

# **Generaattorin staattorin urakohtaisen osittaispurkausmittauksen kehitys**

Otto Aunola

Opinnäytetyö

Toukokuu 2021

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t) Aunola Otto	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2021
	Sivumäärä 67	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Generaattorin staattorin urakohtaisen osittaispurkausmittauksen kehitys</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Markku Ström, Harri Tuukkanen		
Toimeksiantaja(t) Fortum Power and Heat Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Generaattorin staattorin urakohtaisen osittaispurkausmittauksen avulla pyritään tarkemmin paikallistamaan staattorin ura-alueella tapahtuvia osittaispurkauksia. Purkausten mittaukseen työn toimeksiantajalla oli käytössään yksi itse valmistettu vanha mittausanturi. Tästä syntyi tarve uudelle anturille. Tavoitteena oli parantaa yrityksen toimitusvarmuutta uudella itse valmistettavalla anturilla sekä oppia ymmärtämään mittauksesta saatuja tuloksia paremmin.</p> <p>Anturin rakenne on yksinkertainen ja tästä syystä suunnitteluvaiheen pääpaino kohdistettiin materiaalivalintoihin. Materiaalivalinnoissa tärkeintä oli ferriittisydämen oikean materiaalin valinta, jotta anturi saatiin toimimaan optimaalisesti halutuilla taajuuksilla.</p> <p>Varsinainen kehitystyö liittyen anturin yksityiskohtaisiin rakenteellisiin ratkaisuihin suoritettiin määrällisen tutkimuksen keinoin tekemällä lukuisia koemittauksia eri anturimalleilla. Koemittauksia suoritettiin IEC 60270 standardin mukaisella osittaispurkausjärjestelmän testauskalibraattorilla sekä oikeilla osittaispurkauksilla. Osittaispurkauksia saatiin aikaa tekemällä vikoja sähkökoneen vyyhteihin ja syöttämällä niihin suurjännitettä vyyhtien ollessa maadoitetussa urassa.</p> <p>Mittaustuloksista optimaalinen rakenne valikoitiin kvantitatiivisin sekä kvalitatiivisin perustein. Kehitetty anturimalli oli kaikilta ominaisuuksiltaan riittävän tarkka, jotta sillä voitaisiin korvata vanha käytössä ollut anturi. Koemittauksissa käytössä olevasta mittausjärjestelmästä löydettiin myös ominaisuus, jonka avulla havaittiin testausolosuhteissa järjestelmän herkkyuden parantuneen lähes kymmenkertaisesti.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Osittaispurkaus, urapurkaus, tahtigeneraattori, kunnossapito		
<p>Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)</p> <p>Liitteet 2 ja 3 ovat salassa pidettäviä, jotka on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassa pitoaika viisi (5) vuotta, salassapito päättyy 21.5.2026.</p>		

Author(s) Aunola Otto	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2021 Language of publication: Finnish
	Number of pages 67	Permission for web publication: X
Title of publication <b>Development of Slot Specific Partial Discharge Measurement for Generator Stator</b>		
Degree programme Degree program in Electrical and Automation Engineering		
Supervisor(s) Ström Markku and Tuukkanen Harri		
Assigned by Fortum Power and Heat Oy		
Abstract  <p>Slot specific partial discharge measurement is used for localizing partial discharges in generator stator slot area. For this measurement the client company had only one self-made sensor. From there came the need to develop a new sensor which could be used for slot specific partial discharge measurement. Goal was to improve the delivery reliability of this measurement and also to further enhance the knowledge about the measurement.</p> <p>Structure of the sensor is rather simple, so therefore the main focus was concentrated on the materials of the sensor. Most important of which was the ferrite core, so that the sensor would work optimally in the required frequency domain.</p> <p>The development work itself regarding structural details of the sensor was made with number of different models. Each model was tested with applying calibration pulses with IEC 60270 specified partial discharge calibrator to the test coils. Prototypes were also tested with real partial discharges. Partial discharges were caused by damaging the graphite coating of the coils and then applying high voltage to them whilst being in grounded slots.</p> <p>Based on the data collected from the measurements the final design was chosen by qualitative and quantitative criterion. The sensor developed in the testing was found to be accurate enough in all aspects, so that the old sensor could be replaced in future. Also during testing a feature was found in the measuring system used for the measurement of partial discharges, that improved the sensitivity in testing environment by almost ten times.</p>		
Keywords/tags (subjects) Partial discharge, Slot discharges, Synchronous generator, Maintenance		
Miscellaneous (Confidential information) Appendixes 2 and 3 are confidential which have been removed from the public thesis. Grounds for secrecy: Act on the Openness of Government Activities 621/1999, Section 24, 17: business or professional secret. Period of secrecy is five years and it ends 21.5.2026.		

## Sisältö

<b>Lyhenteet</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Energiantuotanto Suomessa</b> .....	<b>6</b>
<b>3 Sähköntuotanto voimalaitoksessa</b> .....	<b>7</b>
3.1 Turbiini.....	7
3.2 Tahtigeneraattori .....	8
3.2.1 Staattori .....	10
3.2.2 Roottori.....	14
3.2.3 Magnetointi .....	15
3.3 Muuntaja .....	16
<b>4 Osittaispurkaukset pyörivissä sähkökoneissa</b> .....	<b>17</b>
4.1 Osittaispurkaus ilmiönä.....	17
4.1.1 Osittaispurkauksen syttyminen .....	19
4.1.2 Pulssin kytkeytyminen .....	20
4.2 Osittaispurkausten mittaus .....	23
4.2.1 Online- ja Offline-mittaus .....	23
<b>5 Urakohtainen osittaispurkausmittaus</b> .....	<b>28</b>
5.1 Mittausmenetelmän esittely .....	28
5.1.1 Mittauslaitteisto ja vaatimukset.....	30
5.2 Mittaustapahtuma käytännössä .....	32
5.2.1 Mittauksen valmistelu .....	32
5.2.2 Mittaustapahtuma.....	33
5.3 Mittaustulosten analysointi .....	34
5.3.1 Sähköinen vanheneminen .....	36
5.3.2 Yksittäinen värähtelevä käämisauva .....	36
<b>6 Urakohtaisen osittaispurkausmittauksen kehitys</b> .....	<b>37</b>
6.1 Anturin kehitys .....	37

6.1.1	Kehitystyön lähtötilanne .....	37
6.1.2	Materiaalivalinnat .....	41
6.1.3	Anturimallien testaus kalibrointipulssilla .....	42
6.2	Mittaukset osittaispurkauksilla .....	47
6.2.1	Mittaustaajuuden vaikutus.....	48
6.2.2	Osittaispurkaukset viallisissa vyyhdeissä .....	49
6.2.3	Mittaustulokset .....	51
6.3	Tulevaisuuden kehityskohteet .....	52
<b>7</b>	<b>Johtopäätökset ja pohdinta .....</b>	<b>53</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>55</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>58</b>
	Liite 1. Esimerkki 42-uraisen koneen urakohtaisesta mittauksesta .....	58
	Liite 2. Optimaalisen rakenteen selvitys kalibrointipulsseilla (salassa pidettävä) 63	
	Liite 3. Anturien vertailumittaukset osittaispurkauksilla (salassa pidettävä) .....	64
	 <b>Kuviot</b>	
	Kuvio 1 Sähköntuotanto maakunnittain .....	6
	Kuvio 2 Höyryturbiinin roottori, staattorin kansi avattuna. ....	8
	Kuvio 3 Halkileikkaus umpinapaisesta tahtigeneraattorista.....	9
	Kuvio 4 Segmenteistä kasattu staattorin levypaketti .....	11
	Kuvio 5 Esimerkki 18 uraisen ja 2 napaisen koneen staattorikäimityksestä.....	12
	Kuvio 6 Röbel-punottu käämisauva .....	12
	Kuvio 7 Staattorikäämien eristysjärjestelmä .....	14
	Kuvio 8 Umpi- ja avonapaisen roottorin magneettivuon kulkureitit .....	15
	Kuvio 9 Tyypillisiä purkauskohtia staattorikäimityksessä .....	18
	Kuvio 10 Näkyvä kipinä levypaketin ja jännitteisen käämin välillä offline-mittauksissa .....	27
	Kuvio 11 Urakohtaisen osittaispurkausmittauksen periaatekuva .....	29
	Kuvio 12 Erään generaattorin U-vaiheen mittaustulokset kuvaajassa .....	35

Kuvio 13 Esimerkki sähköisestä vanhenemisesta urakohtaisesti .....	36
Kuvio 14 IVO Oy:n valmistama vanha ferriittiantenni .....	38
Kuvio 15 Läpivalaisukuva vanhasta ferriittiantennista .....	39
Kuvio 16 Ferriitin kompleksinen permeabiliteetti taajuuden funktiona .....	42
Kuvio 17 Testivyyhti kulmaraudasta valmistetussa urassa .....	43
Kuvio 18 Johtimen paksuuden vaikutus anturin toimintaan .....	44
Kuvio 19 Sydänmateriaalin vaikutus anturin toimintaan kalibrointipulsseilla .....	45
Kuvio 20 Kelan kierrosten vaikutus kalibrointipulsseilla .....	46
Kuvio 21 Prototyypin prosentuaalinen ero referenssimittauksiin taajuuden funktiona. ....	47
Kuvio 22 IEEE 1434 mukainen anturi mittaushetkellä .....	48
Kuvio 23 Radiohäiriöjännite mittaustaajuuden funktiona. ....	49
Kuvio 24 Testivyyhdin 2 johtava pinta hiottuna koko matkalta. ....	50
Kuvio 25 Mittaustulosten prosentuaalinen poikkeama mittaustaajuuden funktiona.	52

## Lyhenteet

C	Coulombi
HF	High Frequency, Korkeataajuus
Hz	Hertzi
kHz	Kilohertsi
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV	Kilovoltti
MHz	Megahertsi
mm	Millimetri
ns	Nanosekunti
pC	Pikocoulombi
PDEV	Osittaispurkausten sammumisjännite
PDIV	Osittaispurkausten syttymisjännite
psi	Pounds per square inch, paunaa neliötuumaa kohti
Q	Sähkövaraus
r/min	Kierrosta minuutissa
r/s	Kierrosta sekunnissa
TWh	Terawattitunti
UHF	Ultra high frequency, ultrakorkea taajuus
$U_{RDV}$	Radiohäiriöjännite
$\mu_e$	Tehollinen permeabiliteetti
$\mu_r$	Suhteellinen permeabiliteetti
$\mu V$	Mikrovoltti
V/mm	Läpilyöntilujuus, Voltti/millimetri
$X_L$	Impedanssi

# 1 Johdanto

Sähkö ja sen tuotannon varmuus on yhteiskuntamme toiminnan kannalta elintärkeää. Suurten sähkökoneiden kunnonvalvonnalla pyritään takaamaan sähköä tuottavien voimalaitosten toimintavarmuus. Etenkin suurten laitosten vanhentuessa sähkökoneille suoritettavien kunnonvalvontamittausten tärkeys korostuu. Kunnonvalvontamittausten avulla voidaan havaita kehittyviä vikatilanteita sekä reagoida niihin suurempien vahinkojen estämiseksi.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Fortum Power and Heat Oy, jonka liiketoiminta keskittyy sähkön ja lämmön tuotantoon. Turbine and Generator Services -yksikkö tarjoaa voimalaitosten lisäksi teollisuuslaitoksille asiantuntijapalveluita sekä huolto- ja kunnossapitopalveluita. Suurten sähkökoneiden kunnonvalvontamittaukset ovat osa yksikön ydintoimintaa, johon työn pääaiheena oleva urakohtainen osittaispurkausmittaus kuuluu.

Urakohtainen osittaispurkausmittaus on Fortumissa käytetty mutta yleisesti melko harvinainen kunnonvalvontamittaus. Mittauksen avulla pyritään havaitsemaan sähkökoneen staattorin ura-alueella tapahtuvia osittaispurkauksia. Markkinoilla on tällä hetkellä vain muutamia kaupallisia valmistajia, jotka valmistavat mittaukseen suunniteltua laitteistoa. Mittaukseen liittyvät turvallisuusriskit ovat saaneet monet yritykset välttämään kyseistä mittausta, ja siksi mittauksen kehitys on viime vuosina ollut lähes olematonta.

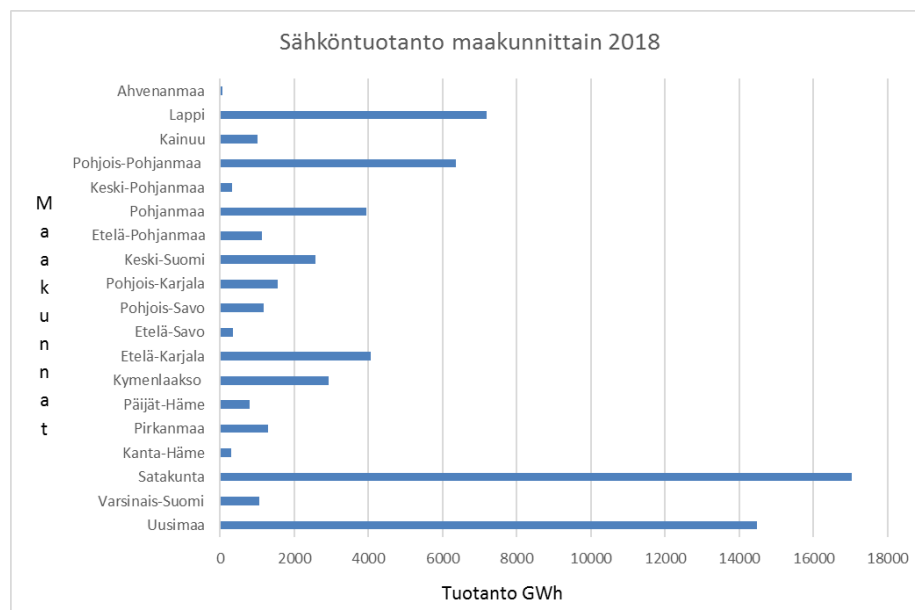
Opinnäytetyön tavoitteena on herättää mielenkiinto kyseistä mittausta kohtaan. Tehtävänä on tutkia ja kehittää uusi valmistuskelpoinen mittausanturi urakohtaisten osittaispurkausten mittaukseen. Erilaisilla prototyypeillä haetaan mahdollisia parannuksia jo olemassa olevalle mittausanturille. Tutustumalla mittauksen teoriaan pyritään ymmärtämään myös mittaustuloksia entistä paremmin, tarkempien analyysien saavuttamiseksi. Lisäksi opinnäytetyön aikana pohditaan kuinka mittauksen turvallisuutta voitaisiin parantaa.



## 2 Energiantuotanto Suomessa

Sähkön kokonaiskäyttö Suomessa väheni vuonna 2019 ensimmäistä kertaa sitten vuoden 2015. Kokonaiskäyttö Suomessa laski 1,5 TWh, kokonaiskäytön ollessa 86 TWh, eli 86 miljardia kilowattituntia. Prosentuaalisesti sähkönkäyttö väheni 1,7 %. Suomessa käytettävästä sähköenergiasta 77 % toteutetaan kotimaisella tuotannolla ja loput 23 % tuodaan pohjoismaista, Virosta sekä Venäjältä. Kotimaisella ydinvoimalla ja nettotuonnilla naapurimaista katetaan puolet Suomen sähköenergian tarpeesta. Merkittävänä muutoksena vuonna 2019 voidaan myös pitää Vieroon suuntautuneen sähkön viennin 60 % kasvua edellisvuoteen verrattuna. (Energiavuosi 2019.)

Sähköntuotanto Suomessa on monipuolista ja hyvin hajautettua verrattuna muihin Euroopan maihin. Suomessa on noin 120 energiayritystä, jotka tuottavat sähköenergiaa noin 400 voimalaitoksessa ympäri Suomea. Näistä voimalaitoksista lähes puolet on vesivoimalaitoksia. Hyvin hajautetulla ja monipuolisella sähköntuotannolla saadaan lisättyä sähkön hankinnan varmuutta. (Kostama 2019.) Kuvio 1 havainnollistaa sähköntuotannon hajautuksen Suomessa maakunnittain. Kuviosta on havaittavissa myös ydinvoiman vaikutus Satakunnan ja Uudenmaan osalta muihin maakuntiin verrattuna.



Kuvio 1 Sähköntuotanto maakunnittain. (Korjula & Pasi 2018)

Tuotantomuodoista tärkeimpiä Suomelle ovat ydinvoima, vesivoima, puupolttoaineet, kivihiili ja maakaasu. Tuulivoiman osuus on kokonaistuotantoa ajatellen hyvin pieni, mutta sen kapasiteettia on kasvatettu pelkästään vuonna 2019 jopa 12 %. Sähköntuotannosta lähes kolmannes tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotannolla. Tällä tavoin käytettävästä energialähteestä saadaan hyödynnettyä jopa 90 % sen energiasisällöstä. (Kostama 2019.)

### 3 Sähköntuotanto voimalaitoksessa

#### 3.1 Turbiini

Turbiini on voimakone, joka muuttaa siihen syötetyn nesteen tai kaasun kineettisen energian liike-energiaksi. Valjastettu liike-energia muutetaan sähköenergiaksi turbiiniin liitetyn generaattorin avulla. Rakenteeltaan turbiini koostuu yksittäisistä lavoista, joiden läpi haluttu väliaine, kuten höyry tai vesi, johdetaan. Turbiinin lapojen määrä ja muoto vaihtelee merkittävästi käyttökohteesta riippuen. Sähköntuotannossa yleisesti käytettyjä turbiineja ovat kaasuturbiini, vesiturbiini, tuuliturbiini sekä höyryturbiini. (Afework ym. 2018.) Heinonen (2010, 3) mukaan höyryturbiinien avulla tuotetaan valtaosa maailman sähköenergiasta.

Höyryturbiinin avulla muutetaan laitosprosessissa tuotetun erittäin kuuman ja korkeapaineisen höyryn energia pyöriväksi liike-energiaksi. Voimalaitokset, joissa höyryturbiineja käytetään, ovat ydinvoimalaitoksia sekä lauhde- ja vastapainelaitoksia. (Heinonen 2010, 3.)

Höyryturbiinin toiminta perustuu kuuman ja paineistetun höyryn laajenemiseen ja sen luovuttamaan energiaan. Kylläinen tai tulistettu höyry johdetaan turbiinin siivistöön, jossa sen virtausnopeus kasvaa painegradientin johdosta kohdatessaan staattorisiivistön. Staattorisiivistöstä höyry ohjautuu turbiinin akseliin kiinnitettyyn roottori-

siivistöön, mikä aiheuttaa akselin pyörimisliikkeen. Staattori- ja roottorisiivistön muodostamaa paria kutsutaan turbiinivaiheeksi, joita on yhtä turbiinia kohden useita. (Mts. 4.)



