetty Fluke 1550C -eristysvastusmittarin tärkeimpiä teknisiä tie-toja sekä tarkkuuksia eristysvastusmittauksille.

Taulukko 3. Fluke 1550C -eristysvastusmittarin tekniset tiedot (Fluke, [viitattu 2.4.2019]).

Pylväsnäytön alue	0..1 TΩ
Eristysvastusmittauksen testijännitteen tarkkuus	-0 %, +10 % 1 mA:n kuormitusvirralla
Indusoituneen AC-verkkovirran hylkäys	Indusoituneen AC-verkkovirran hylkäys
Käyttölämpötila	-20 °C...50 °C
Säilytyslämpötila	-20 °C...65 °C
Kosteus	80 % enintään 31 °C:n lämpötilassa, laskee lineaarisesti 50 % 50 °C:n lämpötilassa
Kotelon suojaus	IP40
Tulon ylikuormitussuojaus	1000 V AC
Sähkömagneettinen yhteensopivuus	EN 61326
Käyttöturvallisuus	IEC 61010-1: Ylijänniteluokka II, ympäristöhaittaluokka 2, IEC 61010-2-030: mittaukset 600V CAT IV / 1000V CAT III, IEC 61557-1, IEC 61557-2

Taulukko 4. Fluke 1550C -eristysvastusmittarin mittaustarkkuudet (Fluke, [viitattu 2.4.2019]).

Testijännite (DC)	Alue	Tarkkuus (\pm lukemasta)
250 V	< 200 k Ω	Ei määritetty
	200 k Ω - 5 G Ω	5%
	5 G Ω - 50 G Ω	20%
	> 50 G Ω	Ei määritetty
500 V	< 500 k Ω	Ei määritetty
	500 k Ω - 10 G Ω	5%
	10 G Ω - 100 G Ω	20%
	> 100 G Ω	Ei määritetty
1000 V	< 200 k Ω	Ei määritetty
	200 k Ω - 20 G Ω	5%
	20 G Ω - 200 G Ω	20%
	> 200 G Ω	Ei määritetty
2500 V	< 200 k Ω	Ei määritetty
	200 k Ω - 50 G Ω	5%
	50 G Ω - 500 G Ω	20%
	> 500 G Ω	Ei määritetty
5000 V	< 200 k Ω	Ei määritetty
	200 k Ω - 100 G Ω	5%
	100 G Ω - 1 T Ω	20%
	> 1 T Ω	Ei määritetty

Näiden tietojen lisäksi huomionarvoista on myös Fluken ([viitattu 2.4.2019]) mainitsema seikka lämpötilan vaikutuksen huomioimisesta: ”Mittarin tarkkuus on määritetty 1 vuodeksi kalibroinnin jälkeen käyttölämpötiloissa 0...35 °C. Alueen ulkopuolella olevissa käyttölämpötiloissa (-20...0 °C ja 35...50 °C), lisää $\pm 0,25$ % yhtä celsiusastetta kohden, paitsi 20 %:n tarkkuusalueilla lisää ± 1 % yhtä celsiusastetta kohden.”.

Fluke 1550C -eristysvastusmittari on keskeisessä roolissa tämän työn osalta, sillä tämän laitteen avulla sähkö- ja hybridiajoneuvojen korkeajännitepuolen eristysvastusmittaukset suoritetaan toimeksiantajayrityksessä, joten on välttämätöntä myös tietää mittauslaitteen mittausepävarmuus.

Toisena mittauslaitteena yrityksessä on Metrel MI 3242 MicroOhm 2A -vastusmittari erittäin alhaisten resistanssien tarkkaan mittaamiseen. Sitä käytetään esimerkiksi kytkimien, releiden, johtimien, kaapeleiden ja liittimien/liitosten konduktiivisuuden mittaamiseen, eli siis em. komponenttien sähkönjohtavuuden mittaamiseen matalalla, korkeintaan 2 ampeerin virtatasolla. (Metrel, [viitattu 2.4.2019].)

Taulukko 5. Metrel MI 3242 MicroOhm 2A tekniset ominaisuudet (Metrel, [viitattu 2.4.2019]).

Toiminto	Mittausalue	Resoluutio	Tarkkuus	(Mittaus)virta
Resistanssi	9,999 mΩ	1 μΩ	±0,25 % lukemasta + 2 numeroa	2 A
	99,99 mΩ	10 μΩ		
	999,9 mΩ	100 μΩ		
	99,99 mΩ	10 μΩ		100 mA
	999,9 mΩ	100 μΩ		
	9,999 Ω	1 mΩ		
	19,99 Ω	10 mΩ		
	999,9 mΩ	100 μΩ		10 mA
	9,999 Ω	1 mΩ		
	99,99 Ω	10 mΩ		
	199,9 Ω	100 mΩ		
Jännite	0 - 49,9 V	0,1 V	±2 % lukemasta + 2 numeroa	
	50 - 550 V	1 V		
Taajuus	10.0 - 99,9 Hz	0,1 Hz	±0,2 % lukemasta + 1 numero	
	100 - 500 Hz	1 Hz		

Saaren (2019) mukaan toimeksiantajayrityksessä Metrel-vastusmittaria käytetään osoittamaan sähkö- ja hybridiajoneuvojen kotelointien maadoituksen toimintaa UNECE R100 -säännön kohdan 5.1.2.2 mukaisissa mittauksissa:

Kaikkien jännitteelle alttiiden kosketeltavien osien ja sähköisen alustan välisen resistanssin on oltava pienempi kuin 0,1 ohmia, kun virran voimakkuus on vähintään 0,2 ampeeria. Tämä vaatimus täyttyy, jos galvaaninen liitântä on muodostettu hitsaamalla. (UNECE R100 2013, 7.)

6 TULOKSET

Tätä työtä koskevat kohdat UNECE R100 -säännössä ovat kohdat 1. "Soveltamisala", 2. "Määritelmät", "Osa I: Ajoneuvon sähköturvallisuusvaatimukset" sekä liite 4A "Eristysresistanssin mittausmenetelmä ajoneuvoihin perustuvissa testeissä". Näihin kohtiin pohjautuen myös työn tulokset ovat laadittu, ja määritetty mittausepävarmuus eristysresistanssin mittauksissa perustuu ohjeeseen EA-4/20.

