

Joonapekka Hälvä

# Sähkömoottorin ilmavälin mittaamisen kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

31.5.2013

## Alkulause

Tämä insinöörityö on tehty ABB Oy:n Pitäjänmäen konetehtaan Induktiokoneet-  
tulosyksikölle. Haluan kiittää työni ohjaajaa, tuotannonkehitysinsinööriä Pekka Hentoa  
sekä valvojaani, Kai Lindgreniä hyvistä neuvoista ja rakentavasta palautteesta työni  
edetessä.

Lisäksi haluan kiittää ABB Oy:n työntekijöitä mukavasta työilmapiiristä sekä työni ete-  
nemisessä auttanutta tuotannonkehityspäällikköä Pasi Poutasta.

Helsingissä 31.5.2013

Joonapekka Hälvä

Tekijä Otsikko	Joonapekka Hälvä Sähkömoottorin ilmavälin mittaamisen kehittäminen
Sivumäärä Aika	37 sivua + 8 liitettä 31.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	tuotannonkehitysinsinööri Pekka Hento lehtori Kai Lindgren
<p>Tämä insinöörityö tehtiin ABB:n Pitäjänmäen konetehtaan Induktiokoneet-tulosyksikölle. Työssä oli tavoitteena löytää uusi työkalu sähkömoottorin ilmavälin mittaamiseen. Työ käsittelee moduulikoneiden (AMI 400-500, AMI 560-630) ja valurautarunkoisten koneiden (HXR 355-560) tuotantolinjat. Tarpeelliseksi työn tekivät sähkömoottoreissa esiintyvät laatuongelmat, jotka johtuvat mm. ilmavälin epätarkasta mittaamisesta.</p> <p>Työssä haluttiin etsiä mahdollisimman yksinkertainen, nopea ja tarkka mittaustapa vaikeassa paikassa sijaitsevan ilmavälin mittaamiseen. Ilmavälin mittaamisen pitää tapahtua koneen kokoonpanovaiheessa.</p> <p>Tavoitteena oli löytää mahdollisimman monta ratkaisua sähkömoottorin ilmavälin tarkempaan mittaamiseen. Työssä kyseltiin mittausalan yrityksiltä erilaisia ratkaisumalleja ja heidän mahdollisia ideoita ilmavälin mittaamiseen.</p> <p>Työn tuloksena saatiin kartoitettua eri mittausmenetelmiä ilmavälin mittaamiseen sekä luotua yrityskontakteja mittausalan yrityksiin. Yhteyksien avulla ABB:lle voidaan lähteä kehittämään tulevaisuudessa erilaisia mittausmenetelmiä ja ratkaisuja ilmavälin mittaamiseen sähkömoottorissa.</p>	
Avainsanat	ilmaväli, staattori, roottori, epäkeskisyys

Author Title	Joonapekka Hälvä Development of Air Gap Measurement in an Electric Motor
Number of Pages Date	37 pages + 8 appendices 31 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Pekka Hento, Product Development Engineer Kai Lindgren, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was carried out for ABB, Pitäjänmäki machine factory. The objective of this thesis was to find a new tool for the air gap measurement in an electrical motor. This thesis deals with the production lines of module machines (AMI 400-500, AMI 560-630) and standard machines (HXR 355-560). This graduate study was necessary because of the occurring quality problems for electrical motors, which arise from inaccurate measurement of the air gap.</p> <p>The aim of this project was to search for a simple, fast and an exact way to measure the air gap in a difficultly located place. The air gap measuring is organized during the assembly of the motor.</p> <p>The goal was to find different solutions to measure the air gap more precisely in an electrical motor. Some companies were asked about different solutions and their potential ideas for the air gap measurement.</p> <p>As a result, many different solutions were determined in the process and new connections were created with companies. These companies can be contacted by ABB in the future, if they discover a new measurement method and a solution for the measurement of the air gap in an electrical motor.</p>	
Keywords	air gap, stator, rotor, eccentricity

## Sisällys

Alkulause

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja määritelmät

1	Johdanto	1
2	ABB Oy	2
3	Sähkömoottori	3
3.1	Sähkömoottorin rakenne	3
3.2	Sähkömoottorin toiminta	5
4	Ilmaväli	6
4.1	Ilmaväli sähkömoottorissa	6
4.2	Ilmaväli eri konetyypeissä	7
4.3	Ilmavälin mittaaminen	7
4.3.1	Ilmavälin mittaustekniikka	7
4.3.2	Ilmavälin mittaamisen epätarkkuus	10
4.3.3	Mittauksen toleranssit	11
5	Roottorin epäkeskisyys	12
5.1	Epäkeskisyyden luonne	12
5.2	Epäkeskisyyden syyt	13
5.2.1	Staattinen epäkeskisyys	13
5.2.2	Dynaaminen epäkeskisyys	13
5.3	Epäkeskisyyden seuraukset	14
5.4	Epäkeskisyyden korjaaminen	14
5.5	Epäkeskisyys eri konetyypeissä ABB:ssä	15
6	Magneettivoima	16
6.1	Tasaisen ilmavälin magneettivoima	16
6.2	Toispuoleisen ilmavälin magneettivoima	16

7	Magneettivoiman vaikutus koneen käyttäytymiseen	17
7.1	Magneettinen rasitus roottorissa	17
7.2	Kriittinen kierrosluku	17
7.3	Tärinä ja ääni	18
7.4	Unipolaarivuo ja laakerijännitteet	19
8	Ideaalityökalu ilmapälin mittaamiseen	20
8.1	Ilmapälin mittaamiseen vaikuttavat mitat	20
8.2	Teoreettiset mittaustyökalut	20
8.2.1	Laser-mittaus	20
8.2.2	Venymäliuskapaineanturi	21
8.2.3	Sähköinen rakotulkki	23
8.2.4	Ilmapälianturi	25
8.2.5	Endoskooppi	26
9	Mittausalan yritysten vierailut	29
9.1	Kyselyt mittausalan yrityksille	29
9.2	Mittausalan yritysten vierailut ABB:ssä	29
10	Lopputulos ja jatkokehitys	33
11	Yhteenveto	34
	Lähteet	35

## Liitteet

Liite 1: Napaluvun ja akselikorkeuden vaikutus ilmapälin suuruuteen ABB:ssä (Salattu)

Liite 2: Koneen tahtinopeudet eri napamäärillä ja taajuuksilla (Salattu)

Liite 3: Ilmapälimittauksen toleranssit ABB:ssä (Salattu)

Liite 4: Epäkeskisyyden eri konetyypeissä ABB:ssä (Salattu)

Liite 5: Ilmapälin mittaamiseen vaikuttavat mitat ABB:ssä (Salattu)

Liite 6. Puolijäykkä GPD-4F-A-350-XX -mittauspää

Liite 7. Kontaktivälin jäykkä GPD-5D-A-500-XX -mittauspää

Liite 8. Ilmapälianturin fyysiset mitat

## Lyhenteet ja määritelmät

ABB	Asea Brown Boweri
AMI 400-500	moduulikoneen tuotenimi; akselikorkeus 400 mm - 500 mm
AMI 560-630	moduulikoneen tuotenimi; akselikorkeus 560 mm - 630 mm
dB (A)	Melumittauksissa käytetään yleensä eri taajuuksia eri tavoin painottavia suodatuksia; painotuksella pyritään kuvaamaan tarkemmin äänen vaikutusta ihmiseen; yleisin on ns. A-suodatin, jolloin melutason mittaukseen käytetään merkintää dB (A)
D-pää	Drive End; tavallisesti moottorin käyttöpää
$f_n$	Frequency; verkkotaajuus; jaksoluku aikayksikössä
HXR 355-560	valurautarunkoisen koneen tuotenimi; akselikorkeus 355 mm - 560 mm
Hyötysuhde	Mekaanisen lähtötehon ja sähköisen syöttötehon suhde; ilmaisee, miten tehokkaasti moottori muuntaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi
Ilmaväli	staattorin ja roottorin välinen ilmarako; mahdollistaa roottorin pyörimisen staattorissa
kWp	Kilowatts-Peak; tuotetun tehon huippuarvo kilowatteina
Laakeri	komponentti; käytetään vähentämään kitkaa ja kulumista pyörivien osien välillä
N-pää	Non-drive End; tavallisesti moottorin käyttöpään vastainen pää

$n_s$	Moottorin tahtinopeus eli kierrostaajuus; ilmoittaa, montako kierrosta kiertokenttä pyörähtää ympäri minuutissa
p	napapariluku; staattorin käämin napaparien määrä
Roottori	sähkökoneen sisempi osa; pyörii staattorin sisällä; pyörijä
rpm	Revolutions Per Minute; kierrosnopeuden yksikkö; kierrosta minuutissa
Staattori	sähkökoneen ulompi osa; pysyy paikallaan roottorin pyöriessä; seisija
Tahtinopeus	Vaihtovirtainduktiomoottorin pyörivän magneettikentän nopeus; määräytyy taajuuden ja staattorin käämityksen magneettisten napojen lukumäärän mukaan
Toleranssi	mittauksessa hyväksytyt epätarkkuus; määrää kappaleelle sallitut tosimitat nimellismittaan nähden
UMP	Unbalanced Magnetic Pull; magneettisten voimien epätasapaino
VT-lomake	moottorin valmistustietolomake
$\varepsilon$	suhteellisen epäkeskisyyden arvo



## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena on etsiä uusi ja tarkempi mittaustyökalu induktiokoneiden ilmavälin mittaamiseen. Tutkimuksessa keskitytään ainoastaan epätahtimoottoreiden ilmavälin mittaamiseen ja sen kehittämiseen. Työssä ei oteta kantaa tahtikoneiden tuotantolinjaan vaan tarkastellaan ainoastaan epätahtikoneiden kolmea tuotantolinjaa. Tutkimuksessa keskitytään AMI 400-500, AMI 560-630 ja HXR 355-560 konetyypin tuotantolinjoihin.

Tämänhetkinen mittaustapa ja -työkalu ovat hyvin epätarkkoja, mikä johtaa epätarkkoihin tuloksiin moottorin kokoonpanovaiheessa. Tuloksien pohjalta on vaikea tehdä päätöksiä laatuongelmien suhteen.

Tutkimus selvittää vaihtoehtoja, joilla ilmavälin mitta saataisiin mitattua tarkemmin sähkömoottorista. Työssä selvitetään myös vanhan mittaustavan heikkoudet ja tutkitaan, mitä seurauksia roottorin epäkeskisyydellä on koneen suorituskyvylle.

ABB Oy:ssä on myös aikaisemmin tutkittu ilmavälin mittaamisen kehittämistä. Projekteissa on pohdittu uusia mahdollisia mittaustyövälineitä ilmavälin mittaamiseen, mutta toimivia ratkaisuja ei ole ideoista huolimatta löydetty. Mahdolliset ratkaisut ovat epäonnistuneet tavalla tai toisella, koska niitä ei ole saatu käytäntöön.

## 2 ABB Oy

ABB Oy (Asea Brown Boveri) on johtava sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, jonka tuotteet, järjestelmät ja palvelut parantavat teollisuus- ja energiayhtiöasiakkaiden kilpailukykyä ympäristömyönteisesti. ABB:n palveluksessa työskentelee yli 145,000 henkilöä noin 100 eri maassa.