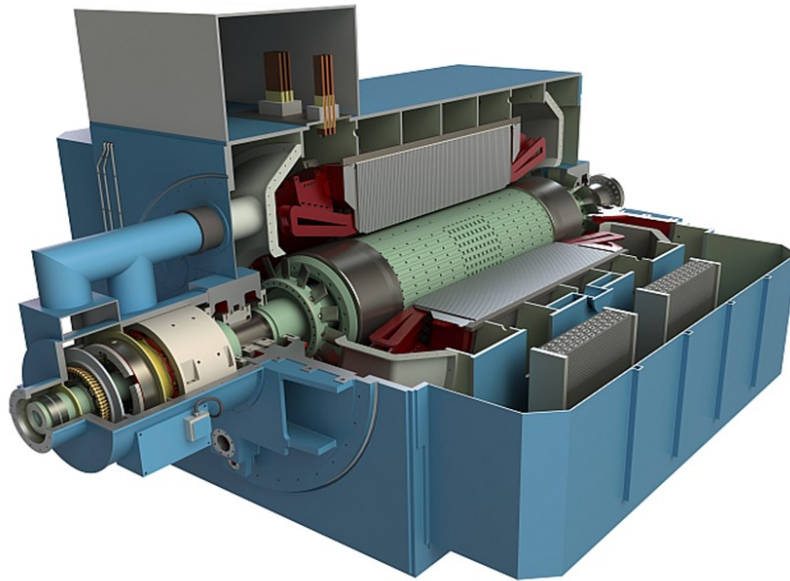
Kuvio 2 Höyryturbiinin roottori, staattorin kansi avattuna. (Fortum 2015)

Kulkeutuessaan siivistön läpi höyry laajenee, joka aiheuttaa paineen alenemista. Painetta höyryturbiineissa on yleisesti jaettu korkeapaine- ja matalapaineturbiineihin. Korkeapaineturbiinissa, johon höyry ensin johdetaan, höyryn paine laskee noin kymmenkertaisesti tulopaineeseen verrattuna. Matalapaineturbiinissa höyryn paine laskee jopa noin 300-kertaisesti tulopaineeseen verrattuna. Suurista paine-eroista johtuen korkea- ja matalapaineturbiinien fyysisessä koossa on merkittävä ero. Matalapaineturbiinin jälkeen höyry ohjataan lauhduttimelle, jossa höyry muuttuu takaisin vedeksi. (Heinonen 2010, 4-5.)

Nykyaikaisen höyryturbiinilaitoksen pääkomponentteihin kuuluvat korkeapaineturbiini, matalapaineturbiini, turbiinin säätöventtiili, kosteuden erotin, välitulistin, turbiinin väliottojärjestelmä, generaattori sekä lauhdutin. Välitulistimia ja matalapaineturbiineja voi olla useampia. Lisäksi kokonaisuuteen voi kuulua keskipaineturbiini korkea- ja matalapaineturbiinin välissä. (Mts. 8.)

### 3.2 Tahtigeneraattori

Tahtigeneraattori on sähkökone, jonka tehtävä on muuttaa mekaaninen liike-energia sähköenergiaksi. Generaattorin kaksi pääkomponenttia ovat staattori ja roottori. Staattori on koneen runkoon kiinnitetty staattinen osa konetta. Roottori on laakereiden varassa, staattorin sisällä pyörivä osa konetta. (Hietalahti ym. 2020, 19.)



Kuvio 3 Halkileikkaus umpinapaisesta tahtigeneraattorista. (Csaba 2019, 6)

Roottoria pyöritetään ulkoisen voimakoneen avulla. Pyörivän roottorin käämitykseen syötetään magnetointilaitteiston avulla tasavirtaa, joka saa aikaan magneettivuon roottorin ympärille. Roottorin pyöriessä myös magneettikenttä pyörii. Pyörivän magneettikentän vuoviivat leikkaavat staattorin käämisauvoja, jolloin käämitykseen indusoituu sinimuotoinen kolmivaiheinen lähdejännite. Lähdejännitteen suuruus voidaan johtaa yhtälöstä 1. (Hietalahti ym. 2020, 21.)

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_k f N \Phi_m \quad (1)$$

missä  $f_k$  on käämityskerroin  
 $f$  on taajuus hertseinä (Hz)  
 $N$  on yhden vaiheen sarjaan kytkettyjen johdinkierrosten määrä  
 $\Phi_m$  on yhden navan magneettivuon

Koneeseen indusoituvan jännitteen taajuuteen vaikuttaa akselin pyörimisnopeus sekä koneen napapariluku. Esimerkiksi roottorissa, jossa on yksi napapari ja jännitteen taajuudeksi halutaan 50 Hz, tulee roottorin pyöriä 50 r/s, joka tarkoittaa 3000 r/min. Jännitteen taajuus voidaan laskea yhtälöstä 2. (Mts. 21-22.)

$$f = \frac{n_s}{p} \quad (2)$$

missä  $n_s$  on pyörimisnopeus  
 $p$  on napaparien lukumäärä

Pyörimisnopeuden ja taajuuden ollessa yleensä vakioita on lähdejännitteen suuruus riippuvainen magnetointivirran suuruudesta. Lisäämällä magnetointivirtaa kasvaa lähdejännite verrannollisesti magnetointivirtaan nähden, kunnes rauta kyllästyy magneettisesti. Kyllästymisen johdosta indusoituvan lähdejännitteen kasvu hidastuu, vaikka magnetointivirtaa kasvatettaisiin. (Mts. 23.)

Raudan kyllästymisestä sekä koneen rakenteesta voidaan johtaa vakio  $k$ , jolloin kaavan 1 ainoa muuttuva tekijä on magneettivuo. Tämän ansiosta kaava voidaan yksinkertaistaa muotoon. (Mts. 23.)

$$E = k I_m \quad (3)$$

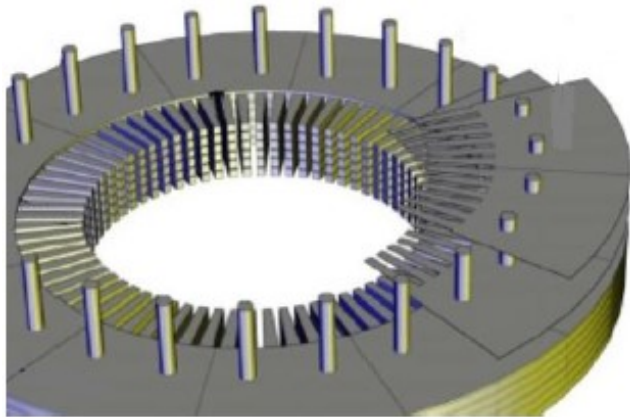
missä  $k$  on rakennetta ja raudan kyllästymistä kuvaava vakio  
 $I_m$  on magnetointivirta

### 3.2.1 Staattori

Staattorin runko on generaattorin näkyvin osa. Rungon tehtävänä on tukea koko rakennelmaa sekä toimia generaattorin ulkokuorena. Ulkokuoren tulee myös toimia vetyjäähdytteisissä koneissa paine-astiana, jotta se pitäisi paineistetun jäähdytyskaasun sisällään. Suunnittelussa on otettava huomioon myös rungong ominaistaajuus. Tahtikoneen taajuuden ollessa verkkotaajuuden kanssa sama 50 Hz, ei rungong ominaistaajuus saa olla lähellä 50 Hz tai 100 Hz. (Kerszenbaum & Klempner 2018, 64-65.)

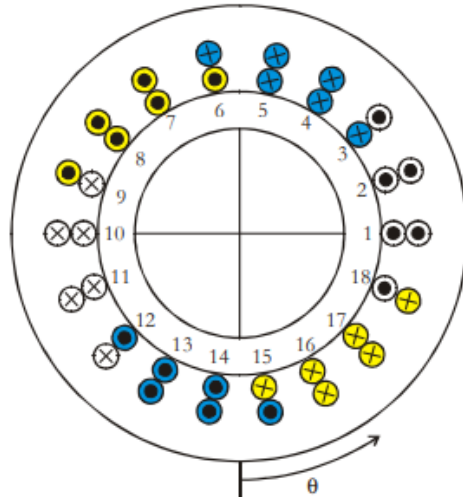
Levypaketti, tai toiselta nimeltään generaattorin rautasydän, toimii magneettivuon kulkuväylänä sekä pitää staattorikäimityksen pakoillaan sen muodostamisessa urissa. Levypaketti rakentuu erittäin ohuista 0,355 mm - 0,483 mm paksuista teräslevyistä.

Rautasydän ei ole pelkästään jaettu ohuiksi yksittäisiksi koko kerroksen kattaviksi levyiksi, vaan myös jokainen kerros on jaettu segmentteihin. Jokaisen teräslevyn pinnalla on myös erittäin ohut eristekerros, jolla jokainen segmentin palanen erotetaan toisistaan. Erottamalla jokainen segmentti toisistaan saadaan levypaketissa syntyviä pyörrevirtoja vähennettyä. Tämä saa aikaan myös pyörrevirtojen aiheuttamien virtalämpöhäviöiden vähenemisen. (Mts. 55-57.)



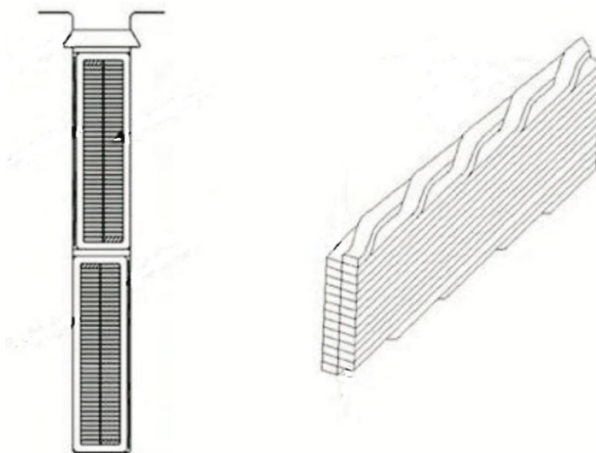
Kuvio 4 Segmenteistä kasattu staattorin levypaketti. (Hai ym. 2014, 96, muokattu)

Staattorikäänitys on käänisauvoista rakennettu, kolmeen vaiheeseen jaettu kupari-käänitys, johon generaattorin lähdejännite indusoituu. Vaiheet koostuvat yhdestä tai useammasta käänmihaarasta, jotka ovat kytkettyinä toisiinsa rinnan, sarjassa tai näiden kahden kytkentätavan yhdistelmänä. Yhtä vaihetta kohti staattorissa on useita sauvapareja, jotka ovat sijoitettu niin, että vaiheiden välille syntyy 120 sähköasteen vaihesiirto, indusoituneiden jännitteiden huippuarvoissa. Käänisauvat sijoitetaan levypaketin uriin siten, että jokaisessa levypaketin urassa on kaksi päällekkäistä sauvaa, jotka ladotaan uriin limittäin ja kytketään vaihekohtaisesti toisiinsa esimerkikuvion 5 mukaisesti. (Kerszenbaum & Klempner 2018, 86.)



Kuvio 5 Esimerkki 18 uraisen ja 2 napaisen koneen staattorikäimityksestä. (Joksimovic 2011, 11)

Käämisauva vaatii suuren poikkipinta-alan suurien staattorivirtojen takia. Etenkin suurissa generaattoreissa virrat voivat kasvaa jopa tuhansiin ampeereihin. Suuri poikkipinta-ala saavutetaan punomalla yksittäisiä, toisistaan eristettyjä mutta päistä yhteen kytkettyjä ohuita kuparisäikeitä yhteen. Rakenteen tarkoituksena on vähentää virranahdon vaikutusta käämisauvan vaihtovirtaresistanssiin sekä saada virta jakautumaan tasaisesti osajohtimien välille. Käämisauvaa, jonka osajohtimet ovat punottu tietyllä tavalla ristiin, kutsutaan Röbel-sauvaksi. (Kerszenbaum & Klempner 2018, 99-102.)



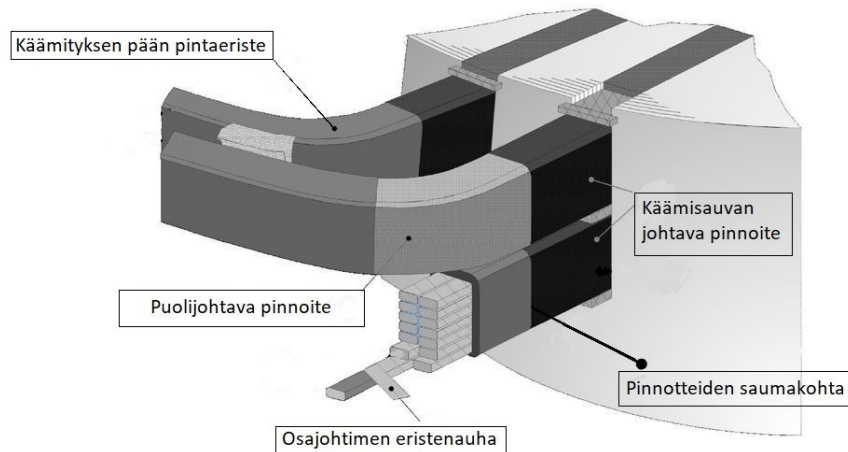
Kuvio 6 Röbel-punottu käämisauva. (Abbaszadeh & Alam 2011, 3, muokattu)

Pienemmissä sähkökoneissa staattorikäänitys voi olla tehty vyyhdeistä käämisauvojen sijasta. Vyyhteä voi ajatella kahtena yhteen liitettynä sauvana mutta erona on, että vyyhdessä voi olla useita tehollisia johdinkierroksia. Vyyhdeissä ei käytetä Röbel-rakennetta. (Koponen 2021.)

Käämisauvojen eristyksellä on tärkeä rooli koneen käyttöikää ajatellen. Käämin ulkopinnan ja maadoitetun levypaketin välille sekä eristeen sisälle syntyy aina pieniä onteloita, joissa voi riittävän suuren potentiaalieron syntyessä syttyä eristettä kuluttavia osittaispurkauksia. Purkausten esiintyminen on normaalia, mutta ne pyritään minimoimaan pitkän käyttöiän saavuttamiseksi. Käsittelemällä käämisauva johtavalla pinnoitteella pyritään käämisauvan pinta samaan yhteiseen maapotentiaaliin maadoitetun levypaketin kanssa. Tällä pyritään minimoimaan käämisauvan ja levypaketin välisiä ura-alueen osittaispurkauksia. (Hietalahti ym. 2020, 68.)

Levypaketin ulkopuolella kapasitiivisen jännitteenjaon ansiosta yksittäisen sauvan eristeen pintapotentiaali on lähes sama, kuin johtimen potentiaali eristeen sisällä. Levypaketti ja käämisauvan johtava pinnoite ovat taas maapotentiaalissa. Lisäämällä pintamateriaalien muutoskohtaan puolijohtavaa purkaussuojanauhaa, toiselta nimeltään stress grading, saadaan potentiaalieron muutos tasattua pidemmälle matkalle. Mikäli materiaalien muutoskohdan potentiaaliero kasvaa liian suureksi, voi tuloksena olla kipinöintiä. (Mts. 68.)





Kuvio 7 Staattorikäämien eristysjärjestelmä. (Lloyd 1990, 26, muokattu)

Staattorikäämiin kohdistuu normaalin käytön aikana jatkuvasti muuttuvan magneettikentän aiheuttamia työntäviä ja vetäviä voimia. Voimat voivat saada aikaan käämisauvan värähtelyä, joka tiukassa levypaketin urassa aiheuttaa eristeen pinnoitteen kulumista. Tämän värähtelyn estämiseksi käämisauvat tulee kiilata tiukasti levypaketin uriin erikoisvalmisteisilla kiiloilla. Kiilat voivat olla kiinteitä yksiosaisia tai useammasta erillisestä profiilista rakennettuja kiilajärjestelmiä. (Kerszenbaum & Klempner 2018, 110.)

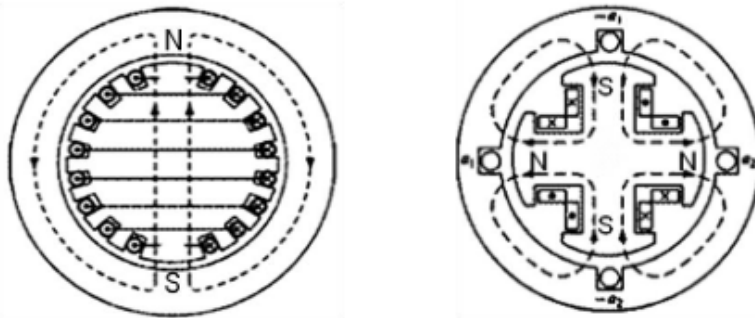
### 3.2.2 Roottori

Tahtigeneraattorin roottorit voidaan jakaa rakenteen perusteella umpi- ja avonapaisiin. Umpinapaisia roottoreita käytetään pääsääntöisesti nopeakäyntisissä turbogeneraattoreissa, kun taas avonapaisia roottoreita hidaskäyntisissä koneissa, kuten vesivoimaloissa. Vesivoimalaitosten halkaisijaltaan suuremmat avonapaiset roottorit pyörivät yleisesti 75 - 500 kierrosta minuutissa, kun taas umpinapaiset yleisesti höyry- ja kaasuturbiinilaitoksissa käytetyt roottorit pyörivät 1500 tai 3000 kierrosta minuutissa. (Aura & Tonteri 1996, 214-215.)

Roottorien rungot valmistetaan pääsääntöisesti yhdestä suuresta metallitakeesta. Materiaalin magneettisen permeabiliteetin on oltava korkea kuljettaakseen roottorikämmityksen tuottamaa magneettivuota tehokkaasti. Magneettisten ominaisuuksien

lisäksi materiaalin tulee olla myös mekaanisesti erittäin kestävä. Ajon aikana roottoriin kohdistuu korkeita rasituksia sekä suuria vääntöjännityksiä. (Kerszenbaum & Klempner 2018, 118.)

Umpinapainen roottori on muodoltaan sylinterimäinen. Roottorin käämitys on upotettu roottorin runkorakenteeseen koneistettuihin uriin. Avonapainen roottori taas muodostuu runkoon kiinnitetyistä navoista. Roottorin käämitys on käämitty napojen ympärille lattakuparista tai kuparilangasta. Kuviossa 8 on esitetty kuinka magneettivuon kulkeutuu avonapaisen- ja umpinapaisen roottorin avulla staattori- ja roottori-raudassa. Kuvassa vasemmalla on umpinapainen roottori ja oikealla avonapainen. (Hietalahti 2011, 87-88.)



Kuvio 8 Umpi- ja avonapaisen roottorin magneettivuon kulkureitit. (Korpinen 2008, 1)

### 3.2.3 Magnetointi

Magnetointitavan mukaan tahtigeneraattorit voidaan jakaa kahteen ryhmään, harjallisiin ja harjattomiin. Harjaton magnetointijärjestelmä on rakenteeltaan melko yksinkertainen ja siksi suurin osa nykyaikaisista tahtigeneraattoreista on toteutettu harjattomalla magnetoinnilla. Käytössä on myös lukuisia harjallisella magnetoinnilla varustettuja tahtigeneraattoreita. (Hietalahti. ym 2020, 38.)