6.1 Sähkö- ja hybridiajoneuvojen eristeisiin liittyvät vaatimukset

E -säännön 100 (2015, 7) kohdassa 5.1.1.1 ja 5.1.1.2 on määritelty vaadittavat IP-suojausluokat matkustamossa sekä sen ulkopuolella olevien jännitteellisten osien suojaamiseksi kosketukselta. Kohdassa 5.1.1.1 sanotaan, että "Matkustamossa tai tavaratilassa olevat jännitteelliset osat on suojattava suojausluokan IPXXD mukaisesti.". Kohdassa 5.1.1.2 kerrotaan puolestaan, että "Muualla kuin matkustamossa tai tavaratilassa olevat jännitteelliset osat on suojattava suojausluokan IPXXB mukaisesti.".

Edellä mainitut suojausluokat eroavat toisistaan siinä määrin, minkälaisella testi-koettimella luokitustesti on suoritettu. Standardin SFS-EN 60529 + A1(2000, 24) mukaan IPXXB-luokitus täyttyy, kun vaaralliset osat on suojattu testisormelta, ja puolestaan IPXXD-luokitus täyttyy, jos vaaralliset osat on suojattu testilangalta. Jännitteellisten osien tapauksessa riittää, että testisormi tai -lanka ei kosketa jännitteellisiä osia, koska sähkö- ja hybridiajoneuvojen korkeajännitepuolen toimintajännitteet jäävät standardissa määritettyjen pienjännitelaitteiden jänniterajoihin (alle 1000 V AC ja 1500 V DC). (SFS-EN 60529 +A1, 44.)

UNECE R100:n (2015, 8) kohdassa 5.1.3.1 ja 5.1.3.2 on kerrottuna konkreettiset resistanssilukemavaatimukset sähköisen alustan ja jännitteellisten osien välille, kun jännitteellisten osien ja sähköisen alustan tai jännitteelle alttiiden kosketeltavien osien välinen enimmäisjännite ei ole korkeampi kuin 30 V AC (rms) tai 60 V DC.

5.1.3.1 Erillisistä tasavirta- tai vaihtovirtaväylistä koostuva sähköinen voimalaite.

Jos korkeajännitteiset tasa- ja vaihtovirtaväylät on erotettu toisistaan galvaanisesti, korkeajänniteväylän ja sähköisen alustan välisen eristysresistanssin on oltava vähintään 100 Ω tasavirtaväylien käyttöjännitteen voltia kohden ja vähintään 500 Ω vaihtovirtaväylien käyttöjännitteen voltia kohden.

Mittaus on tehtävä liitteessä 4A, ”Eristysresistanssin mittausmenetelmä ajoneuvoihin perustuvissa testeissä”, esitettyjen vaatimusten mukaisesti.

5.1.3.2 Yhdistetyistä tasa- ja vaihtovirtaväylistä koostuva sähköinen voimalaite.

Jos korkeajännitteiset vaihto- ja tasavirtaväylät on yhdistetty galvaanisesti, korkeajänniteväylän ja sähköisen alustan välisen eristysresistanssin on oltava vähintään 500 Ω käyttöjännitteen voltia kohden.

Jos korkeajännitteiset vaihtovirtaväylät kuitenkin on suojattu jollakin seuraavista kahdesta menetelmästä, korkeajänniteväylän ja sähköisen alustan välisen eristysresistanssin on oltava vähintään 100 Ω käyttöjännitteen voltia kohden:

- Kaksi tai useampia kerroksia kiinteää eristettä, suojuksia tai kotelaita, jotka erikseen täyttävät 5.1.1 kohdan vaatimuksen, esimerkiksi johdinsarja;
- Mekaanisesti vahvat suojuukset, jotka ovat riittävän kestäviä ajoneuvon käyttöajan ajan, kuten moottorien suojuukset, elektronisten muuttajien kotelot tai liittimet. Korkeajänniteväylän ja sähköisen alustan välinen eristysresistanssi voidaan osoittaa laskelmin tai mittauksin taikka molemmilla tavoilla.

Mittaus on tehtävä liitteessä 4A, ”Eristysresistanssin mittausmenetelmä ajoneuvoihin perustuvissa testeissä”, esitettyjen vaatimusten mukaisesti.

6.2 Mittausepävarmuuden määrittäminen eristysvastusmittauksessa

Mittausepävarmuuden määrittäminen tässä työssä tehdään vaiheittain ohjeen EA-4/20 sekä Saxholmin ja lisakan (2018) ohjeiden mukaisesti (ks. kappale 4.2.3). En-

simmäiseksi pyritään tunnistamaan kaikki mahdolliset epävarmuustekijät. Epävarmuustekijöiden määrittelyä voidaan helpottaa ryhmittelemällä epävarmuustekijöitä, ryhmiä voisi olla

- referenssiin liittyvät tekijät
- kalibroinnin kohteeseen liittyvät tekijät
- ympäristöoloihin liittyvät tekijät
- mahdolliset muut tekijät.

Tämän työn mukaisessa eristysvastusmittauksessa olennaiset vaikuttavat epävarmuustekijät voisivat olla esimerkiksi

- mittauslaitteeseen liittyvät tekijät, kuten
 - mittarin näyttämä (hajonta)
 - mittarin kalibrointikorjaus
 - mittarin ryömintä kalibrointien välillä
 - mittarin resoluutio
- mittaustapaan liittyvät tekijät, kuten
 - mittauslaitteen johtimien resistanssi
- mittauksen kohteeseen liittyvät tekijät, kuten
 - resistanssierot
- ympäristöoloihin liittyvät tekijät, kuten
 - mittausympäristön lämpötila
 - mittausympäristön ilmankosteus.

Tässä työssä esitettyjä tuloksia mittausepävarmuuden määrittämistä koskien **ei tule** käyttää suoraan ilman, että tulosten paikkansapitävyys on ensin varmistettu tekeillä testausmittauksia, joille määritetään mittausepävarmuus tämän työn ohjeiden mukaisesti. Testimittauksia tulee suorittaa pieni sarja, jotta pystytään osoittamaan, että tässä työssä esitetyssä mittausepävarmuuden määrittämisessä on otettu kaikki vaikuttavat epävarmuustekijät huomioon ja tulokset ovat päteviä ja jäljitettävissä. Myös testimittausten suorittamista eri olosuhteissa sekä eri laitteilla suositellaan tämän työn tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi.