Suomessa ABB:llä on sähkö- ja automaatioteknologioissa kattava erikoisosaaminen, jota on rakennettu 122 vuoden ajan lähellä asiakkaita ja ympäröivää yhteiskuntaa. ABB Oy:n liikevaihto on 2,4 miljardia euroa ja henkilöstön määrä noin 6600.

Tuulivoimatuotannossa ABB Oy keskittyy komponenttien valmistukseen, tuulivoimaloiden sähköistykseen sekä sähkösiirron komponenttien ja järjestelmien tuotantoon. ABB Oy myös huoltaa tuulivoimaloita ja sähkönsiirtoverkon komponentteja ja järjestelmiä.

Aurinkoenergiatuotannossa ABB Oy tarjoaa tuotteita, jotka sopivat niin pieniin asuinrakennuksiin kuin myös suuriin voimaloihin. ABB Oy tarjoaa myös tuotteita ja ratkaisuja aurinkoenergiamoduulien ja aurinkokennojen valmistukseen sekä järjestelmien keski-jännite- ja suurjänniteverkkoihin liittämiseen. Helsingin taajuusmuuttajatehtaan katolta löytyykin Pohjoismaiden suurin, 181 kilowatin (kWp), valtakunnan verkkoon kytketty aurinkoenergiajärjestelmä.

### 3 Sähkömoottori

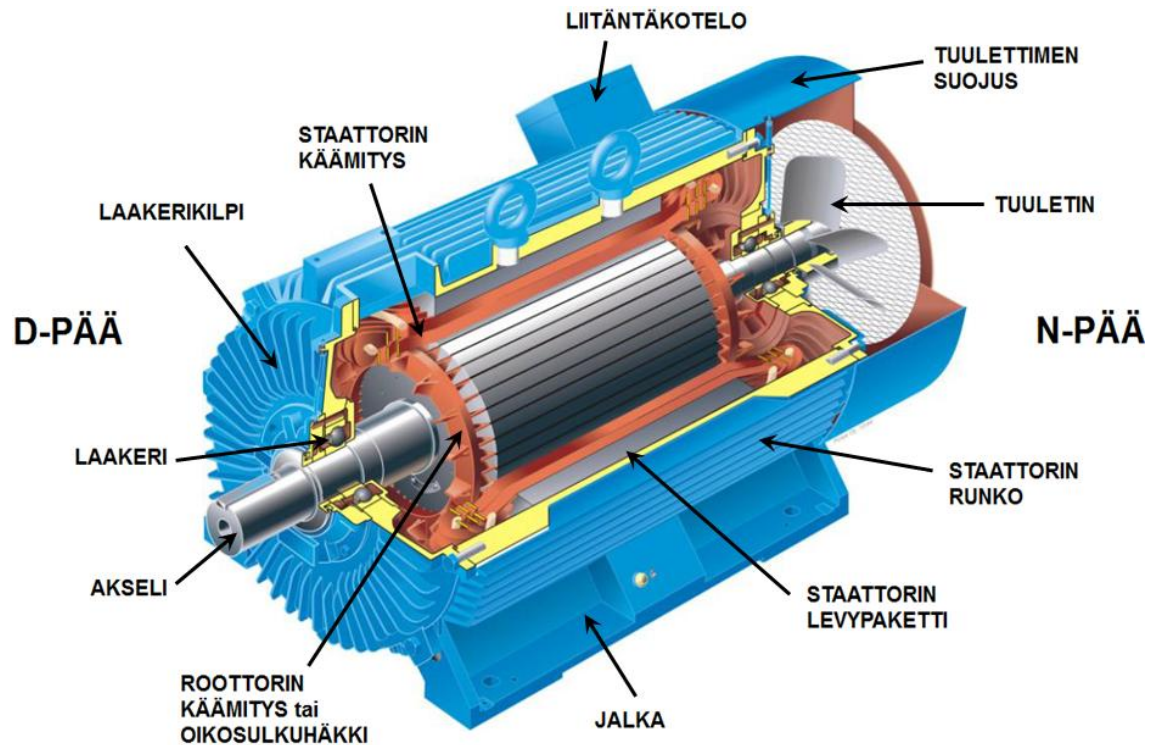
Sähkömoottorin toiminta perustuu siihen, että sähköistä energiaa muutetaan mekaaniseksi energiaksi (moottori) tai päinvastoin (generaattori). Sähkömoottoreita on useaa eri tyyppiä, joista epätahti- ja tahtikoneet ovat yleisimmin esiintyviä konetyyppejä. Niiden toiminta perustuu koneen sisällä pyörivään magneettikenttään. Tahtikoneessa koneen pyörivä osa pyörii magneettikentän kanssa samalla nopeudella, ja epätahtikoneessa eri nopeudella. Epätahtikoneista oikosulkumoottori on yleisin teollisuudessa käytetty moottorityyppi, sillä se on rakenteeltaan suhteellisen yksinkertainen ja kestävä sekä käyttökohteiltaan monipuolinen. Taajuusmuuttajat ovat tehneet oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden säädettävyyden helpoksi ja monipuoliseksi eri tarkoituksiin. [1.]

#### 3.1 Sähkömoottorin rakenne

Kolmivaiheisten epätahtimoottoreiden seisojat eli staattorit ovat rakenteeltaan samantaisia, mutta pyörijät eli roottorit voivat olla rakenteeltaan erilaisia. Eniten käytetty roottorirakenne on oikosulkuroottori, jolloin moottori on oikosulkumoottori. Harvemmin käytetty rakenne on liukurengasroottori, jolloin moottori on liukurengasmoottori.

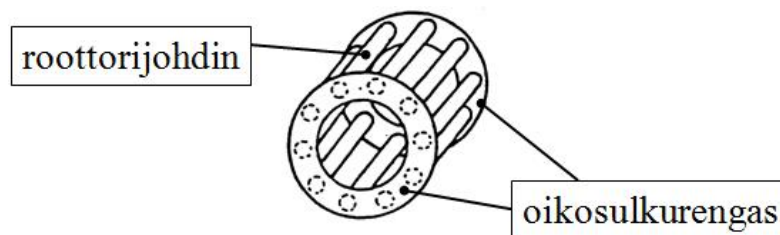
Vaikka sähkömoottoreita on useaa eri tyyppiä erilaisilla ominaisuuksilla ja asetuksilla, voidaan kaikista tavallisista moottoreista silti erottaa seuraava perusrakenne. Koneen roottori ja siinä oleva akseli ovat laakereiden varassa staattorin roottoriaukossa. Roottorin ja staattorin väliin jää pieni ilmapäli, joka mahdollistaa roottorin pyörimisen vapaasti staattorissa. Koneen laakerit, jotka voivat olla eri tapauksissa rulla-, kuula- tai liukulaakereita kiinnitetään koneen laakerikilpiin, jotka kannattelevat roottoria staattoriaukossa. Laakerikilvet ovat lopuksi kiinni staattorissa, joka näin muodostaa koneen rungon. Koneiden päälle asennetaan yleensä myös liitäntäkotelon, johon koneen syöttökaapeli kytketään. Moottori voidaan kytkeä liitäntäkotelossa joko Y- tai D-kytkentään syöttökaapelin jännitteestä riippuen, kunhan pidetään huoli siitä, että moottorin vaihekäämiin vaikuttaa se jännite, jolle käämi on mitoitettu. [2.]

Yleensä sähkömoottorit ovat kuvan 1 (ks. seur. s.) tapaan vaippajähdytteisiä, yhdellä ulkopuolisella tuulettimella varustettuja moottoreita. Niiden tuuletin on joko sitkeää muovia tai kevytmetallivalua, joka on suojattu peltisellä tuuletinsuojuksella. [3.]



Kuva 1. Oikosulkumoottorin rakenne [4.]

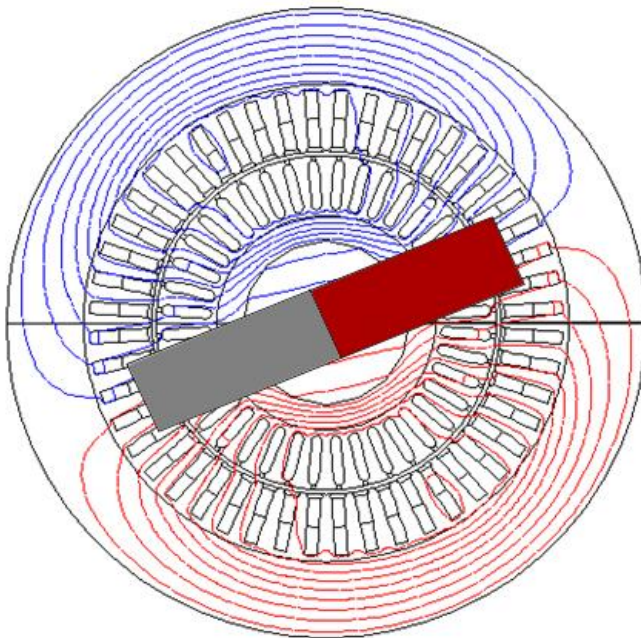
Staattoriin ja roottoriin asennetaan käämitykset, joiden rakenne ja muotoilu vaihtelevat eri konetyypin ja käyttötarkoituksen mukaan. Epätahtimoottorin roottorikäädityksen vaiheluvun ei tarvitse olla sama kuin staattorikäädityksen vaiheluku, mutta roottorikäädityksen on kehitettävä virrallisena yhtä moninapainen magneettikenttä kuin staattorikäädityksenkin. Epätahtimoottorin roottori on käämittävä siis samalle magneettikentän napaluvulle kuin moottorin staattorikin. Oikosulkumoottorin roottorikääditys on ns. häkkikääditys, joka on tehty eristämättömistä sauvoista, jotka on sijoitettu roottorin uriin ja suljettu molemmista päistä oikosulkurenkailla. Kääditys on joko alumiinista painevalumenetelmällä valettu tai tehty kuparisauvoista, jotka on juotettu kiinni oikosulkurenkaisiin. Staattori- ja roottorikäädityksien avulla koneen ilmaväliin saadaan muodostettua magneettikenttä, joka saa roottorin pyörimään staattorissa (kuva 2). [1; 3.]



Kuva 2. Roottorikääditys [5.]

### 3.2 Sähkömoottorin toiminta

Yhteistä kaikkien sähkömoottoreiden toiminnalle on se, että moottorin ilmaväliin luodaan kelalle käärittyjen johtimien eli käämien avulla magneettikenttä, jolla on parillinen napaluku (esim. 2p). Yksi pohjois- (N) ja yksi etelänapa (S) muodostavat yhden napaparin, jonka napapariluku  $p = 1$ . Staattorin ja roottorin urien käämeissä kulkevat sähkövirrat saavat aikaan magneettikentän voimakkuuden, joka pyrkii liikuttamaan staattori- ja roottorikäämejä toisiinsa nähden. Staattorin ollessa rakenteellisesti kiinni koneen rungossa lähtee roottori pyörimään, kun sähkökentän napaisuutta vaihdellaan sopivalla taajuudella. Moottori kiihtyy ja jää lopulta pyörimään vähän magneettikentän nopeutta pienemmällä nopeudella. (Kuva 3.)