Harjattomassa magnetoinnissa roottorin magnetointivirta tuotetaan samalle akselille kytketyllä magnetointikoneella. Magnetointikoneen roottori on kytketty pääkoneen

kanssa samalle akselille. Magnetointikoneen staattori on kiinteä osa konetta. Järjestelmään kuuluu myös usein kestopagneettigeneraattori, jonka avulla magnetointikoneen staattorikäämi magnetoidaan jännitteensäätäjän välityksellä. Magnetoidun staattorikäämin sisällä pyörivään kolmivaiheiseen roottorikäämitykseen indusoituu jännite, joka tasasuunnataan roottoriin integroidulla diodisillalla. Tasasuunnattu magnetointivirta syötetään pääkoneen roottorikäämitykseen magnetointitietä pitkin. (Mts. 38.)

Harjallisessa magnetoinnissa magnetointivirta johdetaan roottorikäämitykseen hiiliharjojen läpi. Hiiliharjat nojaavat roottorin liukurenkaisiin, jotka ovat yhteydessä roottorin napoihin. Nykyisin pyritään käyttämään harjatonta magnetointia, sillä hiiliharjat ja liukurenkaat vaativat säännöllistä huoltoa. Lisäksi hiiliharjoista irtoaa koneen sisälle haitallista hiilipölyä. Harjallista magnetointia käytetään etenkin nopeaa säätöä vaativissa koneissa. Tasasähkön lähteenä harjallisessa magnetoinnissa voi olla samalla akselilla oleva magnetointikone tai erillinen tasasähkölähde. (Mts. 41-42.)

### 3.3 Muuntaja

Muuntajan tehtävä osana sähköntuotantoa on muuttaa järjestelmän jännitetasoa tilanteeseen sopivaksi sekä rajoittaa oikosulkuvirtoja. Voimalaitoksissa tuotettua sähköenergiaa joudutaan siirtämään pitkiä matkoja tuotantolaitoksilta aina loppukäyttäjälle asti. Siirtoyhteydet voimalaitoksen ja kuluttajan välissä ovat resistiivisiä eli häviöllisiä johdinyhteyksiä. Tämä tarkoittaa sitä, että osa sähkötehosta jää matkalle häviöiden muodossa. Kolmivaiheisen siirtojärjestelmän johdinhäviöt on laskettavissa yhtälöstä 4. (Hietalahti 2011, 4-5.)

$$P_h = 3 R I^2 \quad (4)$$

missä

R on johtimen resistanssi

I on johtimessa kulkeva virta

Nostamalla järjestelmän jännitettä valtakunnan verkossa 220 kV tai 400 kV muuntajilla, saadaan sama sähköenergia siirrettyä pienemmällä virralla, joka vähentää johtimissa tapahtuvia lämpövirtahäviöitä. Pientämällä johdinhäviöitä saadaan sähkönsiirtojärjestelmästä kustannustehokkaampi. Myöhemmin jännite tulee alennusmuuntajien avulla laskea loppukäyttäjille sopivaan jännitetasoon. (Mts. 4-5.)

## **4 Osittaispurkaukset pyörivissä sähkökoneissa**

### **4.1 Osittaispurkaus ilmiönä**

Osittaispurkaus on paikallinen sähköenergian purkaus, joka vain osittain sulkee elektrodivälin. Purkaukset syttyvät, kun väliaineen paikallinen läpilyöntilujuus ylittyy. Osittaispurkauksiksi sähkökoneissa kutsutaan purkauksia, jotka esiintyvät johtimien eristeessä tai eristeen pinnalla. Paljaan johtimen ympärillä tapahtuvia purkauksia taas kutsutaan korona-purkauksiksi. Syttyneet osittaispurkaukset aiheuttavan lähiympäristöön ääntä, valoa, lämpöä ja kemiallisia saasteita kuten otsonia. (IEC 60270:2000, 15.)

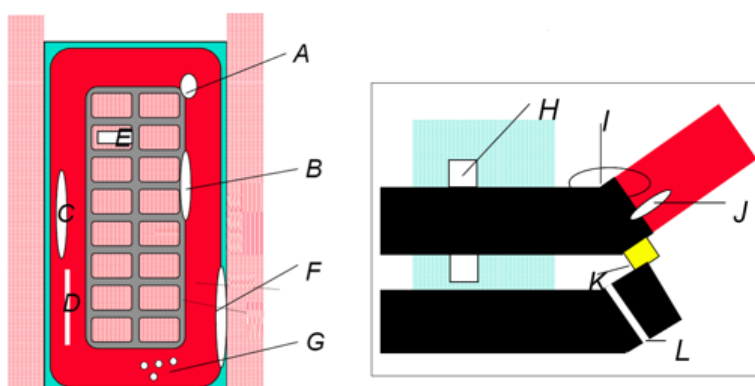
Kaikissa suurjännitteisissä sähkögeneraattoreissa esiintyy osittaispurkauksia jossakin määrin. Purkaukset ovat normaali ilmiö ja eristemateriaalina käytetään epäorgaanisia materiaaleja, jotka kestävät purkauksia huomattavasti paremmin, kuin orgaaniset materiaalit. Eristemateriaalin kestävydestä huolimatta yleisin syy osittaispurkaustason nousulle sähkögeneraattorissa on itse eristeen kuluminen. Yleisimpiä syitä eristeen epähomogeenisuudelle ovat valmistusvirheet sekä käytön aikana tapahtuva normaali kuluminen. Riippuen purkausten luonteesta ja sijainnista myös purkaukset itse kuluttavat koneen eristystä. (IEC 60034-27:2005, 8.)

Ensimmäinen askel purkausten syttymiselle sähkökoneissa on onteloiden syntyminen koneen eristeeseen tai eristeen pinnalle. Onteloitumiseen ja niissä syttyviin osittaispurkauksiin vaikuttaa keskeisesti koneen malli, käytetyt valmistusmateriaalit, valmistustapa sekä kuinka konetta on käytetty ja huollettu. (IEEE 1434:2000, 7.)

Käämieristeen sisäinen onteloituminen ja kerroshalkeilu eli delaminoituminen on seurausta epätasaisesta ajotavasta sekä lämpötilan aiheuttamasta vanhenemisesta. Syntyneissä onteloissa myös itse purkaukset kasvattavat onteloita eroosion avulla. Onteloita voi syntyä myös eristeen ja johtimen rajapintaan, kuten myös eristeen ja johtavan pinnoitteen rajapintaan. Myös murtumat ja hiertymät käämieristeessä ovat potentiaalisia purkauskohtia. (Mts. 7.)

Urapurkauksia tapahtuu pääsääntöisesti käämisauvan johtavan pinnoitteen kuluessa. Urassa värähtelevä sauva saa aikaan johtavan pinnan kulumista hangatessaan levypaketin uran seinämiin. Hankauksen takia pinnoite muuttuu epähomogeeniseksi, joka heikentää pinnoitteen johtavuutta. Pintapurkauksiin vaikuttaa myös pinnoitteen huokoisuus, irtonaisuus sekä eroosio. Urapurkaukset voivat myös syttyä tai sammua tietyn tyyppisten olosuhteiden kuten lämpötilan muutoksen johdosta. (Mts. 7.)

Osittaispurkauksia voi esiintyä myös ura-alueen ulkopuolella. Käämityksen päätyalue sekä uran suualue ovat yleisiä purkauskohtia staattorikämmityksessä. Alueella tapahtuvat purkaukset ovat usein seurausta likaantumisesta vieraista esineistä tai mekaanisista vaurioista. Uran suualueella tapahtuvat purkaukset johtuvat usein käämisauvan johtavan pinnoitteen ja uran siirtymäkohdan puolijohtavan pinnoitteen kulumisesta. Kuviossa 9 on esiteltyä yleisimpiä purkauskohtia staattorikämmityksessä. (Mts. 8.)



Kuvio 9 Tyypillisiä purkauskohtia staattorikämmityksessä. (Krüger 2014, 4)

Kuvion 9 kohta F on tyypillinen sijainti urapurkauksille, jotka syntyvät käämisauvan johtavan pinnoitteen kuluessa. Kohdat B ja C kuvastavat tyypillisiä esiintymiskohtia delaminoitumisen aiheuttamille osittaispurkauksille. Kohdat I., J., K ja L kuvastavat ura-alueen ulkopuolella tapahtuvien osittaispurkausten tyypillisiä esiintymiskohtia. (Hietalahti ym. 2020, 70.)

#### 4.1.1 Osittaispurkauksen syttyminen

Tarkastellaan tarkemmin itse purkausten syttymistä. Sopivan ontelon synnyttyä eristeeseen tai sen pinnalle syntyy ilmaväliin potentiaaliero. Syntyneen potentiaalieron voimakkuus riippuu useasta päätekijästä, jotka ovat johtimessa vaikuttava jännite, eristeen ja ontelon kaasun materiaaliominaisuudet sekä eristerakenteen ja ontelon geometria. Osittaispurkaus voi syttyä vain jos jännitteen voimakkuus ylittää ontelossa olevan kaasun läpilyöntilujuuden V/mm. Pelkkä läpilyöntilujuuden ylitys ei kuitenkaan riitä pelkästään purkauksen syttymiseen. Syttyäkseen ilmiö vaatii vapaan elektronin onteloon, joka aiheuttaa useiden elektronien vyöryn. Elektronien vyöry saa aikaan muutaman nanosekunnin nousuajan omaavan virtapulssin. (Iris Power Engineering 2001, 17-18.)

Eristeen onteloon syntyvää jänniterasitusta voidaan teoriassa arvioida kun tiedetään eristemateriaali ja sen paksuus, käämiin vaikuttava jännite, ontelon paksuus sekä ontelon pinta-ala. Keskeisessä osassa laskentaa on kapasitanssin määrittäminen eristeelle sekä ontelossa vaikuttavalle kaasulle. Kapasitanssi voidaan laskea yhtälöstä 5. (Mts. 18-19.)

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (5)$$

missä  $\epsilon$  on väliaineen permittiivisyys  
 $A$  on ontelon pinta-ala  
 $d$  on väliaineen halkaisija

Kun eristeen sekä ontelon kapasitanssit on selvitetty, voidaan ontelossa vaikuttava jännite laskea yhtälöstä 6.

$$U_{ontelo} = \frac{C_{eriste}}{C_{eriste} + C_{ontelo}} U \quad (6)$$

missä  $C_{eriste}$  on eristemateriaalin laskettu kapasitanssi  
 $C_{ontelo}$  on ontelon laskettu kapasitanssi  
 $U$  on käämiin vaikuttava vaihejännite

Purkausten syttymiseen onteloissa vaikuttaa myös ontelon muoto. Lisäksi koneen sisältämä kaasu ja sen paine sekä ontelon pintarakenne vaikuttavat purkausten syttymiseen. (Mts. 18-19.)

Todellisuudessa tilanne on monimutkaisempi. Purkaukset Synnyttävät onteloon varuskertymiä eli avaruusvarauksia, jotka vaikuttavat ontelon sisäiseen sähkökenttään. Tämän vuoksi purkauksia voi esiintyä myös silloin, kuin jännite on nollakohdassaan. (Stone 2015.)

Syttyneestä osittaispurkauksesta johtuvan virtapulssin nousuaika on erittäin lyhyt, olen vain 1-5 nanosekuntia. Taajuudeksi muutettuna 1-5 ns tarkoittaa 50 - 250 MHz taajuutta. Purkauksen sytyttävä riittävän suuri potentiaaliero eristeen ontelossa syntyy jännitteen positiivisella sekä negatiivisella puolijaksolla, aiheuttaen näin useita mitattavia pulsseja jokaista jaksoa kohden. Pulssin muotoon vaikuttaa pääsääntöisesti koneen ja käämityksen geometria sekä purkauksen syttymiskohta käämityksessä. Lisäksi pulssin muotoon voi vaikuttaa käämityksen eristemateriaali ja sen kunto. (Iris Power Engineering 2011, 23.)

#### 4.1.2 Pulssin kytkeytyminen

Osittaispurkausten mittausta ajatellen on tärkeää tuntea kuinka purkausten aiheuttamat pulssit kulkeutuvat pyörivän sähkökoneen sisällä ja mitä vaikutuksia sillä on mitattuun signaaliin. Suurtaajuinen signaali kytkeytyy pääsääntöisesti kolmella eri tapaa sähkökoneen käämityksestä.

#### **Kulkeutuminen käämityksessä**

Kuparista staattorikäimitystä pitkin signaali kulkeutuu aivan kuten mikä tahansa muukin signaali kuparisessa johtimessa. Ongelmaksi kuparikäimityksessä muodostuu käämityksen induktanssi ja osittaispurkaussignaalin suuri taajuus. Otetaan esimerkiksi osittaispurkaus, jonka pulssin nousuaika on 4 ns. Tästä kokonaisen jakson ajaksi saadaan 16 ns. Pulssin taajuus taas saadaan yhtälöstä 7. (Iris Power Engineering 2001, 23-24.)

$$f = \frac{1}{T} \quad (7)$$

missä  $T$  on jakson aika

Yhtälöstä saadaan osittaispurkaussignaalin taajuudeksi 62,5 MHz. Oletetaan induktanssin olevan vakio ja lasketaan impedanssi 50 Hz verkkotaajuudella sekä osittaispurkaussignaalin 62,5 MHz taajuudella. Tarkastelemalla yhtälöä 8 voidaan havaita taajuuden vaikuttavan merkittävästi impedanssiin  $X_L$ . Osittaispurkaussignaalin kohtaama impedanssi on 1 250 000 kertainen verrattuna 50 Hz signaalin kohtaamaan impedanssiin. (Mts. 23-24.)

$$X_L = 2 \pi f L \quad (8)$$

missä  $f$  on osittaispurkaussignaalin taajuus  
 $L$  on käämityksen induktanssi

Tämän seurauksena osittaispurkauksista aiheutuneet korkeataajuiset pulssit vääristyvät tunnistamattomaksi käämityksessä edetessään, joka aiheuttaa epävarmuutta mittauksessa. Tästä syystä signaali tulee mitata mahdollisimman lähellä staattorikäimityksen alkupäätä, missä jänniterasitus on suurimmillaan. Suurimman jänniterasituksen alueella myös purkauksia syttyy eniten. (Mts. 23-24.)

### **Kapasitiivinen kytkeytyminen**



Kapasitiivisesti kytkeytymällä signaali kulkeutuu nimensä mukaisesti käämityksen kapasitanssin kautta. Toisin kuin käämitystä pitkin kulkeutuessa, tässä tapauksessa pulssi kulkeutuu ikään kuin kondensaattorin läpi. Kapasitanssia generaattorissa on esimerkiksi käämityksen ja levypaketin välissä jossa eriste toimii kondensaattorin väliaineena. (Mts. 24.)

Vertaillaan kahta aiemmin käytettyä signaalia 50 Hz ja 62,5 MHz ja tarkastellaan taajuuden vaikutusta signaalin kohtaamaan impedanssiin. Tuloksena huomataan signaalin kohtaaman impedanssin olevan käänteisesti 1 250 000 kertaa pienempi suurtaajuisella osittaispurkaussignaaliilla. (Mts. 24.)

$$X_C = \frac{1}{2 \pi f C} \quad (9)$$

missä

f on signaalin taajuus

C on kytkeytymiskohdan kapasitanssi

Edeltävän perusteella signaali kulkeutuu kapasitiivisesti kytkeytymällä lähes muuttomattomana ja ollen näin ideaalinen tapa signaalin mittaukselle. Sitä kuinka paljon signaali on vaimentunut ja vääristynyt varsinaisen purkauspaikan ja mittausanturin välillä ei tiedetä. (Mts. 24.)

## Säteily

Osittaispurkauksen aiheuttama pulssi saa aikaan ympäristöön säteilevän sähkömagneettisen pulssin, jonka taajuus voi vaihdella HF-taajuuksilta aina UHF-taajuuksille asti. Signaalin etenemiseen säteilemällä vaikuttaa olennaisesti ympäröivien metalliosien materiaali sekä muoto. Metallirakenteet voivat ohjata signaalin aaltoja tiettyyn suuntaan. Generaattorin rakenne voi myös aiheuttaa signaalille hajoamista, vaimentumaa, heijastumaa, tai diffraktiota. Tästä syystä on tärkeää mitata signaali mahdollisimman lähellä sen alkuperäistä lähdettä. Keskeisimpiä tekijöitä säteilemällä kytkeytävän signaalin mittaukseen ja sen tarkkuuteen ovat: (IEC TS 62478:2016, 10.)

- Ympäröivien rakenteiden ominaisuudet ja mittasuhteet.
- Impedanssi sekä ympäröivän dielektrisen väliaineen ominaisuudet.
- Etäisyys signaalin lähteen ja mittausanturin välillä.

## 4.2 Osittaispurkausten mittaus

Osittaispurkausten mittaus on tärkeä osa laadukasta kunnonvalvontasuunnitelmaa. Vaikka nykyisin suurjännitegeneraattorit eristetään epäorgaanisella kiille-eristeellä, joka ei vaurioidu osittaispurkauksista samalla tavalla kuten orgaaninen eristemateriaali, aiheuttavat osittaispurkaukset silti kulumaa koneen eristyksessä. Eristeen kulumista aiheutuu myös kemiallisesta, mekaanisesta sekä lämpörasituksesta. Luonteeltaan vauriot eristyksessä kehittyvät hitaasti minkä takia jatkuvatoiminen kunnonvalvonta on erittäin tärkeää. (Iris Power Engineering 2001, 17.)

Purkauksen voimakkuuden yksikkönä käytetään näennäisvarausta, jonka suuretunnuksena toimii  $q$  ja yksikkönä Coulombi  $C$ . Näennäisvarauksella tarkoitetaan sähkövarausta, joka erittäin lyhyessä ajassa tuotuna mittauspiiriin aiheuttaa mittalaitteeseen vastaavan lukeman, kuin itse purkauksen virtapulssi. Näennäisvarauksen voimakkuus ei kuitenkaan täysin vastaa osittaispurkauksen syttymiskohdassa purkautuvaa varausta, jonka absoluuttista arvoa ei voida mitata. Yleisesti näennäisvarauksen voimakkuus ilmoitetaan pikocoulombeina  $pC$ . (IEC 60270:2000, 17.)

### 4.2.1 Online- ja Offline-mittaus

Osittaispurkausten mittaustavat voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan. Näitä ovat käyvän ja seisovan koneen mittaukset. Jatkossa työssä käytetään käyvän koneen mittauksista termiä online ja seisovan koneen mittauksista termiä offline. Molemmissa mittaustavoissa on omat hyvät ja huonot puolensa ja siksi oikea mittaustapa tulee aina valita tapauskohtaisesti.