Kun oletettavasti kaikki epävarmuustekijät on tunnistettu, määritetään mittausepävarmuudet toimeksiantajayrityksessä käytettäville Fluke 1550C sekä Metrel MI 3242 MicroOhm 2A mittauslaitteille käyttäen valmistajien ilmoittamia teknisiä tietoja sekä laitteiden kalibrointitodistuksista ilmeneviä tietoja. Mittausepävarmuuden määrittäminen mittauslaitteille pystytään suorittamaan saman kaavan mukaisesti kuin Saxholm ja lisakka (2018) ovat esittäneet (ks. kappale 4.2.2).

Fluke 1550C:n mittausepävarmuus. Edellisessä kappaleessa oli lueteltuna olennaisia epävarmuustekijöitä mittauslaitteille, ja seuraavaksi tehtävänä on määrittää niille standardiepävarmuudet Fluke-eristysvastusmittarin tapauksessa. Fluken teknisistä tiedoista ilmenee, että mittalaitteen mittausjännite voi vaihdella enintään +10 % asetetusta, mutta tätä ei oteta erikseen epävarmuutena huomioon, sillä sen oletetaan sisältyvän mittalaitteen mittaustarkkuuteen, joka otetaan huomioon yhtenä epävarmuustekijänä (Fluke, [viitattu 2.4.2019]).

Mittauslaitteen näyttämän aiheuttama epävarmuus voidaan määrittää vain, kun mittauksia toistetaan ja tulokset otetaan talteen. Tällainen mittaussarja kuvastaa normaalijakautunutta tyyppin A epävarmuutta ja voidaan laskea kaavan (13) mukaan. (Saxholm & lisakka 2018.)

Mahdollisen mittaussarjan tuloksista lasketaan keskiarvo \bar{q} sekä näytteiden keskihajonta $s(q)$ kaavan (14) mukaan. Näytteiden keskihajonnan avulla saadaan määritettyä keskiarvon keskihajonta eli näytejoukon standardiepävarmuus $u(\bar{R})$ kaavan (13) mukaisesti.

Koska tämä mittauslaite on suhteellisen uusi eikä sille ole tehty kuin yksi kalibrointi, ei sille voida määrittää kalibrointien välistä ryöminnän virhekorjausta eikä epävarmuutta.

Mittauslaitteen teknisistä spesifikaatioista ilmenee laitteen tarkkuusarvoja eri mittausalueille (ks. taulukko 4). Mittausalueesta ja -lukemasta riippuen tarkkuutta ei ole ilmoitettu tai tarkkuus on 5 % tai 20 % mittaustuloksesta. (Fluke, [viitattu 2.4.2019].) Mittaustarkkuuden aiheuttaman virhekorjauksen sekä standardiepävarmuuden määrittäminen onnistunee samalla tavalla, kuin Saxholmin ja lisakan (2018) ohjeissa on resoluution osalta samat toimenpiteet tehty.

Eli siis mittaustarkkuuden oletetaan olevan tasajakautunut (tyyppi B), ja korjauksen oletetaan keskimäärin olevan 0, mutta epävarmuus ei ole nolla, vaan se lasketaan kaavan (15) mukaan käyttäen arvona a mittaustarkkuuden aiheuttamaa tuloksen vaihtelua. Tarkkuuden epävarmuus on ilmoitettuna tunnuksella $u(tark)$.

Esimerkiksi jos mitataan 500 voltin testausjännitteellä 600 k Ω vastusarvo, on mittaustarkkuus $\pm 5\%$ mittaustuloksesta, eli 600 k $\Omega \pm 30$ k Ω . Sijoitetaan lukemat yhtälöön, jolloin standardiepävarmuudeksi saadaan:

$$u(tark) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{30 \text{ k}\Omega - (-30 \text{ k}\Omega)}{2 * \sqrt{3}} = 17 \text{ k}\Omega.$$

Jakoviivan alla neliöjuuren kertoimena oleva luku 2 on siitä syystä, koska mittaustarkkuuden arvo voi olla positiivinen tai negatiivinen, jolloin vaihteluväli on kokonaisuudessaan kaksinkertainen ilmoitettuun tarkkuusarvoon nähden, mutta todellinen vaihtelun lukema ei voi olla niin suuri kumpaankaan suuntaan yksinään. Eli siis vaihtelu on esimerkkilaskun tapauksessa kokonaisuudessaan 60 ohmia, mutta todellinen lukema ei voi olla koko 60 ohmia pelkästään negatiiviseen tai positiiviseen suuntaan. Siitä syystä jakoviivan alle lisätään $\sqrt{3}$ kertoimeksi luku kaksi.

Fluken kalibroitodistuksesta ilmenee, että laitteelle ei ole tehty kalibroitikorjausta, joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon mittaustulosten korjauksessa eikä myöskään epävarmuutta tälle tarvitse määrittää. Kuitenkin itse kalibroinnin epävarmuus on otettava huomioon. Kalibroitodistuksesta ilmenee, että mittaustulosten epävarmuus riippuu mitta-alueesta sekä mitattavasta resistanssiarvosta, mutta ilmoitetut epävarmuustiedot ovat kalibroitodistuksen mukaan voimassa vain mitatuissa pisteissä, joka alentaa kalibroitodistuksen hyötyä ja luotettavuutta mittaustulosten epävarmuuden määrittämisessä. Kuitenkin voidaan esimerkkinä määrittää epävarmuus kalibroitulokselle, joka on saatu mittaamalla tunnettua 250 k Ω :n vastusta 500 voltin mittaustuloksella. Pienin mitattu arvo kyseisessä mittauksessa on 238 k Ω ja suurin arvo 263 k Ω . Kalibroinnin epävarmuus lasketaan samalla tavalla kuin edellä mainittu mittaustarkkuuden standardiepävarmuuden laskeminen kaavan (15) mukaan:

$$u(kal) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{263 \text{ k}\Omega - 238 \text{ k}\Omega}{2 * \sqrt{3}} = 7,2 \text{ k}\Omega.$$

Fluke ilmoittaa mittaustuloksen kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella, jonka myötä mittauslaitteen resoluutio on näyttämän mukaan 1, 0,1, tai 0,01 kilo-, mega- tai teraohmia. Resoluution epävarmuus määritetään siis sen mukaan, mikä mittauslaitteen näyttämä on kyseisessä mittauksessa. Lasketaan esimerkiksi resoluution aiheuttama epävarmuus tapauksessa, jossa mittauslaitteen näyttämä on 250 kiloohmia, eli resoluutio on tällöin 1 k Ω . Resoluution standardiepävarmuus lasketaan kaavan (15) mukaan:

$$u(res) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,5 \text{ k}\Omega - (-0,5 \text{ k}\Omega)}{2 * \sqrt{3}} = 0,3 \text{ k}\Omega.$$

Mittauslaitteen mittausjohtimien resistanssin vaikutuksen mittaustuloksiin voi määrittää melko yksinkertaisesti. Mittauslaitteesta valitaan sopivan suuruinen mittausalue ja mittausjohtimet yhdistetään. Mittauslaitteen resistanssilukema otetaan ylös (jos arvo > 0) ja sitä käytetään mittaustulosten virheiden korjaamisen yhteydessä. Tulos voidaan olettaa tasajakautuneeksi (tyyppi B), joten standardiepävarmuus korjaukselle lasketaan kaavan (15) mukaan. Korjauksen standardiepävarmuus voidaan ilmoittaa esimerkiksi tunnuksella $u(mjohd)$.