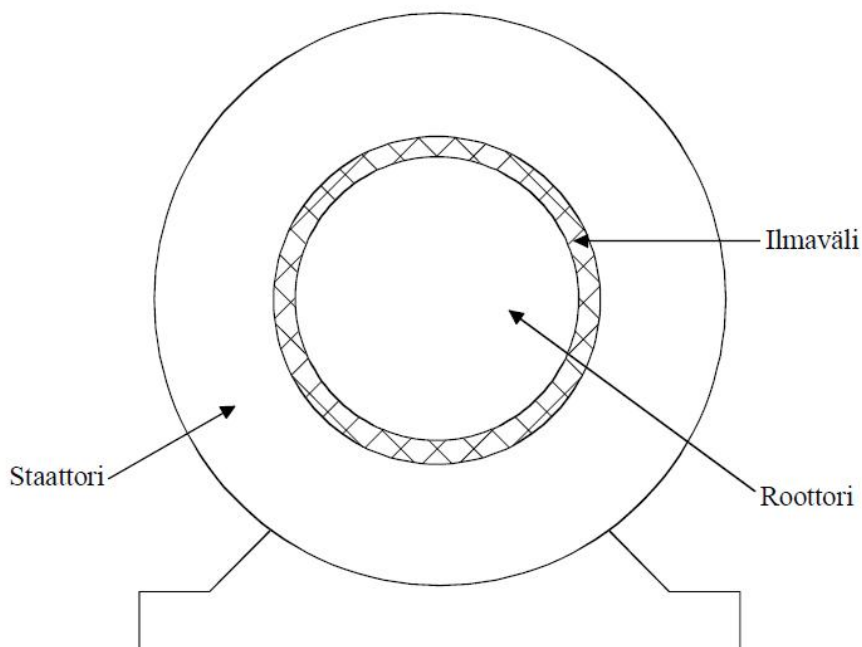
Kuva 3. Kaksinapaiseen moottoriin syntyvät magneettikentän vuoaallot [5.]

## 4 Ilmaväli

### 4.1 Ilmaväli sähkömoottorissa

Ilmavälillä tarkoitetaan staattorin ja roottorin välistä ilmarakoa, joka mahdollistaa roottorin pyörimisen staattorissa (kuva 4). Induktiokoneen roottorin magnetoituessa staattorilta, pyritään ilmaväli tekemään mahdollisimman pieneksi ilmaväliin muodostuvan magneettikentän takia, sillä raudan ferromagneettisuus eli magneettinen sähkönjohtokyky on parempi kuin ilman. Moottorin hyötysuhde on näin sitä parempi, mitä lähempänä staattori ja roottori ovat toisiaan. Pyörivissä koneissa pitää mekaanisista syistä ilmavälin olla vähintään 0,2 mm, mutta sen on oltava sitä suurempi, mitä suurempi on moottorin ilmaväliahkaisija, mitä pitempi on staattorin levypaketti ja mitä suurempi on roottorin kehänopeus. [6.]

Pienen napaluvun omaavissa koneissa ilmaväli on usein suurin korkean pyörimisnopeuden takia. Liian suuri ilmaväli kuitenkin huonontaisi hyötysuhdetta ja kasvattaisi myös mahdollisesti loistehon määrää, joten ilmavälit pyritään pitämään mahdollisimman pieninä.



Kuva 4. Ilmaväli sijaitsee staattorin ja roottorin välissä [7.]

## 4.2 Ilmaväli eri konetyypeissä

Ilmavälin suuruus sähkömoottoreissa vaihtelee eri konetyyppien ja suoritusarvojen perusteella. Moottorin napaluku ja runkokorkeus eli moottorin akselikorkeus ovat yhdet tekijät, jotka vaikuttavat ilmavälin suuruuteen. Taulukosta 1 (ks. liite 1) voidaan havaita, kuinka napaluku ja runkokorkeus vaikuttavat ilmavälin suuruuteen eri konetyypeissä. Taulukkoon 1 on listattu moduulikoneet eli AMI 400-500 ja AMI 560-630 sekä valurautarunkoiset koneet HXR 355-560 akselikorkeuksien mukaan. Taulukon 1 ilmavälimitat esitetään millimetreinä.

Suurempinapaisten koneiden pyörimisnopeus on pienempi, sillä moottorin tahtinopeus  $n$  on riippuvainen staattorin käämin napojen määrästä ja päätaajuudesta:

$$n_s = \frac{2 * f_n * 60}{p}, \quad (1)$$

missä  $f_n$  on verkkotaajuus ja  $p$  on napojen määrä. [8, s.9.]

Taulukossa 2 (ks. liite 2) esitetään moottoreiden yleisimmät tahtinopeudet, joihin vaikuttaa napaluvun suuruuden ohella verkkotaajuuden suuruus. Arvoista nähdään, kuinka paljon koneen napaluku vaikuttaa koneen pyörimisnopeuteen.

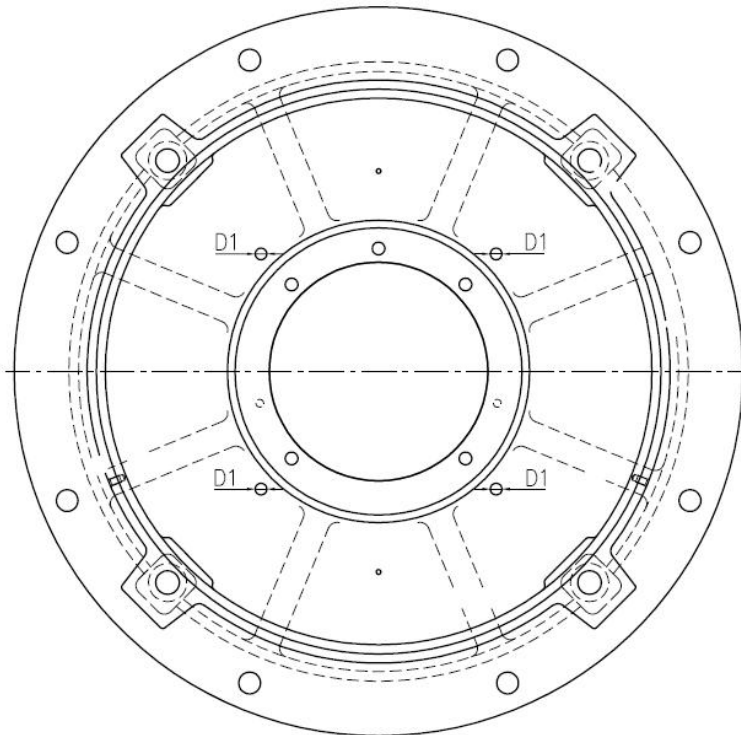
## 4.3 Ilmavälin mittaaminen

Sähkömoottoreiden ilmavälin mittaaminen suoritetaan tehtaalla aina koneen kokoonpanovaiheessa. Ilmavälin mittauksella pyritään tarkistamaan, että koneen roottori on keskeinen staattoriin nähden eli roottori on staattorin keskellä. Jos roottori on epäkeskeinen staattoriin nähden, se muun muassa huonontaa koneen käyntiarvoja ja rasittaa laakereita. Roottorin epäkeskisyyteen ja sen seurauksiin palataan kappaleissa 5-7.

### 4.3.1 Ilmavälin mittaustekniikka

Ilmavälin mittaustekniikka on jokaisella kolmella epätahtikoneiden tuotantolinjalla samanlainen. Ilmavälin mittaus suoritetaan koneen päädyistä 0,1 mm:n välein olevilla ilmavälitulkeilla laakerinkilven neljästä mittausräystästä. Reiät on sijoitettu laakerikilpeen

siten, että kaksi niistä on akselin yläpuolella ja kaksi alapuolella. Ilmaväli saadaan näin mitattua tasaisesti joka puolelta staattoria. Laakerikilvet ja niiden ilmavälin mittausreiät ovat halkaisijaltaan erikokoisia eri konetyypeissä. HXR-koneilla laakerikilvissä olevat mittausreiät ovat halkaisijaltaan 14 mm, kun sen sijaan AMI 400-500- ja AMI 560-630 -koneilla laakerikilpien mittausreiät ovat halkaisijaltaan 23,5 mm. Kuvassa 5 esitetään HXR-koneen D-pään laakerikilvessä sijaitsevat ilmavälin mittausreiät. [9.]



Kuva 5. HXR-koneen D-pään laakerikilpi; ilmavälin mittausreiät on merkitty kuvaan D1:llä [10.]

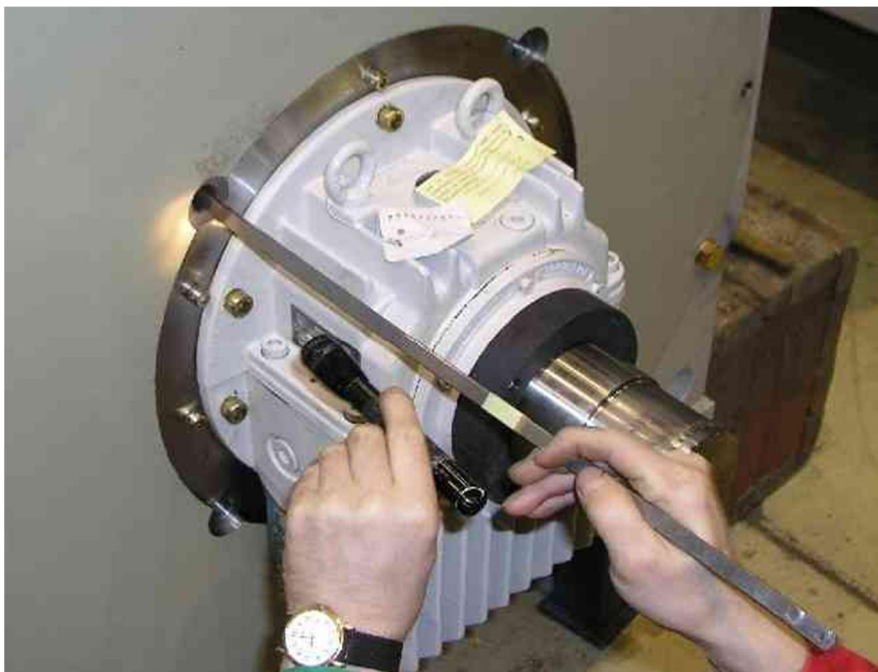
Ilmavälin mittaaminen suoritetaan ensisijaisesti joko koneen D- tai N-päästä konetyypistä riippuen. HXR-koneilla ilmavälin mittaaminen suoritetaan aina koneen D-päästä, minkä lisäksi mittaus voidaan suorittaa myös koneen N-päästä. Moduulikoneiden ilmavälin mittaaminen suoritetaan sitä vastoin aina koneen N-päästä, jonka lisäksi ilmavälit voidaan myös mitata koneen D-päästä. Ilmavälimittauksessa saadut tulokset merkitään kokoonpanon tarkastuspöytäkirjaan, jonka lisäksi tulokset voidaan merkitä myös laakerikilpiin. [11; 12.]





Kuva 6. Ilmavälitulkki on yli metrin pituinen tarkkuushiottu rakotulkki

Mittausta tehtäessä ilmavälitulkki työnnetään moottorin laakerikilven rei'istä roottorin ja staattorin välissä olevaan ilmaväliin. Ilmavälin mittaaminen suoritetaan jokaisessa moottorissa aina staattorin levypaketin eli rautalevyjen kohdalta, eikä staattoripaketin urassa olevan vyyhden urakiilan kohdalta. Urakiila voi olla hieman sisempänä tai ulompana kuin paketin sisäreuna, jolloin mitattu ilmavälimitta on virheellinen. Mittaaminen suoritetaan staattorin ensimmäisen osapaketin pituudelta eli n. 5 cm:n pituiselta matkalta. (Kuva 7.) [9.]