#### **Online-mittaus**

Online-mittauksilla voidaan valvoa generaattorin kuntoa jatkuvasti ilman tuotantokatkoksia. Jatkuvalla tai jaksollisella datankeruulla voidaan suorittaa trendiseurantaa, jonka avulla voidaan ennakoida ja seurata kehittyviä vikatilanteita. Laadukkaan trendiseurannan avulla voidaan myös selvittää osittaispurkausten lämpötila- ja kuormitusriippuvuutta ajotilanteessa. (IEEE 1434:2000, 30.)

Vaikka trendiseurannasta saatava data antaa käyttäjälle arvokasta tietoa koneen vanhenemisesta ja käyttökunnosta, ei mittauksista saadun datan perusteella voida kuitenkaan tehdä lopullisia johtopäätöksiä koneen kunnosta. Mittaustulokset ovat suuntaa-antavia ja tarkempaa analyysiä varten on syytä suorittaa laajempia tarkastuksia. (Mts. 30.)

Yksi tärkeimmistä muuttujista online-mittauksissa on koneen ajotilanne mittaushetkellä. Mittaustulosten analysointiin oleellisesti vaikuttavia tekijöitä ovat koneen pätö- ja loisteho sekä pääjännite ja virta. Käämityksen lämpötila ja vetyjäähdytteisten koneiden jäähdytyskaasun paine vaikuttavat myös mittaustuloksiin. Näiden muuttujien lisäksi myös magnetointijännite, -virta ja jäähdytysilman kosteus ovat huomioitavia muuttujia tulosten analysoinnissa. (Mts. 33-34.)

Mittaustulosten analysoinnissa kerättyä mittaustulodataa verrataan pääsääntöisesti edellisiin mittauksiin. Mikäli koneen ajotiedot vastaavat edellisten mittausten tilannetta, voidaan mittauksia verrata toisiinsa. Iris Power Engineering on antanut seuraaville parametreille rajat joiden sisällä arvojen tulisi olla mittaustulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi. (Iris Power Engineering 2001, 53.)

- Jännite                    +/- 200 V
- Lämpötila                +/- 5 °C
- Pätöteho                +/- 10 %
- Loisteho                 +/- 10 %
- Vedyn paine             +/- 5 psi

Kuparikäämityksessä voi ajon aikana tapahtua lämpölaajenemista, joka vuorostaan sulkee osittain eristeen onteloita ja täten vähentää osittaispurkausaktiivisuutta. Näin

ei kuitenkaan aina tapahdu ja siksi on suositeltavaa suorittaa mittauksia eri lämpötiloissa. Lämpötilariippuvuuden selvittämiseksi tulee mittausten välillä pyrkiä vähintään 20°C lämpötilaeroon. (Mts. 50.)

Kuten lämpötilariippuvuuden kohdalla, on tärkeää selvittää myös osittaispurkausten kuormitusriippuvuus. Koneen kuormituksen mukana vaihtelee staattorikäännytykseen vaikuttava mekaaninen rasitus, joka voi aiheuttaa käännytyksen värinää levypaketin urassa. Levypaketin urassa värisevän käännytyksen pinta kuluu edistään näin osittaispurkausten syttymistä. Kuormitusriippuvuuden selvittämiseksi on pyrittävä vähintään 40 % kuorman muutokseen mittausten välillä. (Mts. 50.)

Online-mittausten heikkoutena on alttius häiriöille ja signaalin vääristymiselle. Häiriöitä esiintyy voimalaitosympäristössä runsaasti. Häiriöiden lähteinä voivat olla muut laitoksen sähkökoneet, radiosignaalit ja tasasuuntaajien aiheuttamat häiriöt. Mikäli testituloksesta halutaan laadukas ja vertailukelpoinen, tulee häiriöt erotella varsinaisista mittaustuloksista. (IEEE 1434:2000, 30.)

Yhtenä esimerkkinä häiriöiden poistamiseen voidaan pitää Iris Power Engineering yhtiön valmistamaan mittausjärjestelmään. Järjestelmään kuuluu kaksi mittauskondensaattoria jokaista vaihetta kohden sekä mittausterminaali tietojen keräämistä varten. kapasitiiviset mittauskondensaattorit asennetaan generaattorin kiskostoon vähintään kahden metrin päähän toisistaan samassa vaiheessa. Mittausjärjestelmä erottelee kondensaattoreiden mitaamat signaalit aikaperusteisesti ja kategorisoi ne saapumisaikojen perusteella, joko tullee järjestelmästä häiriöinä tai aitoina osittaispurkaussignaaleina. (Iris Power Engineering 2001, 33-34.)

### **Offline-mittaus**

Offline-mittauksilla voidaan selvittää koneen staattorieristyksen kunto online-mittauksia tarkemmin. Mittaustapa on kuitenkin huomattavasti hitaampi sekä kalliimpi. Tämä johtuu pitkälti siitä, että generaattori joudutaan ajamaan alas tuotannosta. Mittausten suorittamiseksi generaattori tulee myös erottaa yleisestä verkosta. Lisäksi

mittauksiin tarvitaan ulkoista jännitelähdettä sekä erillistä siirrettävää mittauskalustoa. (IEEE 1434:2000, 31.)

Ulkoisen jännitelähde tarvitaan verkosta erotetun staattorikämmityksen sähköistämiseen. Mittauksessa jännitettä nostetaan asteittain yleensä 0,2 kV portaissa aina nimellijännitteeseen asti. Mittausjännitettä voidaan myös nostaa portaattomasti noin 1 kV/s vauhdilla aina nimellijännitteeseen asti. Vaihtelevalla mittausjännitteellä pyritään selvittämään kämmityksessä tapahtuvien osittaispurkauksen syttymisjännite PDIV ja sammumisjännite PDEV. (IEC 60034-27:2005, 22-23.)

Online- ja offline-mittausten tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään. Offline-mittauksissa voidaan jokainen vaihe mitata erillään muista vaiheista. Lisäksi offline-mittauksissa jänniterasitus jakautuu tasaisesti koko kämmityksen matkalle toisin kuin ajon aikana, jolloin tähtipisteessä jänniterasitusta ei ole. Kasvanut jänniterasitus lähellä tähtipistettä voi saada aikaan purkauksia, jotka eivät ole online-mittauksissa havaittavissa. Lämpötila on myös yleisesti matalampi seisovan koneen mittauksissa, eikä kämmitykseen vaikuta ajon aika muuttuvia sähkömagneettisia voimia. (IEEE 1434:2000, 31.)

Seisovan koneen offline-mittausten suurimpina hyötyinä on häiriöttömyys verrattuna online-mittauksiin. Koneen kämmitys on erotettuna paikallisesta sähköverkosta ja tästä johtuen paikallisen verkon häiriöt eivät vaikuta mittaukseen. Pieniä, helposti eroteltavia häiriöitä on kuitenkin havaittu tulevan syöttölaitteiston kautta, joka on kytkettyä laitoksen verkkoon. Häiriöttömyyden lisäksi offline-mittauksissa voidaan selvittää vaiheiden välistä purkausaktiivisuutta. Offline-mittaukset antavat myös mahdollisuuden aistinvaraiselle havainnoimiselle. Joissakin tapauksissa osittaispurkaus voi aiheuttaa näkyvän kipinän ja äänen kuten kuviossa 10. (Mts. 31.)



Kuvio 10 Näkyvä kipinä levypaketin ja jännitteisen käämin välillä offline-mittauksissa

Mittausjärjestelmän mittaustaajuus määrittää pitkälti sen, kuinka suuri osa osittaispurkaussignaalien energiasta havaitaan. Matalammalla taajuuskaistalla havaitaan tarkemmin koko käämityksen matkalla tapahtuvia purkauksia. Matalampi taajuuskaista on myös herkempi mittauskohteessa esiintyville häiriöille. Korkeammalla taajuuskaistalla käänteisesti häiriöiden määrä on vähäisempää, kuten myös havaittujen signaalien. Korkea taajuuskaista havaitsee erittäin tarkasti lähellä mittauspistettä tapahtuvat osittaispurkaukset mutta hävittää kauempaa tulevat signaalit. Koko käämitystä mitatessa on suositeltavaa asettaa taajuuskaistan ylärajaksi offline-mittauksissa 1 MHz. Kaistan alaraja asetetaan kymmenien kilohertsien alueelle. (IEC 60034-27:2005, 10.)

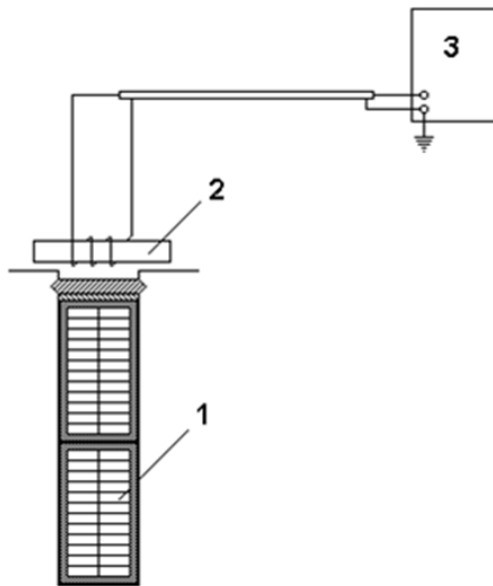
Offline-mittauksissa voidaan myös mitata purkausaktiivisuutta yksittäisistä käämiurista siihen suunnitellulla mittausanturilla. Tätä mittausta kutsutaan urakoh-taiseksi osittaispurkausmittaukseksi.

## 5 Urakohtainen osittaispurkausmittaus

### 5.1 Mittausmenetelmän esittely

Urakohtaisen osittaispurkausmittauksen avulla voidaan paikallistaa tarkemmin generaattorin staattorin ura-alueella tapahtuvia osittaispurkauksia. Mittausmenetelmä juontaa juurensa 1940-luvulle, jolloin Westinghouse Electric Company kehitti ensimmäisen version mittausanturista. Myöhemmin 1960-luvulla Tennessee Valley Authority -yhtiön nimissä toiminut insinööri L.E. Smith kehitti kokonaisen mittausjärjestelmän, joka oli tarkoitettu urakohtaiseen osittaispurkausmittaukseen. Järjestelmä koostui 5 MHz taajuudelle viritetystä radiotaajuusanturista sekä pulssin huippuarvomittarista. Mittausjärjestelmä on toimintaperiaatteeltaan säilynyt alkuperäisenä tähän päivään asti ja sitä valmistaa nykyisin Iris Power Engineering tuotenimellä PPM 97. (Covenor ym. 2014, 4.)

Mittaus perustuu ulkoisella jännitelähteellä sähköistetyin staattorikäämityksen ura-alueen purkausten havaitsemiseen ferriittiantennilla. Sähköistetyssä käämisauvassa tapahtuva osittaispurkaussignaali kulkeutuu säteilemällä ulos urasta ja indusoi jännitteen uran päälle asetetun mittausanturin suurtaajuuskelaan Faradayn lain mukaan. Mitä lähemmäksi käämiä anturi asetetaan, sitä voimakkaampi signaali havaitaan. Anturin ferriittisydän asetetaan kuvion 11 mukaisesti uran päälle niin, että sydän yletää levypaketin hampaasta toiseen. (Mts. 5.)



Kuvio 11 Urakohtaisen osittaispurkausmittauksen periaatekuva (Covenor ym. 2014, 6)

Mittauksessa käytettävä anturi on toimintaperiaatteeltaan tarkoitettu radiohäiriöiden ja radiotaajuuksien havaitsemiseen. Vaikka mittalaitteisto kalibroidaan standardin mukaisesti, eivät mittauksesta saadut tulokset vastaa standardin näennäispurkauksen  $q$  määritelmää. Vaikka mittauks tulokset eivät vastaa standardin määritelmää, toimii mittauksesta kerätty tieto kuitenkin luotettavana osoituksena purkauksen tarkemmasta sijainnista käämityksen ura-alueella. (IEC 60270:2000, 35.)

Urakohtainen osittaispurkausmittaus vaatii roottorin ulosvetämistä generaattorin sisältä. Joissakin suurissa vesikoneissa on mahdollista suorittaa mittaus roottori koneen sisällä, mikäli roottorin napojen välillä on riittävästi tilaa. Mittauksen aikana roottoria on kuitenkin pyöritettävä, jotta saadaan mittauks tulokset kaikista staattorin urista. Koska mittauksesta saadut tulokset eivät vastaa standardin näennäisvarauksen määritelmää, on suositeltavaa suorittaa muita kunnonvalvonta- sekä osittaispurkausmittauksia urakohtaisen mittauksen lisäksi, kokonaisvaltaisen ja luotettavan kuntoarvion luomiseksi. Mittauskalustoa ei ole suunniteltu ura-alueen ulkopuolisten osittaispurkauksen mittaukseen. (Convenor ym. 2014, 4.)



### 5.1.1 Mittauslaitteisto ja vaatimukset

Markkinoilla on valmistajia, jotka valmistavat urakohtaiseen osittaispurkausmittaukseen suunniteltuja laitteistoja. Tässä työssä tullaan kuitenkin perehtymään tarkemmin työn toimeksiantajana toimivan yrityksen käytössä olevaan mittausjärjestelmään, joka pitää sisällään Itävaltalaisen Omicronin valmistaman MPD-600 osittaispurkausmittausjärjestelmän sekä itse valmistetun mittausanturin.

Mittausanturissa on kaksi pääkomponenttia, jotka ovat ferriittisydän ja kuparilangasta käämitty suurtaajuuskela. Kokonaisuuteen kuuluu myös eristävä ja säädettävä sauva, jonka avulla anturia saadaan liikuteltua generaattorin levypaketin sisällä turvallisesti.

Omicron MPD-600 osittaispurkausmittausjärjestelmä on kokonaisvaltainen mittausjärjestelmä osittaispurkausten mittaukseen. Mittausjärjestelmään kuuluu pulssin kytkentäyksikkö, tietokoneeseen liitettävä mittausyksikkö, tiedonsiirtojärjestelmä sekä akku. Tiedonsiirto pulssin kytkentäyksiköltä mittalaitteelle on toteutettu valokuitukaapeleilla häiriöiden minimoimiseksi. (Omicron 2010, 14-15.)

Mittausjärjestelmän normalisointia varten kokonaisuuteen kuuluu myös kalibraattori. Mittausjärjestelmä kykenee vastaanottamaan signaaleja 0 Hz taajuuksilta aina 32 MHz taajuuksille asti. Järjestelmä noudattaa kokonaisuudessaan standardin IEC 60270 asettamia vaatimuksia osittaispurkausmittausjärjestelmälle. (Mts. 14-15.)

Ferriittiantennin ja mittausjärjestelmän lisäksi mittausta varten tarvitaan ulkoinen syöttölaitteisto testijännitteen syöttämiseksi käämitykseen, suurjännitekaapeli, suurjännitemittari sekä tietokone mittausohjelman käyttämiseen. Turvallisuuteen liittyvää välineistöä, kuten alueen eristämiseen ja alueella liikkuvien varoittamiseen tarvittavaa välineistöä, on oltava myös mukana mittaushetkellä. (Fortum 2019, 3)

Standardissa IEC 60270 urakohtaisesta osittaispurkausmittauksesta käytetään nimitystä radiohäiriömittaus. Mitattava suure on radiohäiriöjännite, jonka tunnus on  $U_{RDV}$  ja yksikkönä käytetään mikrovolttia  $\mu V$ . Mittausjärjestelmän tulee toimia jännitteen

näennäishuippuarvomittarina sekä kyetä havaitsemaan signaaleja standardissa IEC 60270 määritetyn taajuuskaista B:n alueella, joka ylettyy 0,15 MHz - 30 MHz asti. Mittaushetkellä keskitaajuuden tulee olla lukittuna yhteen ja samaan arvoon koko mittauksen ajaksi. Mittaustaajuuden kaistanleveys on 9 kHz. (IEC 60270:2000, 83.)

Lyhytkestoisten ja säännöllisesti tapahtuvien purkausten aiheuttamien virtapulssien signaalista, joilla on tietty varaus  $q$ , voidaan johtaa radiohäiriöjännite yhtälöstä 10. (Mts. 83.)

$$U_{RDV} = \frac{q \Delta f Z_m f(N)}{k_j} \quad (10)$$

missä

$N$  on pulssin toistuvuuden taajuus

$f(N)$  on epälineaarisen muuttujan  $N$  funktio

$\Delta f$  on mittauksen kaistanleveys

$Z_m$  on puhtaasti resistiivinen mittalaitteen tuloimpedanssi

$k_j$  on mittalaitteen mittakerroin ( $q / U_{RDV}$ )

Näennäishuippuarvomittarin toiminta perustuu suurimpien toistuvien pulssien havaitsemiseen. Tarkoituksena ei ole havaita koko signaalien kirjoa. IEC 60270 standardin vaatimusten lisäksi mikrovolttien ohella on näennäishuippuarvomittarin tuloksia voitu kirjata myös pikocoulombeina tai milliampeereina. (IEEE 1434:2000, 27.)

Vaikka radiohäiriöjännitettä mitattaessa ei osittaispurkausten absoluuttista varausta voida mitata, tulee järjestelmä kuitenkin kalibroida ennen mittausta. Kalibroinnista käytetäänkin tästä johtuen nimitystä herkkyytarkastus. Tarkastuksessa mittauspiiriin syötetään oikeaa osittaispurkausta simuloivaa kalibrointipulssia. Tarkastus varmentaa koko mittausjärjestelmän toimivuuden. (IEC TS 62478:2016, 14.)

## 5.2 Mittaustapahtuma käytännössä

### 5.2.1 Mittauksen valmistelu

Kaukaisessa menneisyydessä mittausta suoritettaessa on tapahtunut useita kuolemaan johtaneita työtapaturmia suurjännitteestä saatujen sähköiskujen johdosta. Tämä seikka on saanut monet yritykset välttämään mittausta, joka on myös osaltaan hidastanut mittauksen kehitystä. International Generator Technical Community Forumin mukaan suurin osa tapaturmista on kuitenkin sattunut työntekijöiden piittämättömyydestä sähkötyöturvallisuusmääräyksiä kohtaan. (Covenor ym. 2014, 3.)

Mittaushetkellä laitteiston käyttöhenkilöstö on lähellä staattorin jännitteisiä osia, joka on mittauksen suurin vaaratekijä. Mittaajan mahdollinen kompastuminen tai kaatuminen jännitteisen käämityksen tai syöttölaitteiston päälle on hengenvaarallista. Jatkuvasti läsnä olevasta suuresta riskitasosta johtuen mittauksessa tulee noudattaa äärimmäistä varovaisuutta, eikä mittausta tule suorittaa yksin. (Mts. 10.)