Mittauslaitteet voi olla varustettuna ominaisuudella, joka ottaa automaattisesti johtimien resistanssin huomioon, ja tämä on varmistettava edellä mainitulla mittauksella. Jos mittauslaite näyttää mittausjohtimet yhdistettynä arvoa 0, laite ottaa johtimien resistanssin huomioon itsestään eikä sille tarvitse määrittää korjausta eikä epävarmuutta. Laite voi myös vaatia mittausjohtimien resistanssin kalibrointia mittarin näyttämään ennen varsinaisten mittausten aloittamista. Fluken tapauksessa mittausjohtimien resistanssilla voidaan olettaa olevan merkityksetön vaikutus mittaustuloksiin koska mitattavat resistanssiarvot ovat niin korkeita, ettei mittajohtimien resistanssilla ole käytännössä minkäänlaista vaikutusta, eikä Fluken mittarilla voi itsessään edes mitata niin pieniä resistanssiarvoja, kuin mitä mittausjohtimien voidaan olettaa omaavan.

Esimerkki: Mittausjohtimien resistanssiarvoksi saadaan mittaamalla 0,2 Ω . Tämä otetaan huomioon varsinaisen vastusmittauksen mittaustuloksessa, josta vähennetään edellä mainittu 0,2 Ω . Kaavan (15) mukaan korjaukselle lasketaan standardiepävarmuus:

$$u(mjohd) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,12 \Omega - (-0,2 \Omega)}{\sqrt{3}} = 0,12 \Omega.$$

Metrel MI 3242 MicroOhm 2A:n mittausepävarmuus. Metrel-vastusmittarin epävarmuuden määrittäminen tehdään samalla kaavalla kuin edellä mainitussa Fluken tapauksessa.

Mittauslaitteen näyttämän aiheuttama epävarmuus voidaan myös Metrelin tapauksessa määrittää tyyppin A mukaan vain, kun mittauksia toistetaan ja tulokset otetaan talteen. Mittaussarjan standardiepävarmuus voidaan laskea kaavan (13) mukaan. (Saxholm & lisakka 2018.)

Mahdollisen mittaussarjan tuloksista lasketaan keskiarvo \bar{q} sekä näytteiden keskihajonta $s(q)$ kaavan (14) mukaan. Näytteiden keskihajonnan avulla saadaan määritettyä keskiarvon keskihajonta eli näytejoukon standardiepävarmuus $u(\bar{q})$ kaavan (13) mukaisesti.

Metrelin kalibrointitodistuksessa ei ole erikseen mainittu mahdollisesta kalibrointikorjauksesta, joten voidaan olettaa, ettei laitteelle ole tehty kalibrointikorjausta. Kuitenkin itse kalibroinnin epävarmuus on otettava huomioon. Kalibrointitodistuksesta ilmenee, että kalibroinnin epävarmuus vaihtelee mittausalueesta riippuen 0,006 - 0,2 milliohmien välillä. Tätä kalibroinnin epävarmuutta käytetään lopuksi laskettaessa yhdistettyä standardiepävarmuutta ja siitä edelleen laajennettua epävarmuutta.

Koska tämäkin mittauslaite on suhteellisen uusi eikä sille ole tehty kuin yksi kalibrointi, ei sille voida vielä määrittää kalibrointien välistä ryöminnän virhekorjausta eikä epävarmuutta.

Metrelin ([viitattu 2.4.2019]) teknisistä tiedoista ilmenee, että mittauslaitteen resoluutio on $1 \mu\Omega$. Tämä tarkoittaa siis, että mittaustulos voi vaihdella ns. resoluutioarvon sisällä ilman, että se vaikuttaa mittaustulokseen, siis $-0,5 \mu\Omega - 0,5 \mu\Omega$. Resoluutiosta aiheutuvan korjauksen voidaan olettaa olevan keskimäärin 0, mutta siitä aiheutuva standardiepävarmuus ei ole nolla, vaan lasketaan kaavan (15) mukaan:

$$u(res) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,5 \mu\Omega - (-0,5 \mu\Omega)}{2 * \sqrt{3}} = 0,29 \mu\Omega$$

Mittauslaitteen teknisistä spesifikaatioista ilmenee laitteelle ilmoitettu tarkkuusarvo, joka on 0,25 % tuloksesta. (Metrel, [viitattu 2.4.2019].) Mittaustarkkuuden aiheuttaman virhekorjauksen sekä standardiepävarmuuden määrittäminen onnistunee samalla tavalla, kuin Saxholmin ja lisakan (2018) ohjeessa on resoluution osalta samat toimenpiteet tehty.

Esimerkiksi jos mitataan 10 Ω:n vastusarvoa, on mittaustarkkuus ±0,25 % mittaus-tuloksesta, eli 10 Ω ± 0,025 Ω. Sijoitetaan lukemat yhtälöön, jolloin standardiepävarmuudeksi saadaan:

$$u(\text{tark}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,025 \Omega - (-0,025 \Omega)}{2 * \sqrt{3}} = 0,014 \Omega.$$

Mittauslaitteen mittausjohtimien resistanssin vaikutuksen mittaustuloksiin voi määrittää melko yksinkertaisesti. Mittauslaitteesta valitaan sopivan suuruinen mittaus-alue ja mittausjohtimet yhdistetään. Mittauslaitteen resistanssilukema otetaan ylös (jos arvo > 0) ja sitä käytetään mittaustulosten virheiden korjaamisen yhteydessä. Tulos voidaan olettaa tasajakautuneeksi (tyyppi B), joten standardiepävarmuus korjaukselle lasketaan kaavan (15) mukaan. Korjauksen standardiepävarmuus voidaan ilmoittaa esimerkiksi tunnuksella $u(\text{mjohd})$.