Kuva 7. Sähkömoottorin ilmavälin mittaustapa [11.]

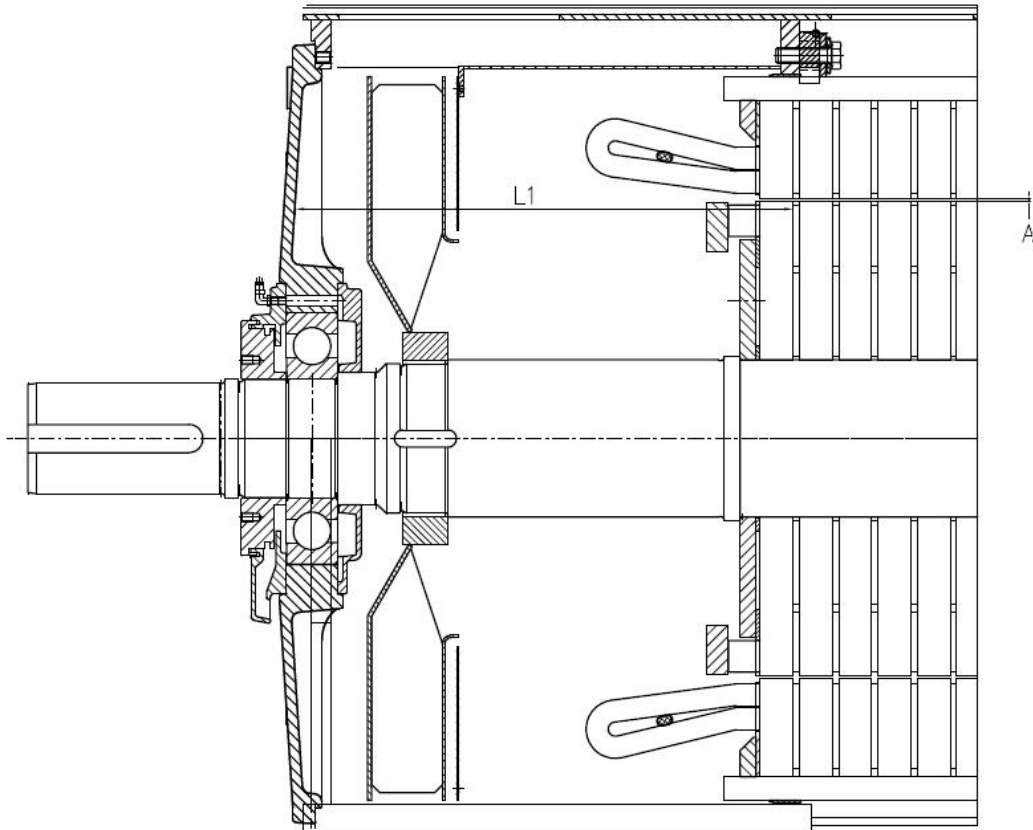
Ilmavälejä ei aina pystytä mittaamaan moottorin molemmista päistä, jolloin mittaaminen joudutaan suorittamaan vain koneen toisesta päästä. Lisäksi on myös tapauksia, jolloin ilmavälejä ei ole voitu mitata koneesta ollenkaan. Eräissä HXR-koneissa on yksinkertaisesti niin paljon syöttökaapeleita, että ilmaväliä ei mahduta mittaamaan ilmavälitulkillä. Tällaisissa tapauksissa ilmavälin tasaisuus ja koneen toiminta todetaan koestuksessa koestusarvojen perusteella.

#### 4.3.2 Ilmavälin mittaamisen epätarkkuus

Ilmavälin mittaamiseen vaikuttaa monta eri asiaa; mm. ilmavälitulkki, mittauksen tekijä, mittauksessa käytetty voima ja huono näkyvyys koneen sisälle. Suurin epätarkkuudellinen tekijä on ilmavälimittauksen suorittaja, sillä ilmavälin mittaustulokset ovat hyvin paljon kiinni mittauksen tekijästä. Jokainen yksittäinen mittaaja voi saada eri mittaustulokset aikaan, sillä ainoastaan mittaustuntuma määrittelee oikean ilmavälitulkin ja saadun mittaustuloksen.

Mittausta tehtäessä ilmavälitulkin tulokulma staattoripakettiin ei saa olla vino, vaan sen tulee olla suorassa linjassa staattoripakettiin nähden. Tämä yhdistettynä ilmavälin vaikeaan sijaintiin tuovat haastetta mittauksen suorittamiseen. Lisäksi mittaajan käyttämä voima mittausta tehtäessä vaikuttaa saatuun tulokseen, sillä toinen henkilö voi saada asetettua ilmaväliin 0,1 mm paksumman ilmavälitulkin kuin toinen. Ei voida sanoa tarkkaan kuinka tiukka ilmavälitulkin pitäisi olla ilmavälissä mittausta tehtäessä, joten kahden tuloksen väliltä voidaan valita tulos mielen mukaan. Tämä aiheuttaa heittoja moottorin ilmavälien mittaustuloksissa. [13.]

Ilmavälin mittaamisen vaikeus riippuu myös paljon staattoripaketin pituudesta runkoon nähden, sillä paketti voi olla hyvin lyhyt rungon koon ollessa vakio. Silloin paketin ja laakerikilven etäisyys kasvaa hyvin pitkäksi, jolloin ilmavälitulkkia joudutaan työntämään pitkä matka ennen staattoripaketin reunaa (kuva 8, ks. seur. s.). Tämä on huomattavasti vaikeampaa, kuin pitkän paketin omaavissa koneissa, joissa laakerikilpi on lähellä pakettia. Kyseistä ongelmaa esiintyy eniten suurissa AMI-moottoreissa eli AMI 560-630 -koneissa, joiden runkokoot ovat suurempia verrattuna AMI 400-500 -tuotantolinjan koneisiin. [13.]



Kuva 8. Laakerikilven etäisyys L1 staattoripakettiin ja ilmväliin A vaihtelee koneittain [10.]

Ilmavälin vaikea sijainti haastavassa paikassa lisää myös ilmavälin mittaamisen epätarkkuutta. Jos ympäristöstä ei saada tarpeeksi valoa mittausta tehtäessä, niin mittauksen suorittaja joutuu itse valaisemaan ilmaväliä, esimerkiksi taskulampulla (kuva 7, ks. s. 9) laakerikilven reikien kautta.

Kaikki edellä mainitut tekijät vaikuttavat mittaamisen tarkkuuteen. Suuri epätarkkuus mittauksia tehtäessä luo heikon pohjan koneen laadun suhteen, sillä ei voida olla varmoja siitä, johtuuko roottorin epäkeskisyys roottorin asennuksesta vai eri komponenttien valmistusvirheistä.

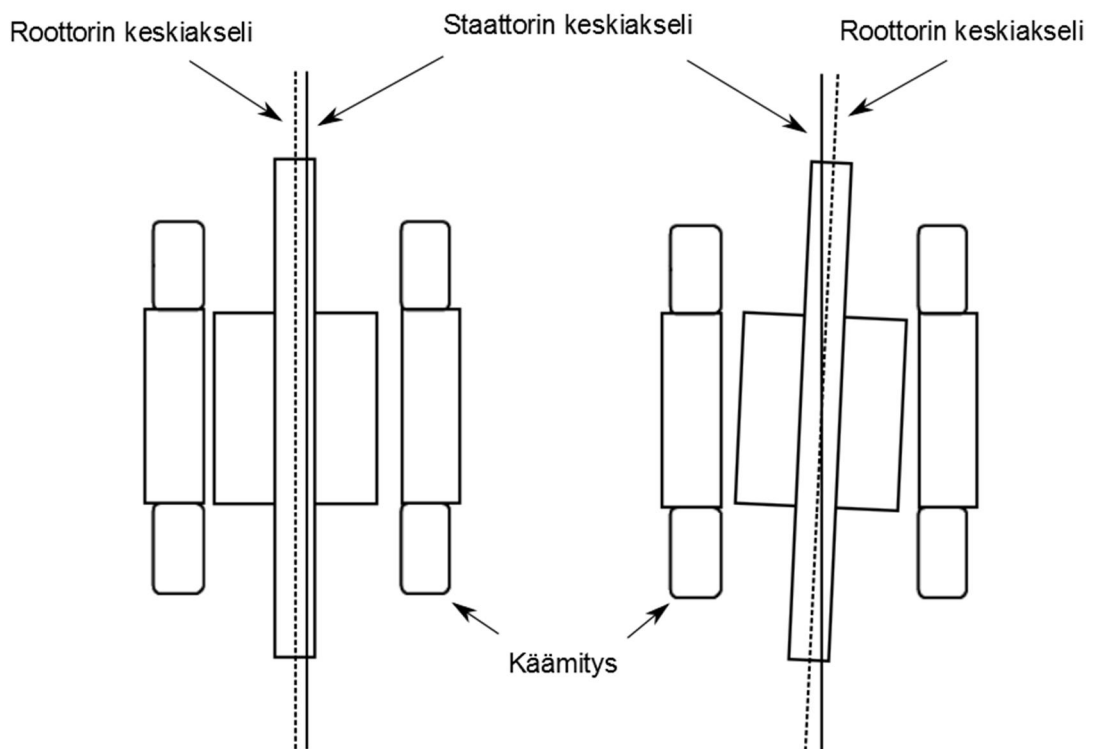
#### 4.3.3 Mittauksen toleranssit

Ilmavälin mittaustuloksia varten on kehitetty mittaustoleranssit, joiden mukaan toimitaan ilmavälien mittaustuloksien kanssa. Ilmavälimittauksen toleranssit esitetään liitteessä 3.

## 5 Roottorin epäkeskisyys

### 5.1 Epäkeskisyiden luonne

Sähkömoottorin roottori on yleensä enemmän tai vähemmän epäkeskinen staattoriauk-  
koon nähden, jolloin ilmväli ei ole tasainen staattorin jokaisessa kohdassa. Epäkeski-  
syyt voi olla luonteeltaan joko staattista tai dynaamista epäkeskisyttä. Staattisella  
epäkeskisytydellä tarkoitetaan tilannetta, missä roottori on oman akselinsa suhteen  
symmetrinen. Dynaamisella epäkeskisytydellä taas tarkoitetaan sitä tilannetta, kun roo-  
tori on oman akselinsa suhteen epäsymmetrinen. Tasa-aineisen roottorin dynaaminen  
epäkeskisyys tarkoittaa epäbalanssia, joka on korjattava tasapainottamalla. Staattinen  
ja dynaaminen epäkeskisyys ovat toisistaan riippumattomia eli ne voivat ilmetä ko-  
neessa mahdollisesti samanaikaisesti. (Kuva 9.) [14.]



Kuva 9. Epäkeskisyys voi olla joko staattista (vas.) tai dynaamista (oik.) [15.]

## 5.2 Epäkeskisyyden syyt

### 5.2.1 Staattinen epäkeskisyys

Staattista epäkeskisyyttä aiheuttavat muun muassa seuraavat asiat:

- 1) Roottorin paino, joka vaaka-akselisessa koneessa voi mahdollisesti painaa roottoria alaspäin aiheuttaen taipuman  $e_1$ .
- 2) Laakerivälitys, joka aiheuttaa roottorin asettumisen tiettyyn kohtaan. Tämä poikkeaa puolen laakerivälityksen  $e_2$  verran keskiasennosta.
- 3) Roottorin epäkeskinen asennus staattoriin nähden johtuu valmistustoleransseista ja mahdollisesti lisäksi koneistusvirheestä tai laakeripukkien asennusvirheestä, epäkeskisyys  $e_3$ .
- 4) Hihnakäytöissä hihnan kiristysvoima aiheuttaa akselin taipuman  $e_4$ . Myös virheellinen, kulunut tai virheellisesti asennettu kytky voi saada aikaan staattista epäkeskisyyttä.
- 5) Mainittujen syiden takia syntyvä epäkeskisyys saa aikaan toispuoleisen magneettivoiman, joka lisää kokonaistaipumaa määrällä  $e_5$ .