Ennen mittauksen aloitusta on tärkeää tutustua staattorin käämintäkaavioon. Kaavioista tulee selvittää missä urissa kunkin vaiheen käämisauvat sijaitsevat sekä mille vaiheelle mitattavan uran päällimmäinen käämisauva kuuluu. Mikäli urissa ei ole näkyvää numerointia, on suositeltavaa tehdä merkinnät itse käämintäkaavioon mukaan. Mittauspöytäkirja on hyvä muokata vastaamaan käämintäkaaviota ennen mittauksen aloitusta. Mikäli käämityksen rakennetta ei kyetä selvittämään visuaalisesti tarkastamalla on suositeltavaa mitata jokainen ura kolme kertaa vaihtamalla suurjännitesyöttö mittauksen välillä vaiheesta toiseen. (Fortum 2019, 4-5.)

Testijännitteenä käytetään vähintään pääjännitteestä johdettua vaihejännitettä. Testijännite voidaan laskea yhtälöstä 11. (Mts. 9.)

$$U_{test} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

missä

$U_n$  on koneen kilpiarvotiedoista luettu nimellisjännite

Ennen testijännitteen kytkemistä koko mittausjärjestelmän toiminta tarkastetaan osittaispurkauskalibraattorilla. Kalibraattori kytketään mitattavan vaiheen ja maapotentiaalin väliin. Esimerkiksi 10 nC suuruista kalibrointipulssia syötetään mitattavaan vaiheeseen. Kalibrointipulssi mitataan esimerkiksi kolmesta eri urasta mahdollisimman keskeltä levypakettia. Laadukkaan tuloksen takaamiseksi on tärkeää valita urat, joissa mitattavan vaiheen käämisauva on uran päällimmäinen sauva. Urat tulisi valita myös niin, että yksi ura on lähellä käämityksen alkua, yksi käämityksen keskellä sekä yksi lähellä tähtipistettä. Järjestelmän toiminnan tarkastus suoritetaan vain ennen ensimmäistä mittausta. (Mts. 9-10.)

Purkausten jänniteriippuvuus voidaan myös tarkastaa ennen mittausten aloitusta nostamalla jännitettä 1 kV portaissa kohti aiemmin määriteltyä testijännitettä. Jokaiselta jänniteportaalta kirjataan sillä hetkellä havaittava radiohäiriöjännite. Kirjaamalla mitatut tulokset kuvaajaan jännitteen funktiona saadaan helposti selville osittaispurkausten syttymisjännite PDIV. Kun jänniteriippuvuuden mittaustulokset on kirjattu testijännitteelle saakka, voidaan jännite jättää saavutetulle tasolle ja aloittaa itse mittaus. (Mts. 10.)

Testijännitettä syötetään yksi vaihe kerrallaan muiden vaiheiden ollessa maadoitettuna. Osittaispurkausten annetaan tasaantua pitämällä jännitettä riittävän pitkään käämityksessä. Jännitteen kytkemisen jälkeen vähintään 5 uraa mitataan ja tulokset kirjataan ylös. 10 minuutin jälkeen samat urat mitataan uudelleen ja tuloksia verrataan ensimmäisiin tuloksiin. Mikäli tulokset poikkeavat toisistaan, tulee odottaa toiset 10 minuuttia. Purkausten annetaan tasaantua niin pitkään, kunnes peräkkäisten mittausten tulokset vastaavat toisiaan. (Covenor ym. 2014, 6-7.)

### 5.2.2 Mittaustapahtuma

Staattorin urien tutkiminen anturilla aloitetaan ensimmäisen mitattavan vaiheen ensimmäisestä urasta. Ensimmäinen mittaustulos kirjataan 2 - 3 osapaketin, tai 10 cm - 30 cm päästä uran suuaukolta. Riippuen tilanteesta mittauksessa voidaan tutkia koko ura kauttaaltaan tai vaihtoehtoisesti mitata korkeimmat purkaukset vain yhdestä

kohtaa. (Covenor 2014, 7). Fortumin sisäisen ohjeistuksen mukaan pulssin näennäis-huippuarvot mitataan jokaisen uran levypaketin molemmista päistä sekä keskeltä le-vypakettia. (Fortum 2019, 11.)

Jokaisesta mittauspisteestä kirjataan lukema mittauspöytäkirjaan. Lukema mittaus-ohjelman näytöllä ei ole stabiili mutta kirjattava lukema tulisi olla suurin toistuva mit-talaitteen näyttämä jännitelukema. Kun jokainen mitattavalle vaiheelle kuuluva ura on tarkastettu, lasketaan testijännite ja maadoitetaan kohde. Siirretään syöttölait-teen kaapeli sekä maadoitukset seuraaviin vaiheisiin. (Fortum 2019, 11.)

Mittauksen suorittaminen turvallisesti vaatii vähintään kaksi sähköalan ammattihen-kilöä. Toinen kuljettamaan anturia jännitteisessä staattorissa ja toinen hoitamaan syöttölaitteistoa sekä tulosten kirjausta. Mikäli alueella on vaaraa ulkopuolisten työn-tekijöiden joutumisesta lähelle testauslaitteistoa tai testattavaa kohdetta, on syytä asettaa alueelle ylimääräinen jännitevahti varoittamaan sivullisia. (Mts. 9.)

### 5.3 Mittaustulosten analysointi

Mittausjärjestelmän antama radiohäiriöjännite  $U_{RDV}$  voidaan kirjata mittauspöytäkir-jaan jokaisesta urasta, sille aiemmin pöytäkirjan valmisteluissa määrättyyn kohtaan. Jännitelukema voidaan muuttaa pöytäkirjaan myös desibeleiksi. Tämä johtaa juu-rensa aiemmin kohdeyrityksen käytössä olleen radiohäiriömittarin mittaustuloksiin. Yrityksessä on säilötty mittaustietoja pitkältä ajalta ja muuttamalla uudemmat mit-taustulokset vastaamaan myös vanhan mittalaitteen tuloksia voidaan mittausten kar-kea vertailukelpoisuus säilyttää. Mitattu jännite saadaan muutettua desibeleiksi yh-tälön 12 avulla. (Fortum 2019, 11-12.)

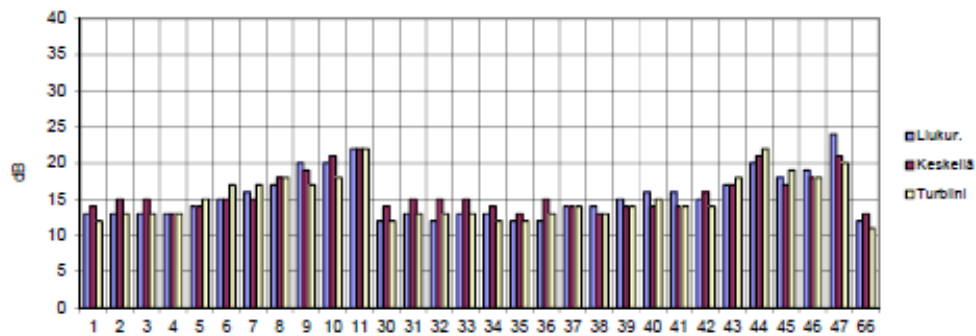
$$dB = 20 \log \left( \frac{U_{RDV}}{0,4} \right) \quad (12)$$

missä  $U_{RDV}$  on mitattu radiohäiriöjännite  
0,4 on empiirisesti päätetty vakio

Käytetty vakio 0,4 on empiirisesti vuosien varrella päätelty vakio, joka vastaa mittausjärjestelmän havaitsemaa jännitettä 0 dB tasolla. Vastaavalla mittausjärjestelmän ja anturin yhdistelmällä tulee vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi käyttää sovittua vakiota. (Mts. 11.)

Mittauspöytäkirjan tulokset voidaan esittää myös kuvaajassa. Tulosten esittäminen kuvaajassa antaa paremman kokonaiskuvan staattorikämmityksen heikoista kohdista. Kuviossa 12 on esitetty tulokset erään generaattorin U-vaiheen urakohtaisista osittaispurkausmittauksista. Mittaukset on suoritettu levypaketin molemmista päistä sekä keskeltä levypakettia.

Vaihe U

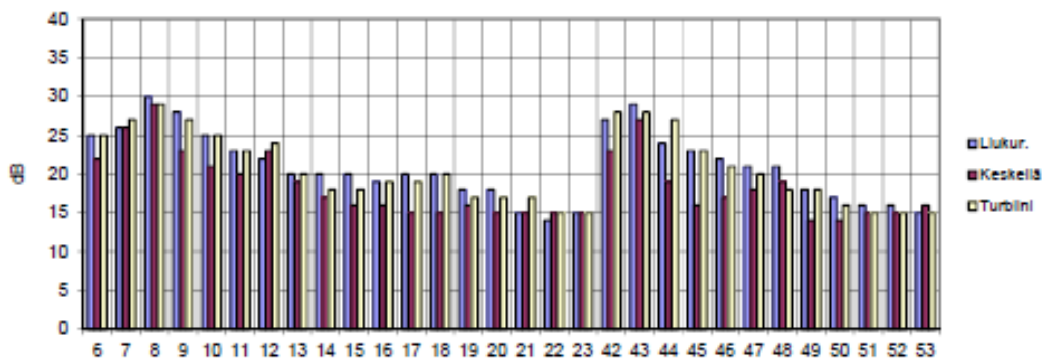


Kuvio 12 Erään generaattorin U-vaiheen mittaustulokset kuvaajassa (Fortum 2011)

Mittauksen tarkoituksena on verrata staattorin urien purkausaktiivisuutta toisiinsa nähden yhtäläisellä testijännitteellä. Yksittäisen uran absoluuttinen mitattu arvo ei vielä kerro kämmityksen kunnosta juuri mitään, ainoastaan vertailu muihin mitattuihin uriin antaa tarkemman kuvan koko kämmityksen kunnosta sekä mahdollisista viikkohdista. Uudessa kämmityksessä purkaukset jakautuvat tasaisesti koko kämmityksen alueelle mutta kuluneissa kämmityksissä voidaan huomata eroavaisuuksia urien välillä, tai urakohtaisesti sijainnin perusteella. (Fortum 2019, 12.)

### 5.3.1 Sähköinen vanheneminen

Sähköinen vanheneminen on normaali ilmiö suurissa sähkökoneissa. Sähköisen vanhenemisen tunnusmerkkejä ovat kohonneet purkaustasot käämeissä lähellä generaattorin liittimiä. Käämityksen alussa liittimien lähellä oleviin käämeihin vaikuttaa ajon aikana suurempi jänniterasitus, kuin tähtipisteen lähellä oleviin käämeihin. Kuvion 12 mukaan urien 11 ja 30 purkaustasoissa on selkeä ero. Myös kuvion 13 mukaan urien 23 ja 42 välillä on selkeä ero osittaispurkaustasoissa.



Kuvio 13 Esimerkki sähköisestä vanhenemisesta urakohtaisesti (Fortum 2011)

Tutkimalla kuviota 14 ja perehtymällä mitatun koneen käämintäkaavioon saatiin selville tulosten johtuvan sähköisestä vanhenemisesta. Käämintäkaavion mukaan urat, joissa esiintyy korkeampia osittaispurkaustasoja, kuuluivat koneen W-vaiheen käämityksen alkupäähän. Sama huomio tehtiin kuvion 13 U-vaiheen mittaustuloksista. (Fortum 2011)

### 5.3.2 Yksittäinen värähtelevä käämisauva

Esimerkkitapaus, jossa staattorikäämin V-vaiheen eristys petti aiheuttaen koneessa läpilyönnin staattorikäämin ja levypaketin välillä urassa 3. Läpilyönti oli seurausta löysästä kiilauksesta, jonka ansiosta värähtelevän staattorikäämin eristys pääsi kulumaan. Viallinen käämisauva poistettiin koneesta korjauksia varten. Tämän jälkeen koneelle suoritettiin sarja sähköisiä kunnonvalvontamittauksia, johon kuului urakohtainen osittaispurkausmittaus. (Fortum 2021, 1.)

V-vaiheesta poistetun käämisauvan takia kyseinen vaihe mitattiin kahdessa osassa käämityksen ollessa poikki. Muut vaiheet mitattiin normaalisti. Mittausten perusteella U-vaiheen mittaustulokset muistuttivat uuden koneen mittaustuloksia. V-vaiheessa purkaukset olivat voimakkuudeltaan kauttaaltaan huomattavasti voimakkaampia. W-vaiheen tuloksissa oli havaittavissa muutamia uria, joissa purkauksia tapahtui, mutta verrattuna V-vaiheeseen olivat purkaukset kuitenkin hyvin maltillisella tasolla. (Mts. 3-4.)

Mittaustuloksissa tulee huomioida myös vierekkäisten urien vaikutus. Mikäli urassa tapahtuvat osittaispurkaukset ovat erittäin voimakkaita, vaikuttavat ne myös vierekkäisten urien mittaustuloksiin. Mittauspöytäkirja esimerkkitapauksesta on esitettyinä työn liitteessä 1.

## **6 Urakohtaisen osittaispurkausmittauksen kehitys**

### **6.1 Anturin kehitys**

Kansainvälisissä standardeissa on esitetty useita anturimalleja sähkömagneettisesti säteilevien osittaispurkausten mittaukseen. Useista anturimalleista ferriittiantenni valikoitiin kvalitatiivisin perustein. Keskeisimpinä valintakriteereinä pidettiin anturin pientä kokoa ja tätä kautta saavutettavaa vaivatonta käytettävyyttä sekä helppoa valmistettavuutta. Myös vuosien kokemus valitusta anturimallista sekä sen havaittu herkkyys ja varmatoimisuus urakohtaisissa osittaispurkausmittauksissa olivat keskeisiä syitä miksi kehitettäväksi anturimalliksi valittiin ferriittiantenni.

#### **6.1.1 Kehitystyön lähtötilanne**

Anturin kehityksen kannalta oli tärkeää selvittää vanhan ferriittiantennin rakenne ja kuinka anturi toimii teoriassa. Kuviossa 14 on esitettyä vanha mittaasanturi. Kuviossa nähdään, kuinka varsinainen anturi on valettu epoksihartsin sisään. Anturin vala-

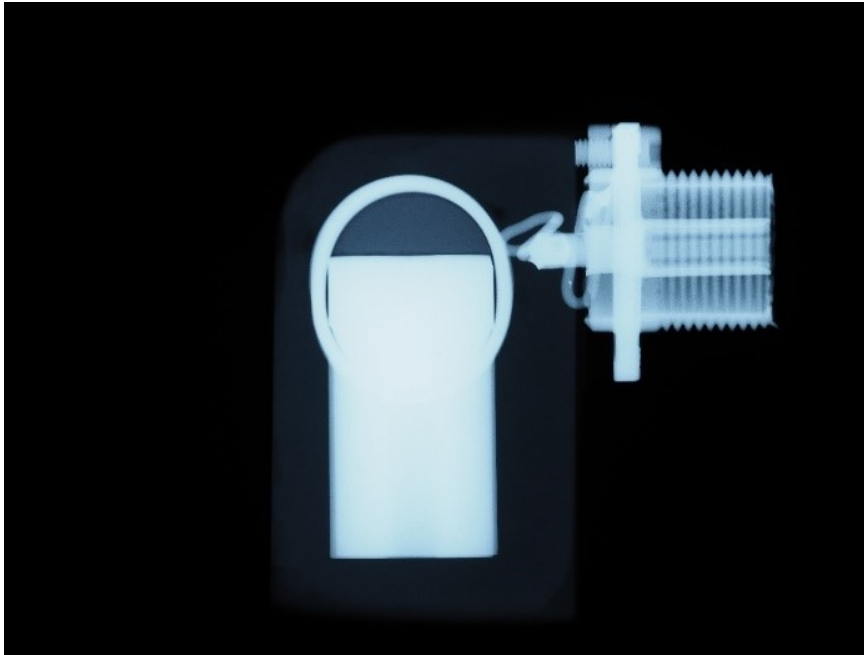


minen korkean läpilyöntilujuuden omaavaan hartsiin on turvallisuustekijä, sillä anturia käytetään pääsääntöisesti suurjännitteisten staattorikäämien läheisyydessä. Hartsaus tuo anturille myös lisää mekaanista kestävyyttä.



Kuvio 14 IVO Oy:n valmistama vanha ferriittiantenni

Anturin sisäisten rakenteiden selvittämiseksi anturi läpivalaistiin jokaiselta sivulta. Läpivalaisu suoritettiin VTT:n laboratoriossa Espoon Otaniemessä. Läpivalaisukuvien perusteella kyettiin selvittämään anturin ferriittisydämen mittasuhteet sekä suurtaajuuskelan kierrosmäärä. Kuviossa 15 on läpivalaistun ferriittianturin sivuleikkaus, josta voitiin erotella sisäiset komponentit.



Kuvio 15 Lämpivalaisukuva vanhasta ferriittiantennista

Kuvasta voitiin helposti erotella anturin ferriittisydän, joka vanhassa mallissa oli U:n muotoinen. Lisäksi kuvasta nähtiin kuparilangasta käämitty kela sekä liitin, jonka napoihin kelan päät olivat kytkettyinä.

Suunnittelun lähtökohtana oli kehittää anturi urakohtaisten osittaispurkausten mittaamiseen. Anturin perusrakenteen tuli olla ferriittiantennille tyypillinen. Anturin toiminnan kannalta kaksi keskeisintä komponenttia olivat ferriittisydän sekä kuparilangasta käämitty suurtaajuuskela. Tutkimalla eri ferriittisydämien sekä suurtaajuuskelojen yhdistelmiä pyrittiin löytämään optimaalinen kokonaisuus.

Ferriittiantennit ovat luonnostaan induktiivisia. Yksittäinen kelan kierros vastustaa virran muutosta ja tätä voidaan kuvata induktanssilla. Yksittäisen kierroksen aiheuttamaa induktanssia voidaan arvioida yhtälön 13 avulla. (Koskimaa 2016, 7.)

$$L = \frac{3,133 \mu^0 N^2 r_c}{(0,9 + \frac{l_c}{r_c})} \quad (13)$$

missä  $N$  on kierrosten määrä  
 $r_c$  on kierroksen säde  
 $l_c$  on käämin pituus

Kapasitiivinen komponentti anturiin muodostuu pääsääntöisesti käämin rinnakkais-ten kierrosten välisistä kapasitansseista. Kun yksittäisen kierroksen kapasitanssi tunnetaan, voidaan yhtälöstä 14 johtaa käämin kokonaiskapasitanssi. (Mts. 8.)

$$C_{kok} = \frac{C_t}{N-1} \quad (14)$$

missä  $C_t$  on yksittäisen kierroksen kapasitanssi  
 $N$  on kierrosten määrä

Anturin resistiivinen komponentti muodostuu pääsääntöisesti kuparilangassa ja ferriittisydämessä muodostuvista ohmisista häviöistä sekä säteilyresistanssista. Esimerkiksi kelan kuparijohtimessa esiintyvät pyörrevirrat aiheuttavat häviöitä kelassa. Resisttiiviset häviöt aiheuttavat antennin herkkyuden heikkenemistä. (Mts. 8.)