Mittauslaitteet voi olla varustettuna ominaisuudella, joka ottaa automaattisesti johtimien resistanssin huomioon, tämä on varmistettava edellä mainitulla mittauksella. Jos mittauslaite näyttää mittausjohtimet yhdistettynä arvoa 0, laite ottaa johtimien resistanssin huomioon itsestään eikä sille tarvitse määrittää korjausta eikä epävarmuutta. Laite voi myös vaatia mittausjohtimien resistanssin kalibrointia mittarin näyttämään ennen varsinaisten mittausten aloittamista.

Esimerkki: Mittausjohtimien resistanssiarvoksi saadaan mittaamalla 0,2 Ω. Tämä otetaan huomioon varsinaisen vastusmittauksen mittaustuloksessa, josta vähennetään edellä mainittu 0,2 Ω. Kaavan (15) mukaan korjaukselle lasketaan standardiepävarmuus:

$$u(\text{mjohd}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0 \Omega - (-0,2 \Omega)}{\sqrt{3}} = 0,12 \Omega.$$

Muiden eristysresistanssin mittaamiseen liittyvien epävarmuustekijöiden aiheuttama epävarmuus. Määritetään standardiepävarmuus seuraavaksi vielä mahdollisille resistanssieroille. Lämpötilaan ja ilmakosteuteen liittyviä epävarmuuksia ei määritetä eikä yhdistetä yhdistettyyn standardiepävarmuuteen eikä laajennettuun epävarmuuteen, koska se vaatisi huomattavan määrän aikaa ja työtä tutkia näiden kahden ympäristön olosuhdetekijän vaikutusta kyseisiin mittauksiin. Lisäksi toimeksiantajayrityksen mittaustilat ovat lämpötila- ja kosteuskontrolloituja, eli mittaolosuhteet ovat aina samat.

Eri kohdista korkeajännitejärjestelmää mittaamalla voidaan havaita erisuuruisia resistanssiarvoja. Lähtökohtaisesti voidaan kuitenkin olettaa, että koska sähkövirta pyrkii aina etenemään helppokulkuisinta reittiä, ei resistanssiarvon tulisi muuttua mitattaessa eri kohdista samaa väylää/virtapiiriä. Asia on kuitenkin syytä tarkistaa ja varmistaa suorittamalla koemittauksia. Mikäli samassa korkeajännitejärjestelmän virtapiirissä ja sähköisen alustan välillä havaitaan resistanssieroja eri puolilta korkeajännitevirtapiiriä mitattaessa, kirjataan saadut tulokset ylös ja tulosten vaihtelevuuden avulla lasketaan standardiepävarmuus resistanssieroille $u(ero)$ kaavan (15) mukaan. Tämän tekijän osalta korjausta mittaustuloksiin ei tarvitse tehdä, mutta epävarmuus otetaan kokonaisuudessa huomioon.

Esimerkki: havaitaan, että mitattaessa eristysvastusta eri puolilta korkeajännitevirtapiiriä saadaan tuloksia, jotka poikkeavat enintään $\pm 0,1$ k Ω . Oletetaan epävarmuustekijän olevan tasajakautunut (tyyppi B). Lasketaan resistanssieron standardiepävarmuus $u(ero)$ kaavan (15) mukaan:

$$u(ero) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,05 \text{ k}\Omega - (-0,05 \text{ k}\Omega)}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,03 \text{ k}\Omega.$$

Malliyhtälön luominen eristysresistanssin mittaustapahtumalle. Koska ympäristön lämpötila- ja kosteusepävarmuustekijöitä ei oteta huomioon mittaasepävarmuuden määrittämisessä tässä tapauksessa ja muut epävarmuustekijät ovat kaikki samaa muotoa, on malliyhtälö yksinkertainen summakaava, joka muodostetaan kaavan (17) mukaan:

$$R = R_{ind} + tark + kal + res + mjohd + ero.$$

Herkkyyskertoimien määrittäminen. Herkkyyskertoimet määritetään jokaiselle epävarmuustekijälle. Jos mittauksia on suoritettu yksi, ei mittarin näyttämälle R_{ind} voida laskea herkkyyskerrointa. Tässä työssä herkkyyskertoimet määritetään numeerisesti derivoinnin sijaan. Malliesimerkkinä käytetään tilannetta, jossa Fluke-eristysvastusmittarin näyttämä R_{ind} 500 voltin mittausjännitteellä on 9,67 MΩ. Muut arvot tähän esimerkkiin on otettu aiemmin esitetyistä Fluken mittausepävarmuuden määrittämisesimerkistä sekä muiden eristysresistanssin mittaamiseen liittyvien epävarmuustekijöiden aiheuttama epävarmuus -esimerkistä ellei toisin mainita. Asetetaan arvot lausekkeeseen:

$$R = R_{ind} + tark + kal + res + mjohd + ero$$

$$R = 9,67 \text{ M}\Omega + 0 + 0 + 0 + 0 + 0$$

Seuravaksi tehdään pieni muutos siihen tekijään, jonka herkkyyskerroin halutaan määrittää. Sopivan kokoinen muutos on esimerkiksi kyseisen tekijän epävarmuuden suuruinen, sillä epävarmuus on juuri realistisen kokoinen vaihteluväli tutkittavan epävarmuustekijän arvolle.

Tässä esimerkkitauksessa mittaustarkkuuden standardiepävarmuus on kaavan (15) mukaan laskettuna 0,28 MΩ. Lasketaan esimerkiksi edellä mainitun mittaustarkkuuden standardiepävarmuuden aiheuttama muutos mittaustuloksissa:

$$R' = R_{ind} + (tark + u(tark)) + kal + res + mjohd + ero$$

$$R' = 9,67 \text{ M}\Omega + (0 + 0,28 \text{ M}\Omega) + 0 + 0 + 0 + 0 = 9,95 \text{ M}\Omega$$

Mittaustuloksessa havaittu muutos jaetaan vielä aiheutetun muutoksen suuruudella kaavan (18) mukaan, jolloin tuloksena on epävarmuustekijän herkkyyskerroin:

$$c_{tark} = \left| \frac{R-R'}{u(tark)} \right| = \left| \frac{9,67 \text{ M}\Omega - 9,95 \text{ M}\Omega}{0,28 \text{ M}\Omega} \right| = 1$$

Edellä esitetyn mallin mukaisesti laskettuna muille tämän esimerkin epävarmuustekijöille herkkyyskertoimet olivat: $c_{kal} = 1$, $c_{res} = 1$, $c_{mjohd} = 1$ ja $c_{ero} = 1$.