Staattinen epäkeskisyys on siten laskettava vektoreiksi ajateltujen komponenttiensa summan itseisarvona:

$$e = |\vec{e}_1 + \vec{e}_2 + \vec{e}_3 + \vec{e}_4 + \vec{e}_5| \quad (2)$$

### 5.2.2 Dynaaminen epäkeskisyys

Dynaamista epäkeskisyyttä aiheuttavat seuraavat tekijät:

- 1) Pyörimisakselin keskipiste ei lankea yhteen roottorin ulkopinnan määrittelemän keskipisteen kanssa, virhe  $e_{r1}$ . Tämä voi olla seurausta virheellisestä koneistuksesta tai akselin pysyvistä taipumisista. Jollei tämäntyyppistä virhettä ole tasapainotuksella korjattu, niin se merkitsee myös huomattavaa värinää.

- 2) Kytlyn välityksellä koneen akselille siirtyy pyörivä taivutusrasitus, joka saa aikaan vastaavan taipuman  $e_{r2}$ .
- 3) Roottorikäämityksen epäsymmetria saa aikaan pyörivän toispuoleisen magneettivoiman ja taipuman  $e_{r3}$ . Tällainen epäsymmetria aiheutuu esimerkiksi oikosulkumoottorin tankojen katkeamisessa.

Kuten staattisessa tapauksessa epäsymmetrian aiheuttama magneettinen voima puolestaan lisää epäkeskisyyttä vielä jonkin verran, mikä on otettava huomioon kokonaisepäkeskisyyttä laskettaessa. [14; 16.]

### 5.3 Epäkeskisyyden seuraukset

Staattisen epäkeskisyyden seurauksena syntyy toispuoleinen vakiosuuruinen magneettinen vetovoima sille puolelle sähkömoottoria, jossa ilmaväli on pienin. Tämä voima

- 1) kuormittaa laakereita ja akselia,
- 2) pienentää roottorin kriittistä pyörimisnopeutta ja
- 3) saattaa aiheuttaa muutostilojen aikana roottorin koskettamisen staattoriin etenkin oikosulkukoneissa, joissa ilmaväli on pieni.

Epäkeskisyyden seurauksena moottoriin muodostuu myös sähköinen epäsymmetria, jonka takia koneessa syntyvä värinä ja ääni kasvavat oleellisesti. Tämä voi mahdollisesti lisätä lisäväriöiden määrää sähkömoottorissa. Epäkeskisyyden lisäksi se kuluttaa ja rasittaa moottoria enemmän ja vähentää sen käyttöikää. [14.]

### 5.4 Epäkeskisyyden korjaaminen

Jos tehtaalla havaitaan moottorin kokoonpanovaiheessa suurta epäkeskisyyttä, joudutaan koneeseen tekemään korjauksia. Aluksi moottoriin pyritään tekemään pieniä muutoksia, esimerkiksi laakerikilpiä ja laakereita uudelleen asettelemalla. Mikäli laakereiden korjaus ei auta ja roottori on edelleen epäkeskinen staattoriin nähden, otetaan roottori

staattorista kokonaan pois ja asennetaan se uudelleen. Yleensä epäkeskisyys poistuu roottorin uudelleen asennuksen yhteydessä, mutta joskus sekään ei auta ja moottori joudutaan purkamaan osiin. Purkamisen jälkeen moottorin pääkomponentit tarkistetaan. Katsotaan että koneen staattori ei ole epäkeskinen, sillä paketin painuminen vinoon staattoripaketin valmistusvaiheessa on mahdollista. Paketti on siten soikea tai epäkeskinen ja saa aikaan moottorin epäkeskisyyden. Lisäksi tarkistetaan rungon epäkeskisyys sekä roottorin ja akselin kunto. Joskus roottori sorvataan ja tasapainotetaan uudelleen tarkistuksen yhteydessä. [17.]

## 5.5 Epäkeskisyys eri konetyypeissä ABB:ssä

Eri konetyyppien epäkeskisyydestä kerrotaan liitteessä 4.

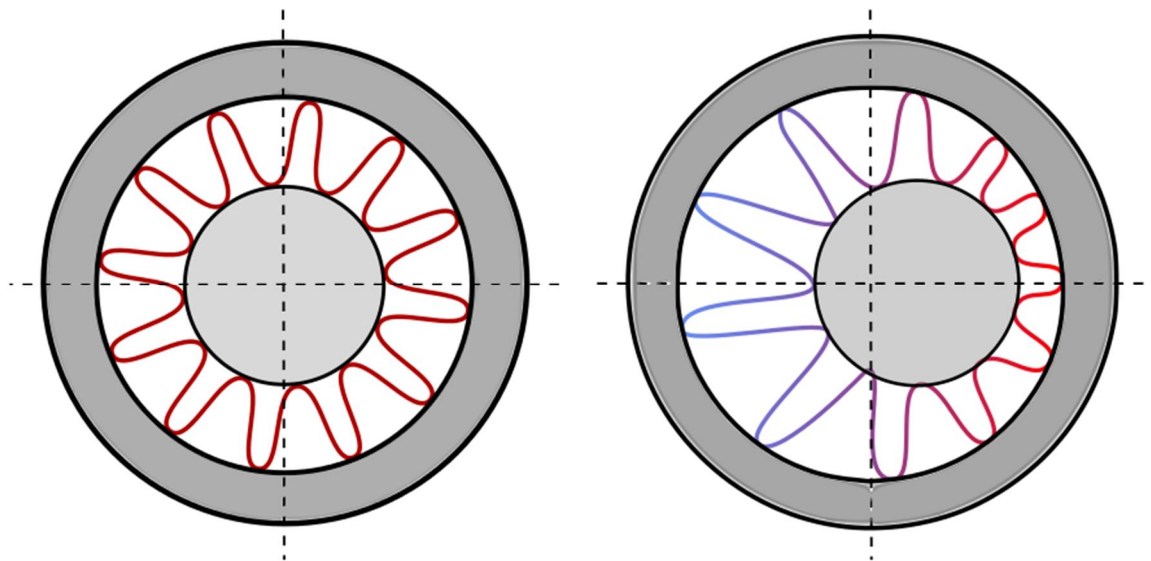
## 6 Magneettivoima

### 6.1 Tasaisen ilmavälin magneettivoima

Täysin symmetrisen ilmavälin tapauksessa staattorin ja roottorin välille syntyy tasainen magneettinen vetovoima, jolloin moottorissa vaikuttaa tasapaino. Moottorissa vaikuttava kokonaisvoima ei näin pyri vetämään roottoria puoleen tai toiseen, mutta se voi aiheuttaa muodonmuutoksia staattori- ja roottoripaketeissa (kuva 10).

### 6.2 Toispuoleisen ilmavälin magneettivoima

Toispuoleisen magneettivoiman tapauksessa roottori on staattoriin nähden epäkeskinen, jolloin pienimmän ilmavälin suuntaan syntyy suurempi magneettivoiman osa kuin muualle. Suuremman magneettivoiman seurauksena roottori pyrkii siirtymään vielä enemmän pienimmän ilmavälin suuntaan (kuva 10).



Kuva 10. Tasaisen ilmavälin (vas.) ja toispuoleisen ilmavälin (oik.) magneettivoimat



## 7 Magneettivoiman vaikutus koneen käyttäytymiseen

### 7.1 Magneettinen rasitus roottorissa

Monet tekijät aiheuttavat magneettista rasitusta koneen roottorissa. Roottorikäämityksessä kulkeva virta aiheuttaa sähkömagneettisen vuorovaikutuksen, joka pyrkii siirtämään käämitystä radiaalisessa suunnassa eli koneen akselin vastaisessa suunnassa. Oikosulkukoneessa oikosulkutangot pyrkivät värähtelemään koneen pyöriessä kaksinkertaisella roottorivirran taajuudella. Myös oikosulkumoottorin käynnistyksen yhteydessä roottorissa kulkevat suuret virrat pyrkivät saattamaan oikosulkutangot värähtelyliikkeeseen, jonka taajuus sitten pienenee jättämän pienetessä eli moottorin pyörimisnopeuden kasvaessa. Kyseiset tapaukset voivat aiheuttaa koneessa sauvojen väsymistä ja jopa niiden murtuman.

Roottoriin ilmavälin vastaisilla puolilla vaikuttavien magneettisten voimien epätasapaino (*unbalanced magnetic pull*, UMP) voi johtua siitä, että ilmavälin leveys ei ole täysin vakio koko staattorin ja roottorin kehän matkalla. Tämä voi olla seurausta esimerkiksi roottorin ja staattorin staattisesta tai dynaamisesta epäkeskisyydestä tai akseliin kohdistuvasta suuresta taivutusmomentista. Näiden lisäksi myös roottorin paino tai laakerin kuluma voi aiheuttaa kyseisen ongelman koneessa. UMP:tä aiheuttaa myös jänniteepäsymmetria. Oikosulkukoneissa UMP on yleensä suurimmillaan juuri käynnistyksen yhteydessä, koska silloin roottorin ampeerikierrosluku on suurimmillaan. UMP kuluttaa laakereita ja voi aiheuttaa roottorin koskettamisen staattoriin, jolloin roottori- tai staattorivaurio voi syntyä. [18.]

### 7.2 Kriittinen kierrosluku

Kriittinen nopeus tarkoittaa sitä nopeutta, jonka saavutettaessa epästabiili liike syntyy. Epästabiilissa tilanteessa on huomioitava, että se loppuu vasta sitten, kun käynti käy alemmalla nopeudella kuin se on kehittynyt. Sähkömoottorin tilanteessa toispuoleinen magneettivoima aiheuttaa negatiivisen jousivakion  $c_e$ , joka on vähennettävä roottorin puhtaasti mekaanisesta jousivakiosta  $c_m$ . Seurauksena tästä on roottorin kriittisen pyörimisnopeuden aleneminen. [14.]

### 7.3 Tärinä ja ääni

Epäkeskisyyden seurauksena sähkökoneeseen muodostuu magneettivuo-aaltoja, joiden napapariluku on  $p \pm 1$ . Kun näitä sitten pyritään vaimentamaan, niin syntyy vastaavia virtoja ja värinävoimia roottorissa, jonka värähtely saa aikaan laakeripesän ja -kilven tärinän. Tärinää aiheuttavat voimat ovat roottorin säteensuuntaisia, akselia vastaan kohtisuoria sekä roottoriin ja staattoriin vaikuttavia voimia. Tärinä on sitä voimakkaampi, mitä suurempi akselin värinävoima on, ja mitä joustavampi on laakerointirakenne. Yleisiä sääntöjä voima-aaltojen muodonmuutoksista ei kuitenkaan voida tehdä, koska niiden muotoisuus riippuu koneen rakenteesta ja tyypistä. On siis mahdotonta ennustaa ja ehkäistä, minkälaisia muodonmuutoksia voima-aallot saavat aikaan. Tutkimuksien perusteella on kuitenkin saatu muodostettua sellainen käsitys, että suhteellisen epäkeskisyyden arvolla  $\varepsilon = 0,1$  ääni kasvaisi A-suodattimella 1...3 dB (A) verrattuna tasaisen ilmavälin tapaukseen. [14.]