Kelan lisäksi ferriittiantennin sydämen mittasuhteet vaikuttavat anturin toimintaan. Materiaalin tehollinen permeabiliteetti  $\mu_e$  riippuu materiaalin suhteellisesta permeabiliteetista  $\mu_r$ , sydämen pituudesta, sydämen poikkipinta-alasta sekä kelan koosta ja sijainnista. Kelan sisällä kasvanut suhteellinen permeabiliteetti ferriittisydämen ansiosta muuttaa kelan induktanssin laskukaavan yhtälön 15 mukaiseksi. (Mts. 7.)

$$L_f = \mu_0 \mu_e N^2 \left( \frac{A}{l_f} \right) \quad (15)$$

missä  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti  
 $\mu_e$  on tehollinen permeabiliteetti  
 $N$  on kelan kierrosten määrä  
 $A$  on sydämen poikkipinta-ala  
 $l_f$  on sydämen pituus

### 6.1.2 Materiaalivalinnat

Ferriittiantennin rakenteen ollessa hyvin yksinkertainen materiaalivalintojen merkitys kasvoi. Etenkin sydänmateriaalina toimivan ferriitin valinta oli suunnitteluprosessissa keskeisessä osassa. Sydänmateriaalin lisäksi materiaalivalintoihin kuului suurtaajuuskelan kuparilangan, sopivan liittimen sekä valuhartsin valinta.

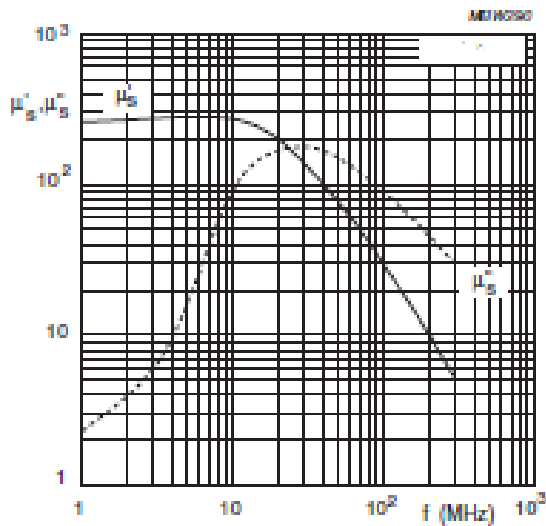
Ferriitti on rautaoksidin, tai toiselta nimeltään ferriittioksidin sekä yhden tai useamman muun metallin seos. Muut metallit joita ferriitissä yleisesti esiintyy ovat mangaasi, nikkeli, sinkki ja magnesium. Materiaali on rakenteeltaan kidemäinen ja se valmistetaan puristamalla sekä polttamalla polttouunissa yli 1300 asteen lämpötilassa. (Magnetics 2018.)

Ferriitti on ominaisuuksiltaan huonosti sähköä johtavaa mutta korkean permeabiliteettinsa ansiosta johtaa magneettivuota erinomaisesti. Lisäksi pyörrevirtoja esiintyy korkeilla taajuuksilla erittäin vähän. Näiden ominaisuuksien ansiosta ferriitti on erinomainen sydänmateriaali suurtaajuuspiireihin kymmenistä kilohertseistä aina kymmeneen megahertzeihin asti. (Mt.)

Oikean ferriittimateriaalin valinnassa keskeisimpänä tekijänä oli materiaalin magneettisten ominaisuuksien käyttäytyminen taajuuden funktiona. Tarkasteluun otettiin kaksi yleisintä ferriittiseosta, jotka olivat Mn-Zn, joka sisältää mangaania ja sinkkiä, sekä Ni-Zn, joka sisältää nikkeliä ja sinkkiä.

Mangaani-sinkkiyhdisteen ferriiteille on tyypillistä, että niiden alkupermeabiliteetti on suhteellisen korkea, ollen noin 700 – 15 000 H/m. Tyypillisiä käyttökohteita materiaalille ovat matalan taajuusalueen sovellukset, kuten antennit ja suurtaajuusmuuntajat. Nikkeli-sinkki yhdisteen alkupermeabiliteetti on tyypillisesti matalampi ollen noin 10 – 3 000 H/m. Materiaali toimii ominaisuuksiltaan kuitenkin paremmin korkeammilla HF-taajuuksilla. Lisäksi materiaalilla on hieman parempi lämpötilankesto. (Neosid 2019)

Ferriittimateriaaleja vertailtiin useita ja lopullinen valinta tehtiin materiaalin magneettisten ominaisuuksien perusteella. Materiaali on seoksestaan Ni-Zn, eli sisältää nikkeliä sekä sinkkiä. Kuviossa 16 on esitetty materiaalin kompleksinen permeabiliteetti taajuuden funktiona. Kuvioista voidaan havaita materiaalin toimivan lähes optimaalisesti alueella 1 MHz – 20 MHz.



Kuvio 16 Ferriitin kompleksinen permeabiliteetti taajuuden funktiona (Ferroxcube 2004)

Ferriitin kompleksinen permeabiliteetti esitetään usein samassa kuvaajassa, antaakseen paremman käsityksen materiaalin magneettisista ominaisuuksista taajuuden funktiona. Kuviossa  $\mu'$  kuvastaa materiaalin permeabiliteetin puhtaasti induktiivista osaa, kun taas  $\mu''$  puhtaasti häviöllistä osaa, jonka merkitys kasvaa etenkin korkeammilla taajuuksilla. (Neosid 2019, 6.)

### 6.1.3 Anturimallien testaus kalibrointipulssilla

Optimaalisen anturimallin selvitys tehtiin valmistamalla lukuisia prototyyppijä eri kierrosmäärillä, langan paksuuksilla sekä erilaisilla ferriittisydämillä. Testeissä selvitettiin myös rauta- ja ilmasydämen vaikutusta anturin toimintaan. Oikean anturimal-

lin selvitystyö suoritettiin kvantitatiivisin perustein toistamalla suuri määrä mittauksia. Kalibrintipulssin käyttö valikoitiin prototyyppien alustavaksi testaustavaksi, sen turvallisuuden ja nopean toistettavuuden takia.

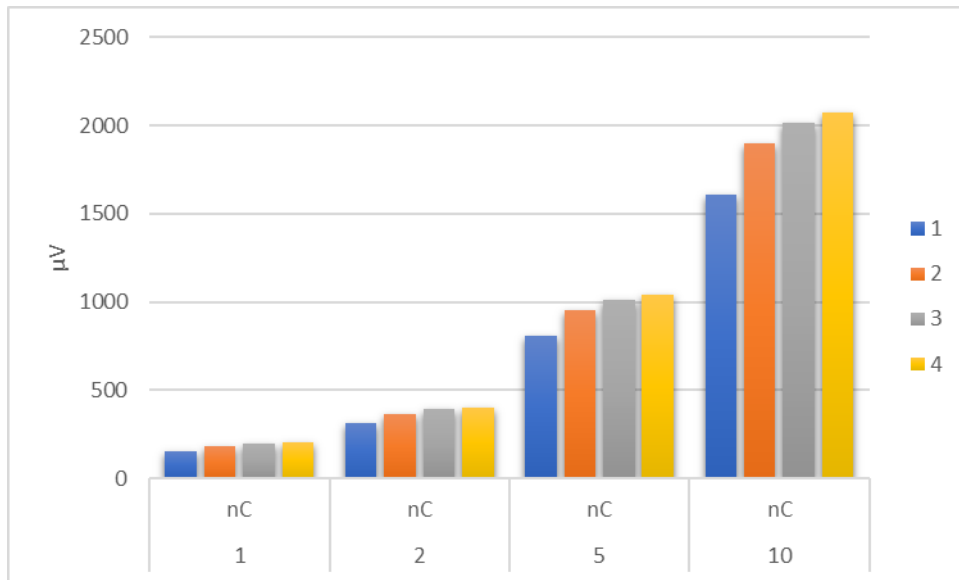
Mahdollisimman autenttisten testausolosuhteiden saavuttamiseksi testit suoritettiin oikeilla sähkökokeen vyyhdeillä sekä MPD-600 osittaispurkausmittausjärjestelmällä ja IEC 60270 standardin mukaisella kalibraattorilla. Vyyhtien ympärille valmistettiin alumiinisista kulmaprofiileista sekä magneettisista kulmaraudan kappaleista staattorin levypakettia muistuttava rakennelma, joka myös maadoitettiin testaustilan päämaadoituskiskoon. Kuviossa 17 on esitettyä testausolosuhteet vyyhdin ollessa itse valmistetussa urassa.



Kuvio 17 Testivyyhti kulmaraudasta valmistetussa urassa

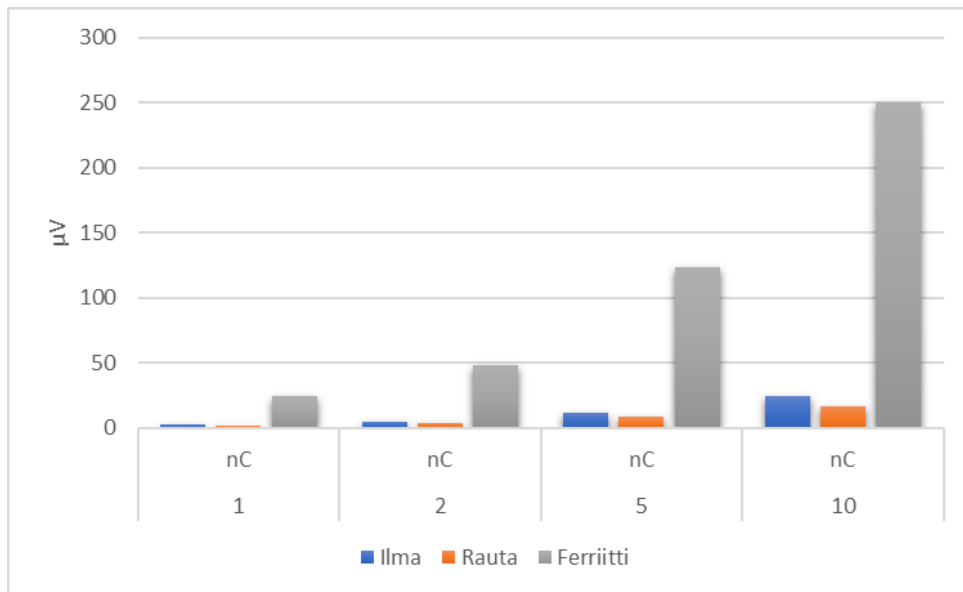
Testaus aloitettiin selvittämällä kuparilangan paksuuden vaikutusta anturin toimintaan. Mittausjärjestelmän kalibraattorilla syötettiin vyyhtiin neljää erisuuruista pulssia ja tulokset kirjattiin tietokoneen näytöltä pöytäkirjaan. Prototyyppivaiheeseen valikoitiin neljä eripaksuista kuparilankaa. Kaikissa keloissa oli sama määrä kierroksia sekä mittaukset suoritettiin 1,2 MHz keskitäajuudella ja 900 kHz kaistanleveydellä.

Sydänmateriaalina käytettiin 50 mm leveää ja 10 mm halkaisijaltaan olevaa ferriittitankoa. Kuviossa 18 on esitetty johtimen paksuuden vaikutus anturin toimintaan kalibrointipulssilla. Kuviossa kuparilangan paksuudet on nimetty juoksevilla numeroinnilla 1 – 4, jotka eivät vastaa kuparilankojen oikeita poikkipinta-aloja. Tarkemmat mittaustulokset on esitettyinä työn salassa pidettävässä liitteessä 2.



Kuvio 18 Johtimen paksuuden vaikutus anturin toimintaan

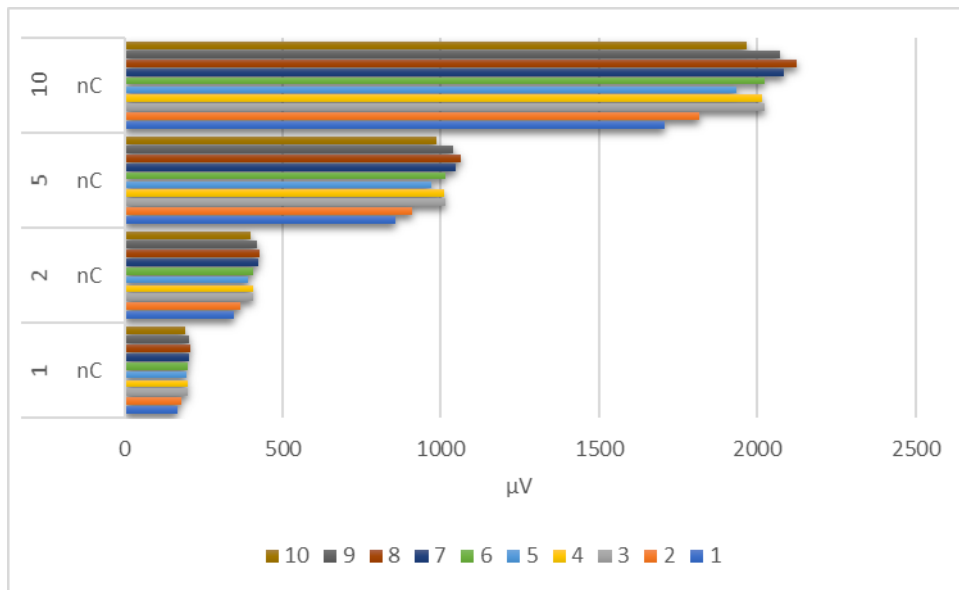
Sydänmateriaalin vaikutusta anturin toimintaan selvitettiin valmistamalla kuparilangasta muutamia keloja eri kierrosmäärillä ja vaihtamalla sydänmateriaalia mittausten välillä yksittäisen kelan sisällä. Jokainen yhdistelmä mitattiin useaan kertaan neljällä eri pulssin voimakkuudella ja tulokset kirjattiin mittauspöytäkirjaan. Kuviossa 19 on esitetty kolmen sydänmateriaalin keskiarvoiset mittaustulokset neljällä eri kalibrointipulssilla. Kuvioista nähdään ferriitin erinomainen toimivuus verrattuna rauta- tai ilmasydämeen.



Kuvio 19 Sydänmateriaalin vaikutus anturin toimintaan kalibrointipulsseilla

Optimaalinen kierrosmäärä selvitettiin valmistamalla parhaaksi valikoidusta kupari-langasta eri kierrosmääräisiä keloja. Mittaukset toistettiin vastaavilla kalibrointipulsseilla kuten aiemmissakin mittauksissa. Mittaustaajuus pidettiin samana kaikissa mittauksissa. Mittaustuloksista voitiin päätellä parhaan prototyypin olevan 1,77 % parempi verrattuna toiseksi parhaaseen malliin. Testien tuloksena saatiin selville kelan optimaalinen kierrosmäärä. Kuviossa 20 on esitettynä mittaustulokset kymmenellä eri kelan kierrosmäärällä. Kuviossa esitetty numerointi ei vastaa kelojen todellisia kierrosmääriä. Tarkemmat mittaustulokset on esitettynä työn salassa pidettävässä liitteessä 2.





Kuvio 20 Kelan kierrosten vaikutus kalibrointipulsseilla

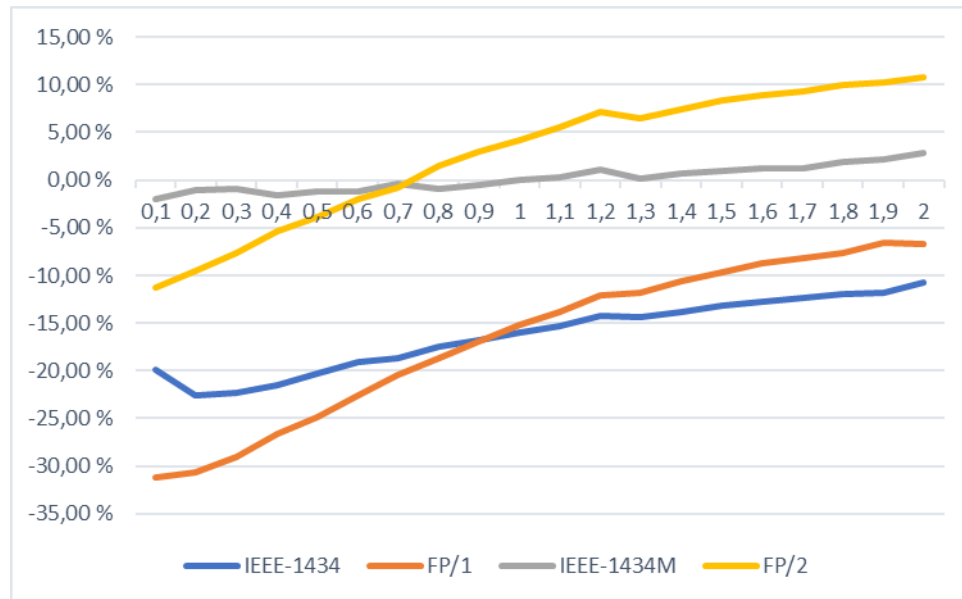
### Vertailumittaukset kalibrointipulsseilla

Vertailumittauksiin valittiin kolme anturia. Referenssimittaukset suoritettiin vanhalla IVO Oy:n valmistamalla anturilla. Referenssimittauksien tuloksia verrattiin omaan prototyyppiin sekä itse valmistettuun IEEE 1434 standardin mukaiseen anturiin.

IEEE-1434 standardin mukaan sähkömagneettisten osittaispurkausten mittaukseen käytettävän anturin ferriittisydämen tulisi olla noin 50 mm pitkä ja noin 10 mm halkaisijaltaan. Suurtaajuuskelan kierrosmääräksi on standardissa määritetty 15 kierrosta sekä kuparilangan poikkipinta-alaksi 2 mm<sup>2</sup>. (IEEE 1434:2000, 25.)

Vertailumittaukset aloitettiin tutkimalla anturien toimintaa eri mittaustaajuuksilla. Vyyhtiin syötettiin 10 nC suuruista kalibrointipulsseja ja mittaustaajuutta muutettiin 100 kHz portaissa välillä 100 kHz – 2 MHz. Mittausohjelman tietokoneen näytöltä kirjattiin lukemat mittauspöytäkirjaan jokaiselta taajuustasolta. Mittauksissa selvitettiin myös ferriittisydämen pituuden vaikutusta anturin herkkyydelle. Molemmat itse valmistetut anturit testattiin kahdella erikokoisella ferriittisydämellä. Kuviossa 21 on esitettyä antureiden toimintaa suhteessa referenssimittauksiin. Suhteellista eroa on

kuvattu prosentuaalisesti. Prototyypistä on käytetty nimitystä FP. Tarkemmat mitaustulokset on esitettyä salassa pidettävässä liitteessä 3.