Epävarmuustekijöiden vaikutusten arviointi toisiinsa sekä korrelaatioiden määrittäminen tarvittaessa. Saaren (2019) kanssa käydyissä keskusteluissa päädyttiin siihen tulokseen, että voidaan olettaa, ettei tämän työn kaltaisissa eristysvastusmittauksissa ole tekijöitä, jotka vaikuttaisivat toisiinsa, eli korrelaatioiden määrittämiselle ei ole tarvetta. Tietysti lämpötila sekä kosteus voivat vaikuttaa muihin epävarmuustekijöihin, mutta aiemmin kohdassa ”Muiden eristysresistanssin mittaamiseen liittyvien epävarmuustekijöiden aiheuttama epävarmuus” esitetyistä syistä johtuen niitä ei suoranaisesti oteta mukaan epävarmuuslaskentaan.

Yhdistetyn standardiepävarmuuden laskeminen. Kun herkkyyskertoimet epävarmuustekijöille on määritetty, voidaan laskea yhdistetty standardiepävarmuus eristysresistanssin mittaukselle $u(R)$ kaavan (21) mukaisesti:

$$u(R) = \sqrt{(1 * 0,28 M\Omega)^2 + (1 * 7,22 * 10^{-3} M\Omega)^2 + (1 * (2,89 * 10^{-3} M\Omega))^2 + (1 * (0,12 * 10^{-6} M\Omega))^2 + (1 * (0,03 * 10^{-3} M\Omega))^2}$$

$$u(R) = 0,28 M\Omega$$

Laajennetun epävarmuuden laskeminen. Viimeisenä laskutoimituksena esimerkkitapaukselle lasketaan laajennettu epävarmuus $U(R)$ kaavan (22) mukaan. Tässä tapauksessa kattavuuskertoimena käytetään arvoa $k = 2$:

$$U(R) = k * u(R) = 2 * 0,28 M\Omega = 0,56 M\Omega$$

Tuloksen ja sen epävarmuuden raportointi. Esimerkkitapauksessa saadut tulokset raportoidaan Saxholmin ja lisakan (2018) esimerkin mukaan kahden merkitsevän numeron tarkkuudella:

$$R = 9,7 M\Omega$$

$$U(R) = 0,56 M\Omega$$

Saxholmin ja lisakan (2018) mukaan tulokset voidaan esittää myös taulukoituna. Esimerkkitapauksen laskelmista on tulokset merkitty taulukkaan 6.

Taulukko 6. Eristysvastusmittauksen esimerkkitapauksen tulokset taulukoituna.

Tekijä	Arvo (MΩ)	Standardi EV (MΩ)	Jakauma	Herkkyys- kerroin (MΩ/MΩ)	Vaikutus koko- naisepävarmuu- teen (MΩ)
R_{ind}	9,67	-	Norm	1	-
$tark$	0	0,28	Tasa	1	0,28
kal	0	$7,22 * 10^{-3}$	Tasa	1	$7,22 * 10^{-3}$
res	0	$2,89 * 10^{-3}$	Tasa	1	$2,89 * 10^{-3}$
$mjohd$	0	$0,12 * 10^{-6}$	Tasa	1	$0,12 * 10^{-6}$
ero	0	$0,03 * 10^{-3}$	Tasa	1	$0,03 * 10^{-3}$
t	9,67 MΩ		$u(R)$	0,28 MΩ	
			$U(R)$	0,56 MΩ	($k = 2$)

Esimerkkitapauksessa mittalaitteen näyttämä R_{ind} perustuu yhden mittauksen näyttämään, joten sille ei voida tehdä tyypin A mukaista näyttämän hajonnan standardiepävarmuuden määrittämistä. Sen sijaan tässä esimerkkitapauksessa mittalaitteen näyttämän epävarmuus voidaan olettaa koostuvan sekä mittalaitteen resoluutiosta, että mittalaitteen tarkkuudesta, jolle on erikseen määritetty standardiepävarmuudet ja herkkyyskerroimet.

Tuloksista puuttuvat mittausympäristön lämpötilatieto sekä kosteustieto, jotka ovat oleellisia tulosten pätevyyden sekä jäljitettävyyden kannalta. Myös mitattaessa Fluke-eristysvastusmittarilla tulee myös käytetty mittausjännite merkitä tuloksiin.

Varmistettakoon vielä, että tässä työssä esitettyjä tuloksia mittausepävarmuuden määrittämistä koskien **ei tule** käyttää suoraan ilman, että tulosten paikkansapitävyys on ensin varmistettu tekemällä testausmittauksia, jolle määritetään mittausepävarmuus tämän työn ohjeiden mukaisesti. Testimittauksia tulee suorittaa pieni sarja, jotta pystytään osoittamaan, että tässä työssä esitettyssä mittausepävarmuuden määrittämisessä on varmasti otettu kaikki vaikuttavat epävarmuustekijät huomioon, jotta tulokset ovat päteviä ja jäljitettävissä. Myös testimittauksien suorittamista eri olosuhteissa sekä eri laitteilla suositellaan tämän työn tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi.

Toimeksiantajayrityksen mittauslaitteiden vaatimustenmukaisuus. UNECE R100 sääntöä sekä ohjetta EA-4/20 tutkiessa ainoa vaatimus käytettäville eristysvastusmittalaitteille oli se, että ”eristysvastuksen mittauksessa on käytettävä väli-
nettä, johon voidaan johtaa tasavirta, jonka jännite on suurempi kuin korkeajännite-
väylän toimintajännite” (UNECE R100). Fluken mittausjännitteet ovat huomattavasti
suurempia kuin sähkö- ja hybridiajoneuvojen korkeajännitepuolen toimintajännit-
teet, joten edellä mainittu vaatimus täyttyy. Näin ollen voidaan olettaa, että toimek-
siantajayrityksen mittauslaitteet Fluke 1550C sekä Metrel MI 3242 MicroOhm 2A
ovat soveltuvia ja tarkoituksenmukaisia niillä suoritettaviin mittauksiin aina, kun niillä
on voimassa oleva kalibrointitodistus. Mittauslaitteiden hyvyttä voidaan ajatella ku-
vaavan mittauslaitteiden teknisten ominaisuuksien vaikutuksella mittausepävar-
muuteen, eli mitä vähemmän itse mittalaitteesta aiheutuvat epävarmuustekijät vai-
kuttavat kokonaisepävarmuuteen, sitä ”parempi” mittauslaite on.