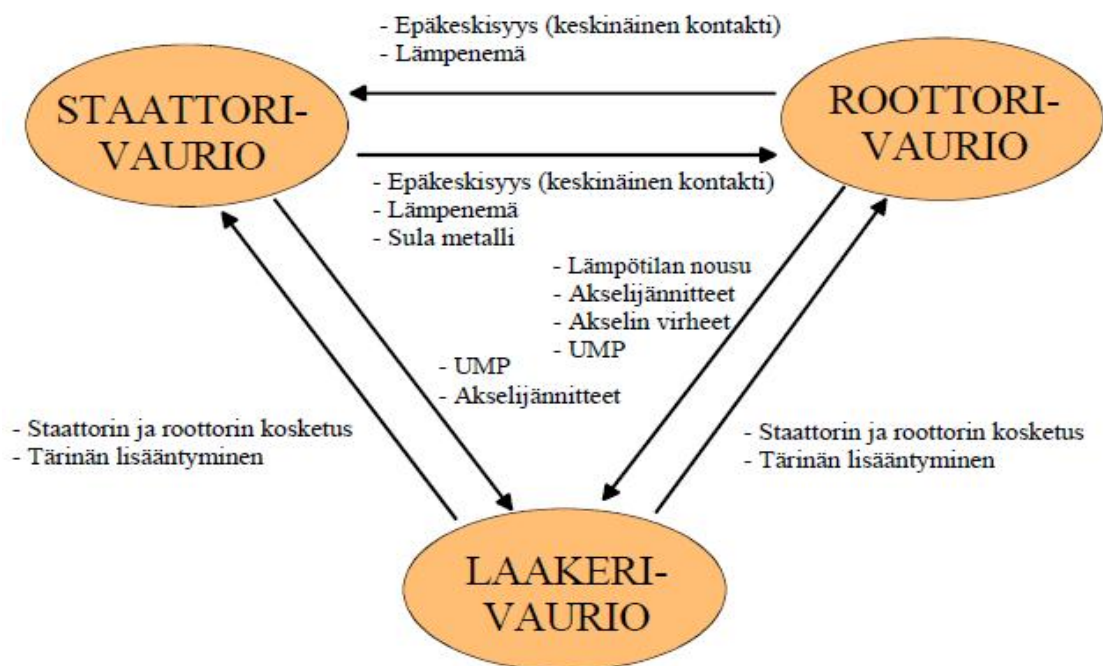
Tärinää mitataan koestuksessa erityisellä tärinämittarilla, johon kaapelin välityksellä liittyvä anturi painetaan laakeripesää tai muuta mittauskohtaa vasten. Tärinästä voidaan mitata kiihtyvyys, nopeus tai siirtymä (*amplitudi*). Haitallisuuden arvostelu perustuu usein tärinän nopeuteen (mm/s). Sähkökoneille, joiden akselikorkeus on suurempi kuin 280 mm, standardi 60034-14 määrittää seuraavat tärinärajat (rms). Tärinäluokka on A, jos määräyksessä tai VT-lomakkeessa ei toisin mainita. [19.]

Taulukko 3. Standardin 60034-14 määrittelemät tärinärajat sähkökoneille [19.]

Tärinäluokka	Asennus	Siirtymä [ $\mu\text{m}$ ]	Nopeus [mm/s]	Kiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ]
A	Joustava	45	2,8	4,4
<b>A</b>	<b>Jäykkä</b>	<b>37</b>	<b>2,3</b>	<b>3,6</b>
B	Joustava	29	1,8	2,8
B	Jäykkä	24	1,5	2,4

#### 7.4 Unipolaarivuo ja laakerijännitteet

Staattinen ja dynaaminen epäkeskisyys aiheuttavat molemmat koneessa unipolaarivuota. Se kulkee roottorin, ilmavälin ja staattorin kautta niin kuin päävuo, mutta vain pienemmän ilmavälin puolelta. Lisäksi se kulkee ainoastaan ilmavälin poikki yhteen suuntaan. Vuo sulkeutuu kahteen suuntaan laakerikilpien tai -pukkien ja akselin kautta. Vuon kulkiessa radiaalisesti paketin kautta tämä indusoi jännitteen staattori- ja roottori-pakettien päiden välille. Samalla se myös indusoi jännitteen laakerikilpien tai -pukkien kesken. Mikäli laakereista ainakin toista ei ole eristetty, muodostuu akselin kautta haitallisia laakerivirtoja. Staattinen epäkeskisyys aiheuttaa laakereiden välille vaihtojännitteen, kun taas dynaaminen epäkeskisyys voi muodostaa myös tasajännitteen. Muodostuneen jännitteen suuruus on suoraan verrannollinen magneettiseen epäkeskisyyteen. Kuvan 11 kaaviossa esitetään eri moottorivaurioiden vuorovaikutus toisiinsa.



Kuva 11. Staattori-, roottori- ja laakerivaurioiden keskinäisiä vuorovaikutuksia [7.]

## 8 Ideaalityökalu ilmavälin mittaamiseen

Työn tavoitteena oli löytää mahdollisimman monta toimivaa ratkaisumallia sähkömoottorin ilmavälin mittaamisen kehittämiseksi. Mahdollisia ratkaisuja pohdittiin ABB:n henkilöstön sekä monen mittaustoimialan edustajan kanssa. ABB:stä työn ohjaajana toimi tuotannonkehitysinsinööri Pekka Hento sekä tuotannonkehityspäällikkö Pasi Poutanen.

### 8.1 Ilmavälin mittaamiseen vaikuttavat mitat

Aluksi selvitettiin tarkat mitat niistä komponenteista sekä etäisyyksistä, jotka vaikuttavat ilmavälin mittaamiseen sähkömoottorissa. Taulukossa 4 (ks. liite 5) esitetään kolmen konetyypin ilmavälin mittaamiseen oleellisesti vaikuttavat mitat.

### 8.2 Teoreettiset mittaustyökalut

Kun tiedot ilmavälin mittaamiseen vaikuttavista mitoista saatiin selvitettyä, voitiin lähteä pohtimaan ja kartoittamaan mahdollisia ratkaisumalleja ilmavälin mittaamiseen. Mittaustyökaluja ja menetelmiä alettiin aluksi etsiä Internetin välityksellä eri yritysten ja toimialojen kautta oman pohdinnan ohella.

#### 8.2.1 Laser-mittaus

Aluksi pohdittiin laser-mittausta, jolla voitaisiin mitata ilmavälin suuruus helposti suoraan laakerikilven rei'istä. Laservalo mahtuisi menemään pienimmissäkin ilmaväleissä, ja sillä saataisiin tarkka mitta ilmavälin suuruudesta. Tekniikka voisi mahdollistaa myös ilmavälin mittaamisen koko staattoripaketin pituudelta. Internetin avulla ei löydetty suoraan sopivaa mittauslaseria, joka pystyisi mittaamaan ilmavälin moottorista taulukossa 4 (ks. liite 5) esitettyjen mittojen perusteella. Lasermittarit ja niiden valonlähteet ovat kokoluokaltaan sen kokoisia, että niillä ei pääse ilmavälin lähelle vaan valo pitää pystyä saattamaan laakerikilven toiselle puolelle apukeinoin. Tähän tarkoitukseen voisi käyttää optista valokuitua.

Laserilla mittaaminen voitaisiin suorittaa staattoripaketin koko pituudelta käyttäen heijastavia pintoja eli heijastaa valo staattorin pinnasta roottorin pintaan jne. Ongelmana on kuitenkin laservalon takaisin heijastaminen eli miten säteen mittaama tieto saadaan mitattua. Laser tarvitsee heijastavan pinnan heijastuakseen takaisin, jolloin se voi mitata vastaanottimellaan säteen tiedot. Vaihtoehtona voisi olla asentaa erillinen mittausvastaanotin roottorin toiselle puolelle, mikä vastaanottaisi saapuvan säteen.

Toinen vaihtoehto on leveä lasersäde, joka peittäisi ilmvälin kokonaan, kun sillä osoitaisi kohtisuoraan ilmväliä. Mittauksessa laserin lähetinyksikkö mittaisi suoraan valon osuuden, joka menisi ilmväliin. Toisin sanoen laser mittaisi sen valon osuuden, joka heijastuisi siihen takaisin roottorin ja staattorin pinnoista verraten sitä lähetettyyn säteeseen.

### 8.2.2 Venymäliuskapaineanturi

Venymäliuska-anturi on materiaalin venymisen mittaamiseen tarkoitettu anturi, jonka toiminta perustuu anturissa olevan metallijohteen muodon muuttumiseen venytyksen takia. Venymäliuskan avulla mekaaninen suure saadaan ilmaistua sähköisenä suurena. Venymäliuskan johteen resistanssin muuttuminen saadaan näin mitattua esimerkiksi painemittarilla. Venymäliuska-antureita käytetään voimien mittaamiseen ja punnitsemiseen. [20.]

Paineen aiheuttamia mekaanisia muutoksia antureissa voidaan helposti mitata venymäliuskojen avulla. Anturin aktiivisena osana käytetään ohutta ja joustavaa metalli- tai muoviluiskaa, joka paineen syntyessä taipuu ja venymäliuskan vastusarvo muuttuu. Mittaussiltaan syntyy epätasapaino, joka voidaan mitata sähköisenä viestinä paineanturilla. Paineanturi mittaa aina paine-eroa. [20.]

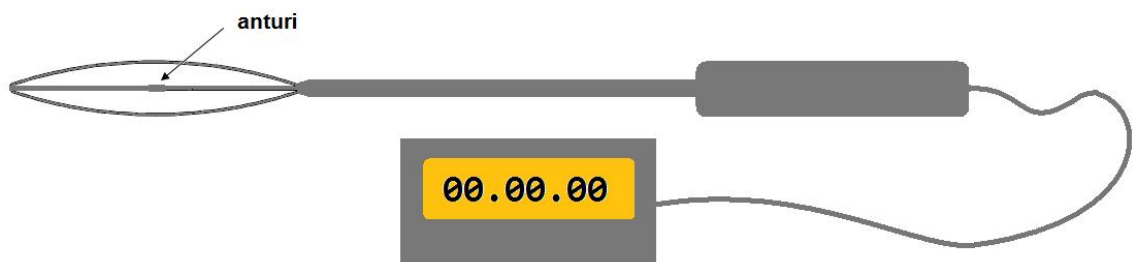
Venymäliuskapaineanturi vaatii syöttöjännitteen, joka voi olla n. 10 V:n tasajännite tai kanta-aaltovahvistinta käyttäen muutaman kHz:n taajuinen vaihtojännite. Anturilta saatava ulostulosignaali on tyypillisesti kymmeniä millivolteja. [21.]

Venymäliuskapaineanturit voivat olla kooltaan hyvinkin pienikokoisia, halkaisijaltaan 6 mm ja paksuudeltaan 0,6 mm (kuva 12).



Kuva 12. Venymäliuskan painevastus [22.]