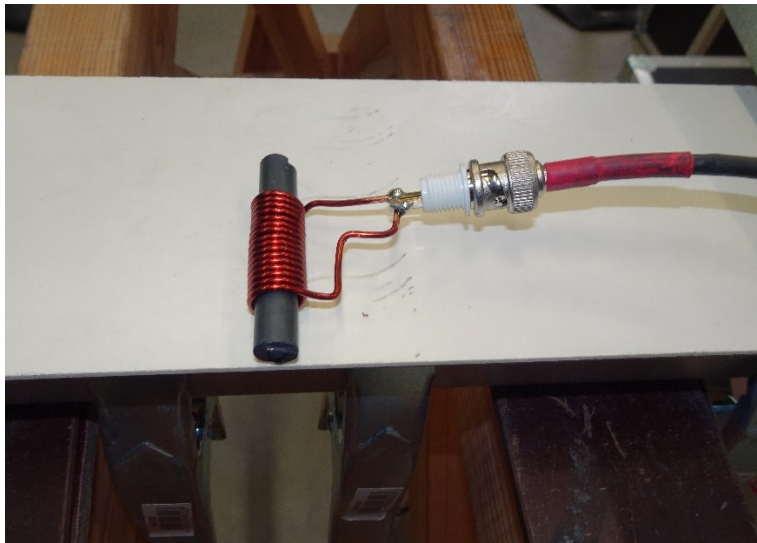
Kuvio 21 Prototyyppien prosentuaalinen ero referenssimittauksiin taajuuden funktiona.

Mittausten perusteella voitiin havaita pidemmällä ferriittisydämellä varustettujen anturien olleen selkeästi herkempiä lyhyempiin verrattuna. IEEE-1434 mukainen anturi toimi tasaisemmin kaikilla taajuusalueilla mutta oli selkeästi huonompi yli 700 kHz taajuuksilla. Mittaustulosten perusteella paras anturimalli havaitsi kalibrointipulsseja vanhaa anturia herkemmin mittaustaajuuden ylittäessä 700 kHz. 1 MHz mittaustaajuudella prototyyppianturista saatu  $U_{RDV}$  10 nC kalibrointipulssilla oli 4,15 % suurempi kuin vanhalla anturimallilla.

## 6.2 Mittaukset osittaispurkauksilla

Mittaukset oikeilla osittaispurkauksilla suoritettiin syöttämällä testivyyhteihin suurjännitettä 15,75 kV syöttömuuntajan sekä 0 V – 230 V säätömuuntajan avulla. Mittauskytkentään kuului myös suurjännitemittari sekä MPD-600 mittausjärjestelmä. Testikytkennän ottamaa virtaa valvottiin myös koko mittausten ajan.

Testialue rajattiin turvallisuussyistä, lisäksi alueelle asetettiin merkkivaloja varoittamaan vaarallisesta suurjännitteestä. Mittauksissa jokaiseen vyyhtiin syötettiin vuorotellen 6 kV testijännitettä vyyhdin ollessa maadoitetussa urassa. Purkauksia tutkittiin asettamalla anturi mitattavan vyyhdin päälle. Prototyypianturin ja suurjännitteisen vyyhdin välissä käytettiin ohutta muovilevyä antureiden suojaamiseksi suorilta kontaktilta suurjännitteiseen vyyhtiin. Kuviossa 22 on IEEE 1434 standardin mukainen anturi mittaushetkellä.

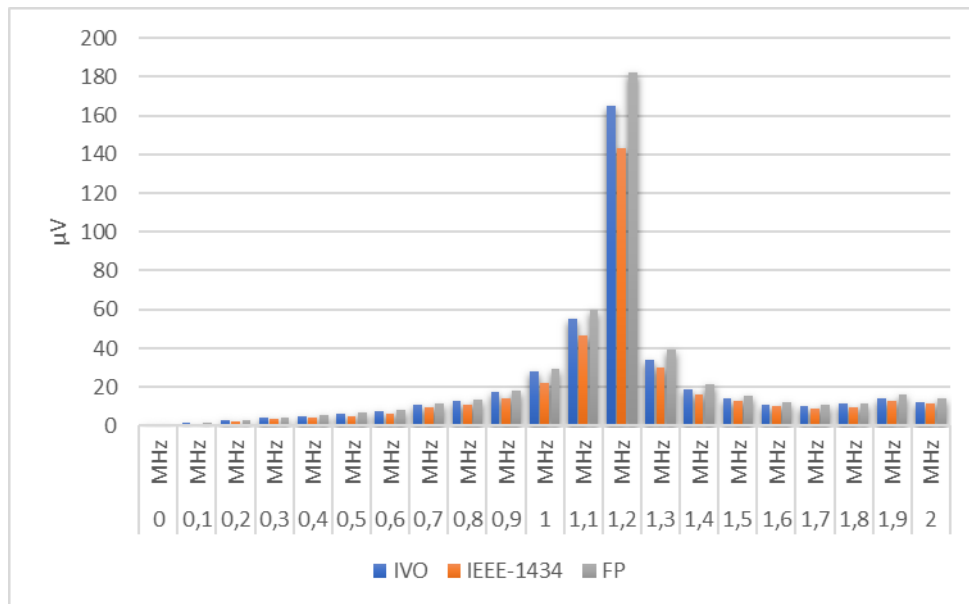


Kuvio 22 IEEE 1434 mukainen anturi mittaushetkellä

Testivyyhtejä oli käytettävissä yhteensä 5 kappaletta, joihin aiheutettiin johtavaa pintaa kuluttamalla tai muilla tavoin osittaispurkauksia. Mittauksissa selvitettiin kuinka hyvin kolme anturimallia havaitsivat erilaisia urakohtaisia vikaantumismalleja sekä viikojen jänniteriippuvuutta. Myös mittaustaajuuden vaikutusta osittaispurkausmittauksessa tutkittiin.

### 6.2.1 Mittaustaajuuden vaikutus

Mittaustaajuuden vaikutusta urakohtaiseen osittaispurkausmittaukseen tutkittiin syöttämällä testivyyhtiin 6 kV jännitettä ja mittaamalla radiohäiriöjännite  $U_{RDV}$  100 kHz välein alkaen 100 kHz mittaustaajuudelta, aina 2 MHz asti. Kuviossa 23 on esitetynä mitattu radiohäiriöjännite mikrovoltteina mittaustaajuuden funktiona kolmella anturimallilla.



Kuvio 23 Radiohäiriöjännite mittaustaajuuden funktiona.

Tuloksista voitiin havaita 1,2 MHz mittaustaajuuden olevan merkittävästi herkempi koko mittausjärjestelmä huomioiden. Sama ilmiö havaittiin kaikilla anturimalleilla sekä myös kalibrointipulssilla tehtyjen testien yhteydessä. Myös erilaisilla vikaantumismalleilla, mitä käämeille tehtiin oli 1,2 MHz mittaustaajuus ehdottomasti herkin. Havaittu herkkyys on Omicron-mittausjärjestelmän ominaisuus. Kyseistä ominaisuutta ei oltu aiemmissa mittauksissa havaittu. Nyt havaittu herkkyys 1,2 MHz taajuudella on tulevaisuuden mittauksia ajatellen erittäin hyödyllinen löydös.

### 6.2.2 Osittaispurkaukset viallisissa vyyhdeissä

Autenttisten urakohtaisten osittaispurkausmittausten aikaansaamiseksi testivyyhtien johtavaa pinnoitetta rikottiin hiomalla. Hiomisen lisäksi uran onteloitumista simuloitiin pyörittämällä vyyhdin sivun ja levypaketin väliin muutama kerros muovikelmua. Muovikelmulla aiheutetut ontelopurkaukset havaittiin kuitenkin liian epästabiileiksi, jotta luotettavaa mittausdataa olisi voitu kerätä. Kuviossa 24 on esitettyä testivyyhdin 2 hiottu johtava pinnoite. Kuvion mukaisella pinnan hionnalla saatiin aikaan voimakkaimmat osittaispurkaukset.



Kuvio 24 Testivyyhdin 2 johtava pinta hiottuna koko matkalta.

Vertailumittaukset oikeilla osittaispurkauksilla suoritettiin noudattamalla yleisiä mitausohjeita urakohtaisille osittaispurkausmittauksille. Jokaisen mitatun testivyyhdin purkaustasojen annettiin tasoittua ennen mittausten aloittamista.

Mittaukset aloitettiin asettamalla mittaustaajuus herkimmälle mittaauksissa havaitulle 1,2 MHz mittaustaajuudelle. Jännitettä nostettiin 1 kV portaissa aina 6 kV asti kirjan radiohäiriöjännitteet jokaisella jänniteportaalla. Jännitteen noston jälkeen testi-jännite jätettiin 6 kV tasolle ja mittalaitteen havaitsema radiohäiriöjännite kirjattiin viidellä eri mittaustaajuudella. Mittaustaajuuksiksi valittiin herkimmäksi havaittu 1,2 MHz sekä 1 MHz ja 2 MHz. Näiden lisäksi toimintaa testattiin sellaisella mittaustaajuudella, jolla nähtiin vähiten häiriöitä alle 1 MHz taajuuksista sekä 800 kHz taajuudella. Mittausympäristössä vähinten häiriöitä havaittiin taajuudella 679 kHz.

Kaikki kolme anturia testattiin jokaisella jänniteportaalla sekä kaikilla eri vikatilanteilla ja kaikilla viidellä eri taajuudella. Näin kyettiin selvittämään anturien toimintaa eri mittaustaajuuksilla sekä eri suuruisilla osittaispurkauksilla.

Vyyhteihin tehdyt viat toimivat odotetusti. Voimakkaimmat osittaispurkaukset havaittiin testivyyhdissä 2, jonka johtavaa pinnoitetta oli hiottu koko matkalta. Vyyhti 3, jonka pinnoite oli hiottu vain yhdestä kohdasta sai aikaan hieman pienempiä osittaispurkauksia. Kuljetuksessa lattialle pudonneen vyyhdin osittaispurkaukset olivat samalla tasolla kuin testivyyhdissä 3. Pudonneen vyyhdin osittaispurkaukset mitattiin myös mittauskondensaattorin avulla ja nimellisjännitteellä purkausten voimakkuudeksi osoittautui 3 nC. Ferriittiantennilla mitattuna lattialle pudonneen vyyhdin radiohäiriöjännite oli 296  $\mu\text{V}$ . Verrattuna täysin ehjään vyyhtiin, jonka mitattu radiohäiriöjännite oli 18  $\mu\text{V}$ , on pudotus selkeästi vaurioittanut vyyhdin eristeen rakennetta. Havainto kuvastaa kuinka helposti vyyhdin eristerakenne voi vaurioitua pienestäkin iskusta.

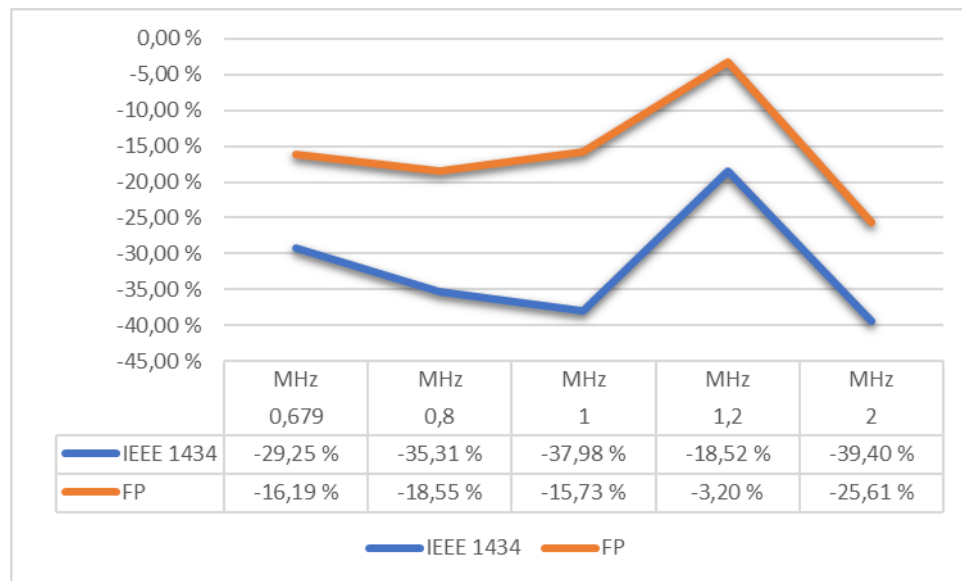
### 6.2.3 Mittaustulokset

Mittaustulosten perusteella voitiin todeta jokaisen anturin toimivan urakohtaisten osittaispurkausten mittauksessa. Jokaisella anturilla havaittiin sama purkausten syttymisjännite PDIV, pois lukien vyyhti 4, joka oli täysin ehjä. Myös anturien havaitsemien purkausten voimakkuus eri vikatilanteissa kasvoi samassa suhteessa.

Mittauksissa havaittiin myös anturin asennolla olevan suuri merkitys mittaustuloksiin. Kääntämällä anturia 90 astetta niin, että ferriittisydän ja kela olivat vyyhdinsivun kanssa samassa linjassa oli anturin havaitsema signaali lähes olematon. Oikean mittaustuloksen varmistamiseksi on huolehdittava anturin oikeasta asennosta sekä minimoitava etäisyys mitattavaan kohteeseen.

Vanha mittausanturi oli mittausten perusteella kaikki taajuudet ja vikatilanteet huomioiden paras anturi purkausten mittaukseen. 1,2 MHz mittaustaajuudella päästiin kuitenkin uudella mittausanturilla, joka on kolmanneksen vanhan anturin koosta, 3,20 % päähän vanhan anturin mittaustuloksista. 3,20 % poikkeama on keskiarvoinen poikkeama kaikkien testivyyhtien mittaustuloksista. Matalammilla taajuuksilla ero oli odotetusti suurempi, kuten kalibrointitesteissäkin havaittiin. IEEE 1434 standardin mukainen anturi havaittiin testattavien anturien joukosta huonoimmaksi. Kuviossa

25 on esitetty keskiarvoiset erot prosentuaalisesti viidellä eri mittaustaajuudella verrattuna vanhaan anturiin.



Kuvio 25 Mittaustulosten prosentuaalinen poikkeama mittaustaajuuden funktiona.

Lopputuloksena 3,20 % eroa vanhaa anturiin herkimällä mittaustaajuudella voidaan pitää hyvänä. Mittaustulosten perusteella kehitystyössä saatiin aikaan laboratorioolosuhteissa toimiva mittausanturi urakohtaisten osittaispurkausten mittaukseen. Anturin toimintaa voimalaitosympäristössä ei testattu kehitystyön puitteissa. Kehitystyön mittauspöytäkirjat ja tarkemmat tulokset on esitettyinä työn salassa pidettävissä liitteissä 2 ja 3.

### 6.3 Tulevaisuuden kehityskohteet

Urakohtaisen osittaispurkausmittauksen tulevaisuutta ajatellen on turvallisuuteen panostettava, jotta mielenkiinto mittaukseen heräisi uudelleen. Mittaus on hyväksi havaittu tapa urakohtaisten osittaispurkausten havaitsemiseen ja mitä useampi toimija käyttäisi mittauksia, sitä enemmän tietoa mittauksesta olisi saatavilla.

Yhtenä suunnitteluvaiheessa esiin nousseena toimenpiteenä oli galvaanisten yhteyksien minimoiminen mittausjärjestelmässä. Omicron MPD-600 mittausjärjestelmä

käyttää jo valmiiksi valokuituyhteyksiä tiedonsiirtoon, mutta yhteys mittausanturista pulssin kytkentäyksikölle on edelleen toteutettu koaksiaalikaapelilla. Mittausanturin sekä siitä lähtevän koaksiaalikaapelin ollessa suurjännitteisen staattorikäämin välittömässä läheisyydessä aiheuttaa se riskin anturin käyttäjälle. Tästä syntyi idea optoerottimen mahdolliseen käyttöön tulevaisuudessa. Erottimen avulla voitaisiin mahdollisesti korvata koaksiaalikaapeli valokuitukaapelilla.

Tulevaisuudessa myös robotiikan avulla voitaisiin parantaa mittauksen turvallisuutta huomattavasti. Lisäksi automaattisen asematunnistuksen integroiminen mittausjärjestelmään voisi tuoda lisäarvoa mittaukselle. Myös muita anturivaihtoehtoja tutkimalla on mahdollista kehittää mittausta entisestään.

## **7 Johtopäätökset ja pohdinta**

Työn tarkoituksena oli perehtyä tarkemmin urakohtaiseen osittaispurkausmittaukseen. Tutustumalla mittauksen teoriaan tarkoituksena oli kehittää kohdeyritykselle käyttöön uusi mittausanturin prototyyppi urakohtaisten osittaispurkausmittausten suorittamiseen. Anturin lopullinen valmistus rajattiin kehitystyön ulkopuolelle. Uuden anturin lisäksi tarkoituksena oli tutkia itse mittausta ja kaikkia tekijöitä, jotka vaikuttavat mittauksesta saatuihin tuloksiin.

Tuloksena kattavan testauksen ja kehittämisen jälkeen saatiin työn puitteissa kehitettyä prototyyppi uudesta mittausanturista urakohtaisten osittaispurkausmittausten suorittamiseen. Uusi anturi on kooltaan huomattavasti edeltäjäänsä pienempi. Toiminta-alue eri mittaustaajuuksilla ei ole yhtä laaja, kuin vanhalla anturilla mutta tutkimuksissa havaittu herkin mittaustaajuuksii uudelle anturille erittäin hyvin.

Koemittausten perusteella kehitetyn anturin ominaisuudet ovat joka suhteessa riittävät siihen että vanha anturi voidaan korvata kehitetyllä uudella anturilla. Mittauksen tarkoituksena on todeta erot staattorin eri osien välillä, ei mitata



mahdollisimman tarkasti signaalin voimakkuutta. Kohdeyityksen toimitusvarmuutta saadaan parannettua valmistalla prototyypin mukaisia antureita mittauskäyttöön.

Rajoittavana tekijänä kehitystyössä oli autenttisten kenttätestausten puute. Testausajanjaksolle kehitystyön aikataulun puitteissa ei sattunut sopivaa kohdetta, jossa prototyyppiä olisi päästy testamaan voimalaitosympäristössä. Kohdeyityksen toimitiloihin rakennetuilla testijärjestelyillä saatiin kuitenkin luotua riittävän hyvät testiolosuhteet anturin kehitystyölle.

Kehitystyön tuloksista mittaustaajuuden vaikutuksen ymmärtäminen mittaustuloksiin oli työn merkittävin löydös. Tutkimalla eri taajuuksia havaittiin merkittävä muutos järjestelmän havaitsemassa radiohäiriöjännitteessä. Etenkin kalibrointipulssilla tehdyissä vertailumittauksissa havaittu radiohäiriöjännite oli lähes 10-kertainen aiemmin käytettyyn mittaustaajuuteen verrattuna. Kehitystyössä tehtyä löydöstä tullaan soveltamaan tulevissa mittauksissa.

Tulevaisuuden kehityskohteina urakohtaisessa osittaispurkausmittauksessa voidaan pitää galvaanisten yhteyksien minimoimista. Mittausohjelman automatisointi olisi tulevaisuudessa myös mittaajille suuri apuväline urakohtaisten osittaispurkausmittausten suorittamiseen.