Huomion arvoinen seikka oli kuitenkin Fluken kalibrointitodistus. Siinä ei ollut val-
miiksi laskettu epävarmuutta kullekin mittausalueelle, vaan epävarmuus piti itse
määrittää. Myöskään kalibroinnin epävarmuuden kattavuuskerrointa ei oltu ilmoi-
tettu lainkaan. Kalibrointiolosuhteet olivat kuitenkin merkitty kalibrointitodistukseen.
Kalibrointitodistus vaikuttaa hyvin kyseenalaiselta, mikä toisaalta on yllättävää ja
erikoista, sillä kalibrointi on suoritettu Würth:n toimesta. Kokonaisuudessaan Fluken
kalibrointitodistusta voisi kuvailla epäilyttäväksi, epäpäteväksi sekä jopa epäluotet-
tavaksi.

7 YHTEENVETO

Työ pyrittiin rajaamaan sellaiseksi, että se on mahdollista suorittaa suunnitellussa aikataulussa ottaen huomioon työn tekijän valmiudet sekä aihealueen taustatuntemus, kuin myös tavoiteltu valmistumisajankohta sekä itse työn haastavuus ja laajuus. Siinä mielessä rajaaminen onnistunut, koska mitään oleellista ei vaikuttanut jäävän pois työstä sekä työ saatiin valmiiksi kevään 2019 aikana.

Kokonaisuudessaan työ oli hyvin laaja sekä monipuolinen. Työn tekijälle aihealue oli sekä mielenkiintoinen että myös erittäin haastava. Haastavuutta lisäsi se, että varsinaisia tuloksia saavutettaessa täytyi työn aikana kerättyä informaatiota soveltaa hyvin paljon, jotta päästiin haluttuihin lopputuloksiin.

Alkuperäisen tavoitteen mukaan kuitenkin mittausepävarmuutta eristysresistanssin mittaamiselle ei saatu määritettyä siten, kuin oli alun perin ajateltu. Toki tämä johtui täysin pelkästään siitä, ettei mittausepävarmuutta eristysresistanssin mittauksille olisikaan edes voinut määrittää suoraan käyttökelpoiseen muotoon, koska jokaisessa mittauksessa on jotain erilaista muihin verrattuna, joka täytyy ottaa erikseen huomioon. Mittausepävarmuutta ei siis tämän aihealueen tapauksessa voi määrittää jokaiselle mittaukselle täysin saman kaavan mukaan, mutta kuitenkin tuloksena saatiin tuotettua kattava ohjeistus esimerkkeineen mittausepävarmuuden määrittämiseksi eristysresistanssin mittauksissa.

Teoriaosuutta kirjoitettaessa aihealue laajeni huomattavasti ja teoriamateriaalia syntyi kenties jopa hieman liikaa, vaikka osaa materiaalista karsittiinkin pois. Teoriaosuuden kirjottamiseen myös meni odotettua enemmän aikaa, mikä viivästytti työn valmistumista suunnitellusta aikataulusta. Myös yleisesti ottaen ajankäyttö tämän työn tekemisessä olisi voinut olla parempaa.

Kehitysideana tämän työn jatkoksi ensisijaisesti voisi olla valmiin Excel-taulukko-pohjan tuottaminen, jonka avulla mittausepävarmuuden määrittäminen onnistuisi vaivattomammin ja nopeammin. Toinen kehitysidea on tutkia lämpötilamuutoksen sekä suhteellisen kosteuden muutoksen vaikutusta mittaustuloksiin, sekä mahdollisesti valmiin laskupohjan tuottaminen olosuhdemuutosten vaikutuksen mittaustuloksiin laskemiseksi, sekä myös epävarmuudet näille tekijöille.

LÄHTEET

- Ahoranta, J. 2016. Sähkötekniikka. 15. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjännitetechniikka. 4. painos. Helsinki: Gaudeamus.
- Autoalan Tiedotuskeskus. 29.1.2018. Sähkö- ja hybridautojen määrän kehitys: Liikennekäytössä olevat sähkö- ja hybridihenkilöautot. [Verkojulkaisu]. Tieliikenteen tilastokeskus. [Viitattu 23.1.2019]. Saatavana: http://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahko- ja hybridautojen_maaran_kehitys
- Chauvin-Arnoux. Ei päiväystä. Eristysvastuksen mittausopas. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavana: <https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/07/Eristysvastuksen-mittausopas.pdf>
- EA-4/02. 2013. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European co-operation for Accreditation.
- EnergiaKokeilut.fi. Ei päiväystä. eBUS ja Linkker. [Verkojulkaisu]. EnergiaKokeilut.fi. [Viitattu 5.3.2019]. Saatavana: <http://energiakokeilut.fi/liikenne/ebus-ja-linkker>
- Erjavec, J. 2013. Hybrid, Electric and Fuel-Cell Vehicles (2nd Edition). [Verkkokirja]. Cengage Learning, Inc. [Viitattu 25.1.2019]. Saatavana Knovel -palvelusta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Fluke. Ei päiväystä. Fluke 1550C FC Insulation Resistance Testers. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.4.2019]. Saatavana: <https://www.fluke.com/fi-fi/tuote/sahkotes-taus/eristysvastusmittarit/fluke-1550c>
- Fluke. 2015. Eristysvastuksen mittaaminen. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 15.3.2019]. Saatavana: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9901566_FIN_A_W.PDF
- Hautala, M. & Peltonen, H. 2014. Insinöörin (AMK) Fysiikka: Osa I. 11. painos. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy.
- Hietalahti, L. 2011. Sähkökäyttö- ja hybriditekniikka: Ajoneuvo- ja työkonetyöhön. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S. & Kärhä, P. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Espoo: Mittatekniikan keskus.