Ilmavälin mittaaminen voidaan suorittaa venymäliuskan avulla esimerkiksi siten, että asetetaan kaksi hyvin ohutta metallista liuskaa vastakkain, joiden keskelle asetetaan venymäliuskan anturi levyineen. Metallipintojen painuessa lähemmäs toisiaan ilmavälissä, anturi tunnistaa anturilevyn muodon muuttumisen ja lähettää signaalin vastaanottimeen, joka muuttaa tiedon numeeriseksi. Rakenteeseen voidaan joutua lisäämään jousi anturin ja metalliliuskojen välille tuloksen saamiseksi (kuva 13).



Kuva 13. Ilmavälin mittaaminen kahden metalliliuskan avulla

Kapasitiivisessa mittauksessa kahden levyn välinen kapasitanssi on

$$C = K \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (3)$$

missä

$K$  = väliaineen dielektrisyysvakio

$A$  = levyjen yhteinen pinta-ala

$d$  = levyjen välinen etäisyys

$\varepsilon_0$  = tyhjiön permittiivisyys ( $8,854187817 \cdot 10^{-12}$  F/m)

Kapasitiivisessa mittauksessa kapasitanssi muuttuu, kun väliaineen dielektrisyysvakio  $K$  muuttuu, levyjen yhteinen pinta-ala  $A$  muuttuu tai levyjen välissä oleva etäisyys  $d$  muuttuu (esim. paikkasensori). Muutos voidaan lukea siltakytkennällä tai varausvahvistimella. [23.]

### 8.2.3 Sähköinen rakotulkki

Gapman® Gen3 on korkean tarkkuuden omaava, kosketukseton sähköinen rakotulkki, jonka avulla voidaan tehdä tehostettuja mittauksia hyvin ohuissa ilmaraoissa. Rakotulkissa on nappimaiset kapasitiiviset anturit, jotka on asennettu seläkkäin jäykkään tai osittain jäykkään teollisuuden varsirakenteeseen. Sähköisessä Gapman® Gen3 -rakotulkissa on mahdollista käyttää joko ohutta kaksipuolista HPD tai kaksipuolista GPD -sarjan rakoanturinvartta. HPD-sarjan anturit ovat tyypillisesti 10 mm leveitä ja 100 - 200 mm pitkiä, kun GPD-sarjan anturit taas ovat 14 mm leveitä ja 150 - 500 mm pitkiä. Gapman® Gen3 on kannettava ja kooltaan pienikokoinen (56 x 220 x 28 mm), ja se painaa alle puolikiloa. HPD-sarjan antureita on saatavilla jopa 0,11 mm:n paksuuksilla. (Eri mittauspäiden tarkat mitat esitetään liitteissä 6 ja 7.)

Gapman® Gen3 kirjaa ja tallentaa mittauspisteiden tiedot ja siirtää ne SPC (*Statistical Process Control*) eli tilastollisella prosessinohjauksella, joka tukee Six Sigma ja muita laatujärjestelmiä. SPC perustuu prosessin mittaamiseen siitä kerättävien näytteiden avulla. [24, 25.]



Kuva 14. HPD-sarjan anturivarsi ja Gapmaster 3 [25.]

GPD-sarjassa kaksipuolinen kosketukseton siirtymäanturi asennetaan metalliseen varteen kahden joustavan lehtijousen väliin, mitkä asennetaan sen ylä- ja alapuolelle. Kun varsi viedään ilmarakoon, lehtijouset taipuvat sisäänpäin kohti anturia antaen tarkan tiedon ilmarakon suuruudesta. (Kuva 15.)

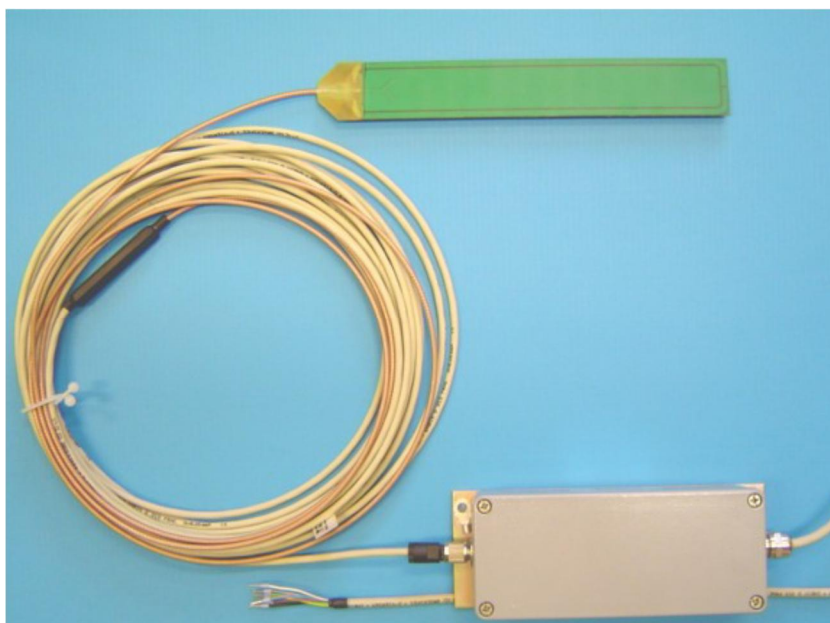


Kuva 15. GPD-sarjan lehtijousirakenne [25.]



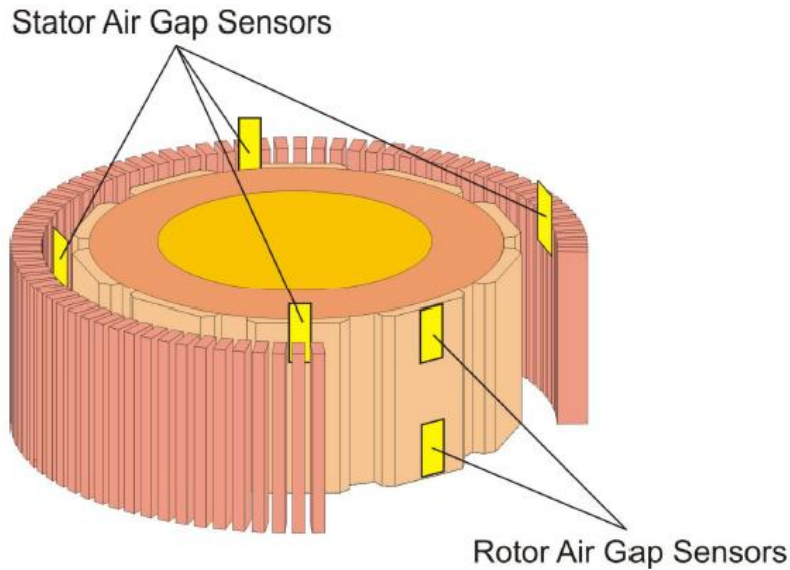
#### 8.2.4 Ilmavälianturi

Ilmaväliantureita käytetään ilmavälin seurantaan suurissa moottoreissa ja generaattoreissa. Anturit ovat kriittinen osa moottorin ohjausjärjestelmää ja antavat tietoa moottorin toiminnasta. Litteät ja pienet anturit kiinnitetään staattorin sisäpintaan, jolloin niiden avulla havaitaan muutokset roottorin asennossa staattoriin nähden ja voidaan ennakoida ongelmatilanteet. Moottorista voidaan tunnistaa koneen virta, asento sekä pyörivän koneen nopeus ja suunta. Näin voidaan ehkäistä epäkeskisyyttä ja ei-toivottuja vaikutuksia kuten toispuoleista magneettivoimaa, värinää ja muita haittavaikutuksia. Ilmavälianturi valvoo moottorin minimi ja maksimi ilmarakoa ja tarkistaa roottorin suoruuden staattorissa. Tämä takaa moottorin turvallisen käytön ja estää vakavien vaurioiden syntymisen. [26.]



Kuva 16. Ilmavälianturi [26.]

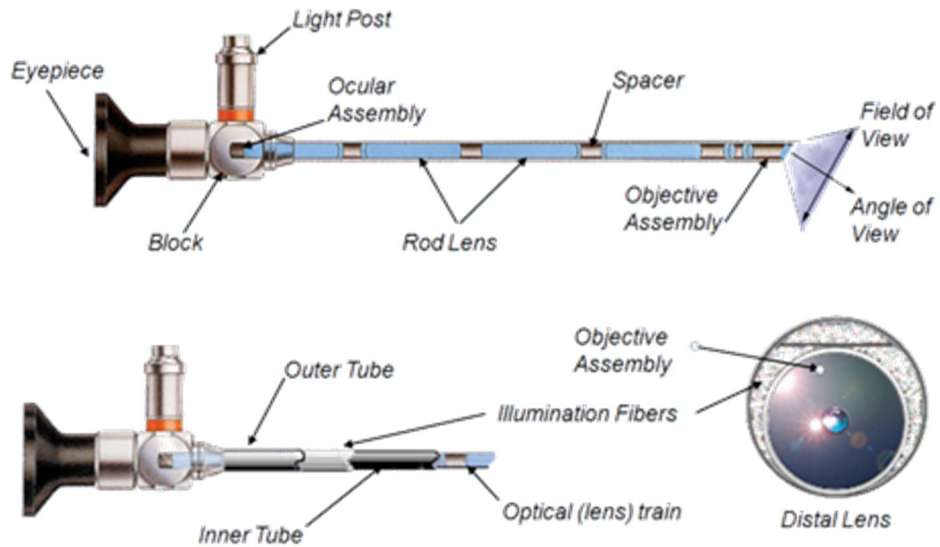
Moottorin staattoriin kiinnitetään neljä ilmavälianturia  $90^\circ$  välein, jolloin niiden avulla saadaan tietoa moottorin toiminnasta tasaisesti (kuva 17, ks. seur. s.). Anturit kiinnitetään staattorin sisäpintaan esimerkiksi liimalla. Ilmavälianturin perusrakenteeseen kuuluu anturi, kaapeli ja sovitinyksikkö (kuva 16). Sovitinyksiköllä parannetaan mm. sähkölaatua ja ominaisuuksia, jotta kuorman laitteet toimisivat paremmin. (Ilmavälianturin tarkka rakenne esitetään liitteessä 8.)



Kuva 17. Ilmavälialantureiden sijainti staattorin ja roottorin kehällä [27.]

### 8.2.5 Endoskooppi

Alun perin endoskopia eli tähystys on lääketieteellinen toimenpide, jossa ihmisen elimistöä tutkitaan sisältä endoskoopilla eli tähystimellä. Tekniikka soveltuu piilossa olevien kohteiden tarkasteluun. Endoskoopeilla onnistuu mm. turbiinien, putkistojen, moottorien, vaihteistojen ja lukkojen tutkiminen kohteita purkamatta. Endoskooppi sisältää tyypillisesti jäykän tai taipuisan putken, jonka kärkeen johdetaan valoa kuituoptiikalla ulkoista valonlähdettä käyttäen. Valonlähteitä on olemassa pieniä paristokäyttöisiä ja suurempitehoisia verkkovirtakäyttöisiä malleja. Endoskoopin putken päässä on kameranlinssi, jolla muodostetaan kuva tähystettävästä alueesta. Nykyään käytetään paljon digitaalisia endoskoopeja, sillä niiden avulla voidaan tallentaa kuvia ja videoita tutkimuksista. [28.]



Kuva 18. Jäykkäavartisen boroskoopin rakenne [29.]

Jäykkäavartisessa endoskoopissa eli boroskoopissa kuituosan päässä oleva näkökenttä osoittaa usein suoraan eteenpäin. Erillisen kääntöprisman avulla näkökenttä saadaan kuitenkin haluttaessa suunnattua myös sivulle eri kulmissa. (Kuva 18.)