## Lähteet

- Abbaszadeh, K. & Alam, F. 2011. Circulating current analysis between strands in armature winding of a turbogenerator using analytical model. Department of Electrical and Computer Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Teheran, Iran. Viitattu 1.5.2021. [https://www.researchgate.net/figure/Sample-structure-of-a-Roebel-bar-a-2D-structure-and-b-3D-structure\\_fig2\\_272163575](https://www.researchgate.net/figure/Sample-structure-of-a-Roebel-bar-a-2D-structure-and-b-3D-structure_fig2_272163575)
- Afework, B., Hanania, J., Heffernan, B., Jenden, J., Khani, J., Stenhouse, K. & Donev, J. 2018. Turbine. University of Calgary, Energy Education. Viitattu 22.10.2020. <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Turbine#:~:text=A%20turbine%20is%20a%20device,as%20a%20type%20of%20engine.>
- Aura, L., Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Helsinki: WSOY.
- Convenor, D., Fenton, R., Henderson, K., Kokko, V., Kruger, N., McDermid, B., O'Sullivan, B., Sasic, M., Nico, S., Sedding, H., Greg, S., Tartaglione, V., Villarrubia, A., Weidner, J., Wiehe, P., Zhu, H. 2014. Guide – Corona Electromagnetic Probe Tests (TVA). Cigre 581, Working Group A1.28.
- Csaba, G. 2020. Generator Diagnostics – From 100 failure modes to risk of forced outage. Webinar. Fortum Power and Heat Oy.
- Energiavuosi 2019 sähkö. 2020. Verkkojulkaisu Energiatoteellisuus 3.1.2020. Viitattu 22.7.2020. [https://energia.fi/files/4360/Sahkovuosi\\_2019\\_mediakuvat.pdf](https://energia.fi/files/4360/Sahkovuosi_2019_mediakuvat.pdf)
- Ferroxcube. 2008. Data sheet Material Specification.
- Fortum Power and Heat Oy. 2011. Sisäinen raportti.
- Fortum Power and heat Oy. 2015. Sisäinen valokuva-arkisto. Fortum.
- Fortum Power and heat Oy. 2018. Sisäinen valokuva-arkisto. Fortum.
- Fortum Power and Heat Oy. 2019. Generator Stator Slot Specific Partial Discharge Measurement. Fortum sisäinen ohje.
- Fortum Power and Heat Oy. 2021. Juurisyyraportti ES-02783. Fortum.
- Hai, Li., Haiping, Zhu., Peigen, Li., Fei, He. 2014. Tolerance analysis of mechanical assemblies based on small displacement torsor and deviation propagation theories. Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China. Viitattu 18.4.2021. [https://www.researchgate.net/publication/271953201\\_Tolerance\\_analysis\\_of\\_mechanical\\_assemblies\\_based\\_on\\_small\\_displacement\\_torsor\\_and\\_deviation\\_propagation\\_theories](https://www.researchgate.net/publication/271953201_Tolerance_analysis_of_mechanical_assemblies_based_on_small_displacement_torsor_and_deviation_propagation_theories)
- Heinonen, M. 2010. 2000-Luvun Höyryturbiinit. Kadidaattityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta, Energiatekniikka. Viitattu 22.10.2020.

<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/69180/nbnfi-fe201103301396.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Hietalahti, L., Kauppinen, J., Wikström, R. 2020. Generaattorit, käyttö, huolto ja kunossapito. Tampere, Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere, Tammertekniikka.

IEC 60034-27:2005. Rotating Electrical Machines – Partial Discharge off-line Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Machines. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. Viitattu 19.10.2020.

IEC 60270:2000. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. Third edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. Viitattu 19.10.2020.

IEC TS 62478:2016. High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. Viitattu 25.4.2021.

IEEE 1434 :2000 (R2005). IEEE Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery. Second edition. New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers, inc.. Vahvistettu 22.9.2005. Viitattu 16.11.2020.

Iris Power Engineering. 2001. PD seminar. Version 2.3. Etobicoke, Ontario, Canada.

Joksimovic, G. 2011. AC winding Analysis using Winding Function Approach. Department of Electrical Engineering, University of Montenegro, Montenegro. Viitattu 1.5.2021. [https://www.researchgate.net/publication/241701467\\_AC\\_Winding\\_Analysis\\_Using\\_a\\_Winding\\_Function\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/241701467_AC_Winding_Analysis_Using_a_Winding_Function_Approach)

Kerszenbaum, I., Klempner, G. 2018. Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance. Third edition. New Jersey: John Wiley & Sons inc.

Koponen, O. 2021. Sähkötöiden johtaja. Fortum Power and Heat Oy. Haastattelu 8.5.2021.

Korjula, V., Pasi, J. 2019. Sähköntuotanto maakunnittain 2007-2018. Verkkojulkaisu Energiatieteilisyys 22.10.2019. Viitattu 22.7.2020. [https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/sahkontuotanto\\_maakunnittain\\_2007-2018.html#material-view](https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/sahkontuotanto_maakunnittain_2007-2018.html#material-view)

Korpinen, L. 2008. Sähkövoimatekniikkaopus osa 2. Viitattu 1.5.2021. [http://leenakorpinen.com/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_2osa.pdf](http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf)

Koskimaa, P. 2016. Ferrite Rod Antenna in an Nanosatellite Medium and High Frequency Radio. Aalto University. School of Electrical Engineering. Viitattu 23.2.2021. [https://space.aalto.fi/pdf/Diplomityo\\_PetriKoskimaa\\_AaltoUniversity\\_2016.pdf](https://space.aalto.fi/pdf/Diplomityo_PetriKoskimaa_AaltoUniversity_2016.pdf)

Kostama, J. 2019. Sähköntuotanto. Verkkojulkaisu Energiatieteilisyys 18.1.2019. Viitattu 22.7.2020. <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto>

Krüger, M. 2014. New Tools for Diagnostic Measurements on Electrical Rotating Machines. The Annual Convention of the Society of Electrical and Electronics Engineers in Israel. Omicron. Viitattu 2.5.2021. <https://slideplayer.com/slide/6058542/>

Magnetics. 2018. Learn More About Ferrite Cores. Verkkajulkaisu Magnetics 2018. Viitattu 4.5.2021. <https://www.mag-inc.com/Products/Ferrite-Cores/Learn-More-about-Ferrite-Cores>

Lloyd, B. 1990. Effects of Modern Variable Speed Drives on Motor Winding Insulation. Qualitrol – Iris Power. Viitattu 1.5.2021. <https://slideplayer.com/slide/12409375/>

Neosid. 2019. Definitions and Properties of Soft Ferrites. Viitattu 1.5.2021 [https://www.neosid.com.au/files/Definitions\\_and\\_Properties\\_of\\_Soft\\_Ferrites.pdf](https://www.neosid.com.au/files/Definitions_and_Properties_of_Soft_Ferrites.pdf)



Omicron. 2010. MPD-600 Brochure, High-end Measurement and Analysis System for Partial Discharges (PD). Omicron.

Stone, G. 2015. Advanced Stator Winding Partial Discharge Interpretation. Seminar presentation. Iris Power Engineering.



## Liitteet

Liite 1. Esimerkki 42-uraisen koneen urakohtaisesta mittauksesta

STAATTORIPAKETIN URAKOHTAINEN HOHTOPURKAUSMITTAUS			
<b>Kalibrointiasetukset</b>			
Mittaustaajuus	1,5 MHz	$U_N$	10,50 kV
Häiriötaso	17 dB	$C_V$	0,200 $\mu F$
Häiriötaso	2700 nV	Uraluku	42
0 dB	0,4 $\mu V$	läämikaavion numero	oma
Mittaussondi	Induktiivinen pC		
Kalibrointipulssi	Hz		
Pulssitaajuus			
<b>Kalibrointimittaus</b>		<b>Mittaus jännitteen funktiona</b>	
Q Kalibraattori	10000 pC	Mittausura	2
		Mittaustaajuus	1,5 MHz
<b>Liitin</b>	<b>Ura</b>	<b>Purk.taso</b>	<b>U</b>
n:o	n:o	dB	$\mu V$
U	19	39	37,3
	2	38	32,9
	17	21	4,7
	34	22	5,1
	23	18	3,3
	40	18	3,0
<b><math>U_1</math></b>	<b>Purk.taso</b>	<b>U</b>	
kV	dB	$\mu V$	
1	19	3,6	
2	20	3,8	
3	19	3,7	
4	20	4,0	
5	21	4,3	
6	24	6,0	
7			
8			
<b>Purkausten tasaantuminen koejännitteellä</b> 6 kV			
Mittausura	2	Mittausura	30
		V1	
<b>U-vaihe</b>		<b>V-vaihe</b>	
<b>Aika</b>	<b>Taso</b>	<b>Aika</b>	<b>Taso</b>
min	$\mu V$	min	$\mu V$
0	6,6	0	44,6
5	5,8	5	22,3
10	5,8	10	22,3
Mittausura	4		
	V2	<b>V-vaihe</b>	
<b>Aika</b>	<b>Taso</b>		
min	$\mu V$		
0	128		
5	115		
10	108		
Mittausura	16		
<b>W-vaihe</b>			
<b>Aika</b>	<b>Taso</b>		
min	$\mu V$		
0	7		
5	7		
10	9,7		

Vaihe U										
Syöttöliitin		Ura	Sauvojen vaiheet		Purkaustasot			Purkaustasot (µV)		
Liitin n:o	U kV	n:o			Liukur. dB	Keskellä dB	Turbiini dB	Liukur.	Keskellä	Turbiini
U	6	13	U	W	21	22	23	4,5	5,1	5,5
		14	U	W	24	24	27	6,3	6,1	8,6
		15	U	W	23	21	24	5,8	4,7	6,1
		16	U	W	23	25	22	5,8	6,8	5,3
		17	U	U	27	27	28	8,8	8,9	10,5
		18	U	U	25	24	26	7,5	6,4	8,4
		19	U1	U	27	27	28	9,1	8,5	7,9
		20	V	U	24	24	25	6,4	6,2	6,9
		21	V	U	25	23	24	6,8	5,6	6,4
		22	V	U	25	23	25	7,1	5,9	6,8
		23	V	U	23	25	28	5,8	7,2	10,1
		34	U	W	23	20	22	5,8	4,1	5,0
		35	U	W	22	20	22	5,0	3,9	5,1
		36	U	W	23	21	23	5,8	4,7	5,7
		37	U	W	24	22	24	6,5	5,1	6,4
		38	U	U	29	28	27	11,5	7,6	8,8
		39	U	U	28	27	28	9,7	8,7	9,5
		40	U2	U	26	29	30	7,9	11,2	12,4
		41	V	U	28	25	24	8,2	7,1	6,6
		42	V	U	25	22	26	7,5	5,2	7,7
		1	V	U	27	22	22	9,1	4,8	5,3
		2	V	U	25	25	28	7,1	6,8	9,8
Huomioita			Keskiarvo		24,9	23,8	25,2			
			Maksimi		29,2	28,9	29,8			

Vaihe V												
Syöttöliitin		Ura	Sauvojen vaiheet		Purkaustasot			Purkaustasot (µV)				
Liitin n:o	U kV	n:o	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Liukur. dB	Keskellä dB	Turbiini dB	Liukur.	Keskellä	Turbiini		
V	6	41	V	U	30	24	24	12,4	6,4	6,6		
		42	V	U	27	24	28	8,8	6,2	7,7		
		1	V	U	30	24	22	12,6	6,6	4,8		
		2	V	U	38	23	27	25,4	5,4	8,9		
		3	V	V	37	34	31	28,9	19,1	13,8		
		4	V	V	48	49	43	97,9	112,7	56,6		
		5	V1	V	40	34	38	37,9	20,3	30,0		
		6	W	V	47	40	45	88,2	42,0	68,6		
		7	W	V	43	34	32	55,2	19,2	15,6		
		8	W	V	40	34	38	37,9	20,3	30,0		
		9	W	V	37	31	37	28,9	14,4	29,0		
		20	V	U	41	40	39	46,0	41,5	37,0		
		21	V	U	48	41	45	103,0	43,0	67,4		
		22	V	U	48	43	46	101,0	56,0	81,3		
		23	V	U	44	34	30	65,8	20,3	13,1		
		24	V	V	36	35	33	26,3	22,9	18,1		
		25	V	V	32	34	31	15,4	19,1	14,6		
		26	V2	V	35	32	38	22,3	15,9	31,2		
		27	W	V	31	25	25	13,6	7,0	7,2		
		28	W	V	36	33	35	24,3	18,2	23,3		
		29	W	V	45	39	33	67,2	35,9	18,9		
		30	W	V	36	34	37	25,6	20,3	27,1		
		Huomioita		Keskiarvo			38,4	33,7	34,3			
				Maksimi			48,2	49	46,2			
		Sauva pinta 3 imotettu										
		HV kytketty V1										
		HV kytketty V2										
Otettu maksimiarvo joko V1 tai V2 kytkettynä (se kumpi antaa suuremman arvon)												

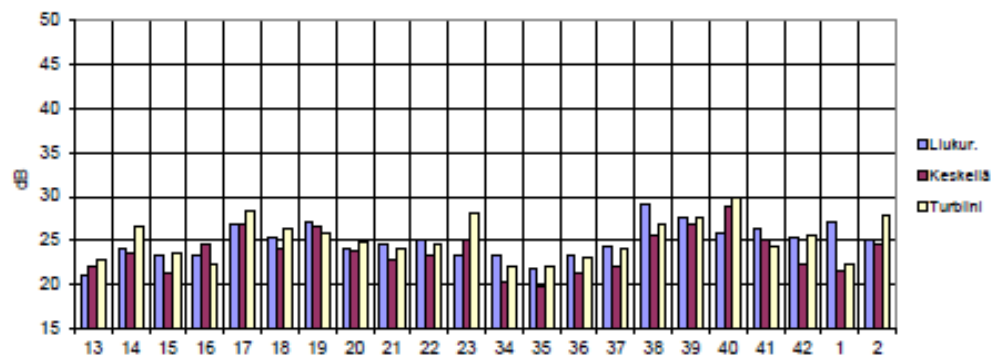
Vaihe W										
Syöttöliitin		Ura	Sauvojen vaiheet		Purkaustasot			Purkaustasot (µV)		
Liitin n:o	U kV	n:o			Liukur. dB	Keskellä dB	Turbiini dB	Liukur.	Keskellä	Turbiini
W	6	27	W	V	31	24	28	15,0	6,3	10,0
		28	W	V	31	24	28	14,0	6,0	9,6
		29	W	V	31	23	28	14,6	5,8	9,6
		30	W	V	28	23	26	9,7	5,9	8,2
		31	W	W	32	26	29	16,7	7,8	11,0
		32	W	W	31	29	34	13,5	11,5	20,0
		33	W1	W	40	41	39	41,6	43,5	35,2
		34	U	W	29	34	31	11,3	19,5	15,0
		35	U	W	28	28	27	10,6	9,8	8,5
		36	U	W	32	23	27	15,3	5,6	9,2
		37	U	W	30	28	30	12,7	10,2	13,0
		6	W	V	30	22	30	12,5	4,8	12,8
		7	W	V	35	28	31	21,4	10,2	14,2
		8	W	V	33	30	34	17,4	12,5	20,0
		9	W	V	31	27	25	13,6	9,3	6,8
		10	W	W	31	27	26	13,4	8,6	7,6
		11	W	W	29	25	28	11,8	7,3	9,9
		12	W2	W	32	30	31	16,1	13,3	14,6
13	U	W	31	26	28	13,5	8,1	10,4		
14	U	W	30	26	27	12,8	7,8	9,1		
15	U	W	28	26	27	10,2	8,1	9,2		
16	U	W	30	29	30	12,7	11,0	12,2		
Huomioita			Keskiarvo		31,0	27,2	29,2			
			Maksimi		40,3	40,7	38,9			

Ura 12 mitattu myös vetämällä keskeltä NDE-päähän. Maksimi 15 uV mitattu noin 5-6 solaa NDE:stä.  
Ura 13 mitattu myös vetämällä keskeltä NDE-päähän. Maksimi 10 uV mitattu levypaketin lopusta NDE.

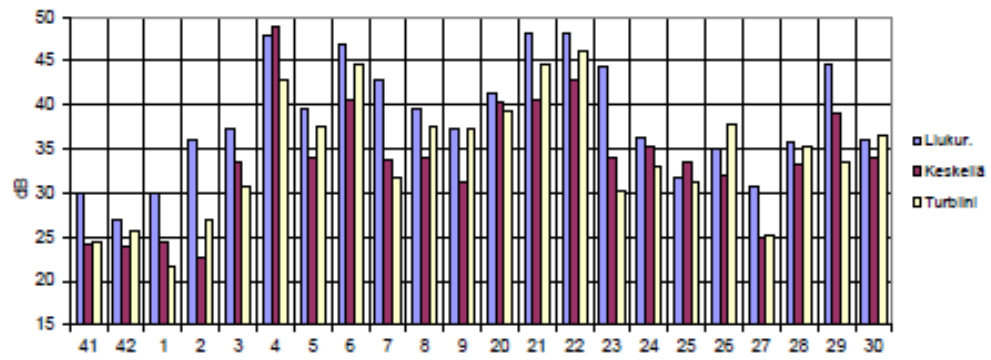


## HOHTOPURKAUSTASOJEN VAIHEKOHTAISET KUVAAJAT

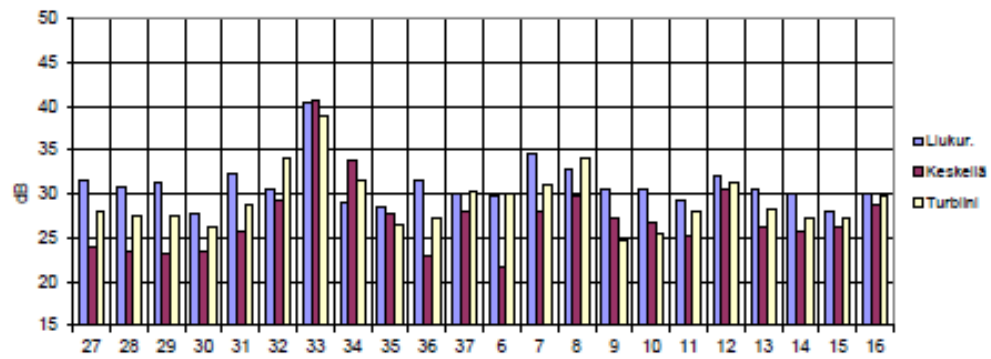
## Vaihe U



## Vaihe V



## Vaihe W



Ura

Liite 2. Optimaalisen rakenteen selvitys kalibrointipulsseilla (salassa pidettävä)

Liite 3. Anturien vertailumittaukset osittaispurkauksilla (salassa pidettävä)