- Juustoportti. 2017. Juustoportille Suomen tehokkain sähköautojen matkalataus-
asema. 30.9.2017. [Kuva]. Juustoportti Oy. [Viitattu 28.2.2019]. Saatavana
Juustoportin Facebook-sivuilta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Karsimus, H. 5.12.2018. Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q3/2018. [Verkköjulkaisu]. Teknologiateollisuus ry. [Viitattu 23.1.2019]. Saatavana: [https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/file_attachments/sahkoinen liikenne tilannekatsaus 2018 q3 20181205 jaettava.pdf](https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/file_attachments/sahkoinen_liikenne_tilannekatsaus_2018_q3_20181205_jaettava.pdf)
- Keinänen, T. & Järvinen, M. 2014. Mittaustekniikka. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Khajepour, A., Fallah, S. M. & Goodarzi, A. 2014. Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control - A Mechatronic Approach. [Verkkokirja]. Hoboken Wiley. [Viitattu 12.2.2019]. Saatavana ProQuest Ebook Central -palvelusta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Laiho, E. 11.1.2018. Toroidionilla olisi kaikki valmiina tuotantoon - uusia tuotteita pidetään vielä piilossa. [Verkkolehtiartikkeli]. Länsi-Uusimaa-lehti. [Viitattu 5.3.2019]. Saatavana: <https://www.lansi-uusimaa.fi/artikkeli/597712-toroidionilla-olisi-kaikki-valmiina-tuotantoon-uusiuuotteita-pidetaan-viela>
- Liikennefakta. 18.1.2018. Vaihtoehtoisten käyttövoimien ensirekisteröintimäärä kasvoi yli kaksinkertaiseksi edellisvuodesta. [Verkkokirja]. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. [Viitattu 29.1.2019]. Saatavana: [https://www.liikenne-fakta.fi/ajankohtaista/5904/vaihtoehtoisten kayttovoimien_ensirekisterointi-maara_kasvoi_yli_kaksinkertaiseksi_edellisvuodesta](https://www.liikenne-fakta.fi/ajankohtaista/5904/vaihtoehtoisten_kayttovoimien_ensirekisterointi-maara_kasvoi_yli_kaksinkertaiseksi_edellisvuodesta)
- Linkker Oy. Ei päiväystä. Linkker Story. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.3.2019]. Saatavana: <http://www.linkkerbus.com/company/>
- Linkker Oy. Ei päiväystä. Linkker Technology. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.3.2019]. Saatavana: <http://www.linkkerbus.com/technology/>
- Linkker Oy. 9.1.2019. LINKKER LE13 AUTOJA KOSKEVA TAKAISINKUTSUKAMPANJA PÄÄTTYNyt JA TILAPÄINEN AJOKIELTO PURETTU KAIKKIEN AUTOJEN OSALTA – TURUSSA, HELSINGISSÄ JA LUULAJASSA. [Verkkokirja]. Lahti: Linkker Oy. [Viitattu 5.3.2019]. Saatavana: <http://www.linkkerbus.com/updates/>
- Liu, W. 2017. Hybrid Electric Vehicle System Modeling and Control: Second Edition. [Verkkokirja]. John Wiley & Sons, Inc. [Viitattu 12.2.2019]. Saatavana ProQuest Ebook Central -palvelusta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Metrel. Ei päiväystä. Continuity testers - MI 3242 MicroOhm 2A. [Verkkokirja]. [Viitattu 2.4.2019]. Saatavana: https://www.metrel.si/assets/Metrel/PDF_dokumentacija/Single_leaflets/MI_3242_MicroOhm_2A/Ang/Single_2019_MI_3242_MicroOhm_2A_Ang.pdf

- Miller, J. M. 2008. Propulsion Systems for Hybrid Vehicles. Stevenage, UK: Institution of Electrical Engineers.
- RMK Vehicle Corporation. 2018. RMK E2 - Hubless electric roadster. [Verkkosivu]. [Viitattu 7.3.2019]. Saatavana: <https://rmkvehicles.com/#e2-introduction>
- Saari, E. 4.2.2019. Opinnäytetyö. [Henkilökohtainen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Joonas Ruohoniemi. [Viitattu 29.3.2019].
- Saxholm, S. & Iisakka, I. 27.11.2018. Mittausepävarmuuden määrittäminen - perusteoria. [Ppt-tiedosto]. VTT. [Viitattu 27.3.2019]. Julkaisematon
- SFS-EN 60529 + A1. 2000. Sähkölaitteiden koteloitiluokat (IP-koodi). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- Tervola, J. 7.12.2018. Suomalainen sähkömoottoripyörä aiotaan tuoda sarjatuotantoon - Toimintasäde 200–300 kilometriä. [Verkkolehtiartikkeli]. Kauppalehti. [Viitattu 7.3.2019]. Saatavana: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/suomalainen-sahkomoottoripyora-aiotaan-tuoda-sarjatuotantoon-toimintasade-200300-kilometriä/8229c755-389d-4314-9b86-8d23f12073d6>
- The International System of Units (SI). 2006. Ranska: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).
- Toroidion. Ei päiväystä. Land Vehicle Powertrain. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.3.2019]. Saatavana: <https://www.toroidion.com/technology/land-vehicle-powertrain>
- Toroidion. Ei päiväystä. Press - Images. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.3.2019]. Saatavana: <https://www.toroidion.com/media/press>
- Toroidion. Ei päiväystä. Toroidion Story. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.3.2019]. Saatavana: <https://www.toroidion.com/#concept>
- Toyota Suomi. Ei päiväystä. Hybridiajoneuvot: Toyotalla on maailman monipuolisimmat hybridimallit. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.1.2019]. Saatavana: <https://www.toyota.fi/toyota/ymparisto/puhtaampaa-ilmaa/hybridiajoneuvot.json>
- Traficom. 16.1.2019. Tilastotietokanta: Liikennekäytössä 31.12.2018 olevat henkilöautot alueittain. [Verkkosivu]. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. [Viitattu 23.1.2019]. Saatavana: http://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi_Liikennekaytossa_olevat_ajoneuvot/010_kanta_tau_101.px/?rxid=b31ddc7f-f7c7-4dce-8d5a-c818d24c007f
- Vesa, A. J. 14.9.2018. Ladattavat hybridit markkinajohtajia: Täyssähköautojen osuus vielä vaatimaton. [Verkkosivu]. Helsinki: Energiategollisuus ry. [Viitattu 29.1.2019]. Saatavana: <https://www.energiauutiset.fi/sahkoverkot/ladattavat-hybridit-markkinajohtajia.html>

UNECE R100. 2015. Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission sääntö (UN/ECE) 2015/505 nro 100 - Yhdenmukaiset vaatimukset, jotka koskevat ajoneuvojen hyväksyntää sähköiseen voimalaitteeseen sovellettävien erityisvaatimusten osalta.