Kuva 19. Taipuisavartinen videoendoskooppi [30.]

Taipuisavartisissa videoendoskoopeissa saadaan kuituosan päätä taivutettua erillisen tähystyspään avulla, mikä voi kääntyä eri kulmiin. Tähystyspäättä voidaan ohjailta erillisellä ohjaimella tai katsontaosassa sijaitsevasta vivusta. Kuituosa saadaan näin ohjattua vaikeisiinkin paikkoihin erilaisten mutkien ja esteiden ohi. (Kuva 19.)

Videoendoskoopin kuvaamat tiedot voidaan tallentaa suoraan endoskoopin muistiin tai USB-liitännän kautta esim. muistikulle. Suuri osa videoendoskoopeista voidaan liittää myös suoraan tietokoneeseen USB-liitännällä, jolloin kuva saadaan tallennettua suoraan tietokoneen muistiin. Valmistajilta löytyy myös tietokoneelle mahdollisia kuvankäsittelyohjelmistoja, joiden avulla kuvat voidaan ottaa jatkokäsittelyyn tietokoneella. [28.]

## 9 Mittausalan yritysten vierailut

Kun ideoita ja mahdollisia ratkaisuja oli löytynyt, alettiin ottaa yhteyttä mittausalan yrityksiin sähköpostin välityksellä.

### 9.1 Kyselyt mittausalan yrityksille

Yrityksille lähetettiin yksityiskohtaiset tiedot ilmavälin mittaamiseen vaikuttavista tekijöistä ja mitoista (taulukko 4, ks. liite 5) sekä kuvat laakerikilvestä ja koneen poikkileikkauksesta. Tietojen lisäksi yrityksille kuvailtiin vanha mittaustapa ja kerrottiin, kuinka tarkkaan ilmavälin mittaus pitää suorittaa.

Lähetettyihin kyselyihin vastattiin erittäin hyvin, sillä 14 yrityksestä 11:ltä tuli vastaus lisäkysymyksiin liittyen mittaamiseen ja sen tarkkuuteen. Yrityksistä mm. neljä oli venymäliusmatekniikkaan perehtyneitä yrityksiä ja viisi endoskopiaan. Tehtaalla kävi lopulta neljä yritystä esittämässä heidän ajatuksensa ja ratkaisunsa ilmavälin mittaamiseen.

### 9.2 Mittausalan yritysten vierailut ABB:ssä

Yritysvierailuille saatiin sovittua sopivat ajankohdat, jotka kävivät niin vierailijoille kuin tätä insinööriä valvovalle tuotannonkehitysinsinöörille Pekka Hennolle. Vierailijoille näytettiin tehtaalla senhetkinen ilmavälin mittaustapa ja he saivat myös itse halutesaan kokeilla mittaamista. Pekan ja kokoonpanotyöläisten avulla pystyimme kertomaan vierailijoille tarkemmin mittauksen kulusta ja haasteista, sillä heillä oli niistä enemmän kokemusta ja tietoa entuudestaan.

Yritysten vierailut sujuivat erityisen hyvin. Saatiin selkeä käsitys yritysten toiminnasta sekä mittaustekniikan ratkaisuista ja yritysten edustajat tietävät tarkalleen, miten täällä toimitaan. Yritykset antoivat kattavat esitteet heidän tuotteistaan ja kertoivat heidän ideansa ilmavälin mittaamisen kehittämiseksi.

## Yritys 1

Ensimmäisen yrityksen kanssa pohdittiin mahdollisia mittalaiteratkaisuja ilmavälin mittaamiseen. Yrityksellä ei ollut suoraan tarjota toimivaa ratkaisua itse mittaamiseen, mutta heiltä voisi saada apua mittaamisen jälkeisen tiedon käsittelyyn. Yritys voisi kehittää järjestelmän, jolla mittaustulokset saataisiin syötettyä suoraan ABB:n tuotantojärjestelmään, esimerkiksi SAP:iin. Lisäksi ko. yrityksen kautta voitaisiin lähteä kehittämään tai hankkimaan mahdollisia mittavälineitä.

## Yritys 2

Yritysvierailulla yritettiin testata ilmavälin mittaamista jäykkävartisella boroskoopilla, mutta mittaaminen epäonnistui. Kameran linssi katsoi boroskoopin päässä sivulle, kun ilmavälin näkemiseen olisi vaadittu suoraan katsova kamera. Boroskooppiin saatiin kuitenkin liitettyä videotointia ja sen liittäminen tietokoneeseen oli mahdollista USB-kaapelin avulla. Vaikka tuotteen testaus ei onnistunutkaan halutulla tavalla, pohdittiin yrityksen edustajan kanssa mahdollisista ratkaisuista ilmavälin mittaamiseen.

## Yritys 3

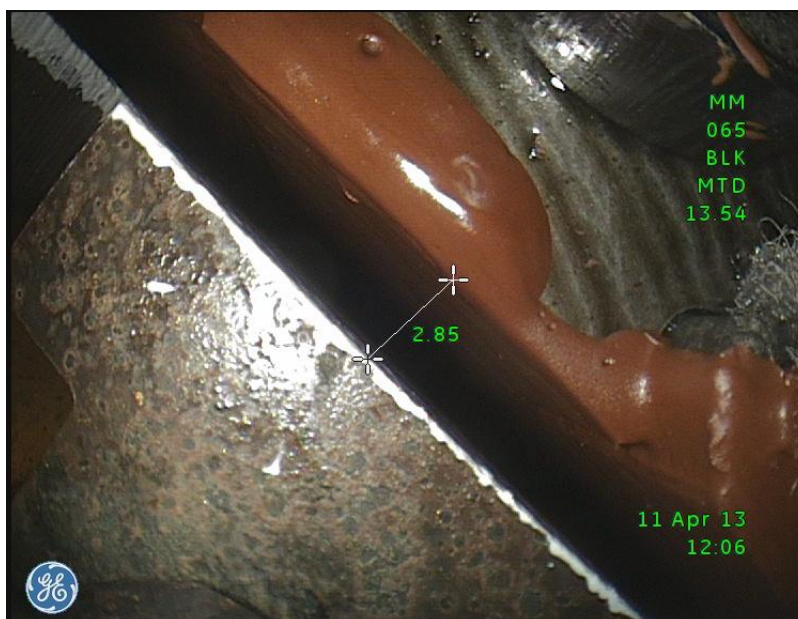
Kolmannen yrityksen kanssa kokeiltiin ilmavälin mittaamista GE Everest XLG3 -videoendoskoopilla, jonka ominaisuudet ovat hyvin monipuoliset. Videoendoskoopissa on erittäin tarkka ja leveä VGA-näyttö, käsiohjaimella kääntyvä tähytyspää ja perusyksikkö. Perusyksiköstä löytyy mm. valinnainen kirjoittava DVD/CD-asema ja CompactFlash® -kortinlukija sekä liitännät USB-muistille, Internetille, S-videolle (tulo ja lähtö) ja VGA ulostulo lisänäytölle (kuva 20, ks. seur. s.).

Endoskoopissa voidaan käyttää erilaisia mittaustekniikoita eri mittauspäiden avulla. Tekniikoita ovat 3D-vaihe-, stereo- ja varjomittaus. 3D-teknologia tarjoaa tarkan 3-ulotteinen pinnan tarkistuksen, joka mahdollistaa mittaamisen kuvastusta pinnasta. Kuvasta voidaan mitata mm. alue, syvyys ja etäisyys. Näiden lisäksi voidaan otetusta kuvasta muodostaa sivuprofiilikuva, josta voidaan nähdä esimerkiksi reiän muoto ja syvyys. [31, 32.]



Kuva 20. GE Everest XLG3 -videoendoskooppi [32]

Ilmavälin mittaamisessa käytettiin 3D-stereomittausta. Ilmavälin päästä saatiin otettua tarkka kuva, josta pystyttiin mittaamaan ilmavälin suuruus. Mitattu ilmaväli vastasi vanhalla menetelmällä saatua tulosta, joten mittaus onnistui (kuva 21).



Kuva 21. XLG3 -videoendoskoopin kuva ilmavälistä; ilmavälin mitta 2,85 mm

Vaikka tuloksen saanti onnistui videoendoskoopin avulla, todettiin sen olevan sopimaton ilmavälin mittaamiseen. Kuvan ottaminen oli vaikeaa mm. herkän tähystyspään takia, jonka säätäminen oikeaan asentoon vei aikaa. Lisäksi mittausta ei voitu suorittaa jokaisesta kuvasta, koska mittaustoiminto ei saanut kuvasta mittauspistettä. Keskusteluissa nousikin esille endoskoopin käyttäminen laatu puolen tarkkailuvälineenä ja vikojen korjaamisessa.

#### Yritys 4

Vierailulla testattiin Olympuksen IPLEX LX -videoendoskooppia stereomittauksella. Kuvauksella päästiin samoihin tuloksiin kuin GE Everest XLG3 -videoendoskoopin kanssa eli kuvaaminen ja mittaaminen onnistuivat. Tuloksesta kuitenkin pääteltiin, että kyseinen videoendoskooppi ei sovellu ilmavälin mittaamiseen edellisen tapaan. Kohteen mittaaminen ei ole optimaalista videoendoskoopilla, sillä parhaaseen tulokseen videoendoskoopilla päästään tasaisen pinnan kuvaamisella. Silloin stereomittaus saadaan toimimaan parhaiten ja kuvasta saadaan paremmin mittaukseen tarvittavat pisteet.



Kuva 22. IPLEX LX -videoendoskooppi [33.]

Olympuksen videoendoskooppi oli kuitenkin käytännöllisemmän kokoinen ja toiminnoiltaan helpompikäyttöisempi kuin Everestin XLG3 -videoendoskooppi. Sen perusrakenteeseen kuuluu monitoriosa, jota voidaan käyttää yhdellä kädellä käytettävällä ohjauskäyttöliittymällä sekä tähystyspää, johon voidaan vaihtaa eri linssipää kuvaustarkoituksen mukaan. (Kuva 22.)



## 10 Lopputulos ja jatkokehitys

Koska tässä työssä etsitään mahdollisia vaihtoehtoja toteuttaa ilmavälin mittaaminen tarkemmin, niin onnistunut lopputulos on löydettyjen ratkaisumallinen myötä luoda hyvät puitteet ilmavälin mittaamisen jatkokehitykselle.

### Lopputulos

Työn lopputuloksena saatiin kartoitettua eri mittavälineitä sähkömoottorin ilmavälin mittaamisen kehittämiseksi. Työssä lähdettiin etsimään toimivaa ja sopivaa mittavälinettä ilmavälin mittaamiseen. Projektissa löydettiin yksi mahdollinen, valmis ratkaisu, joka voisi olla tarkempi ja nopeampi kuin käytössä oleva mittaustapa. Mittaustekniikanlaboratoriossa kiinnostuttiin kyseisestä laitteesta ja yritykseen lähetettiin tarkempi tuotekysely. Mikään vierailevista yrityksistä ei pystynyt suoraan tarjoamaan järkevää vaihtoehtoa vaativassa paikassa sijaitsevan ilmavälin mittaamiseen.

### Jatkokehitys

Ilmavälin mittaamisen kehittämishanketta on helppo lähteä jatkamaan, kun muutamiin mittausalan yrityksiin on oltu yhteydessä. Heidän kautta voidaan lähteä luomaan uutta mittaustapaa esiin nousseitten ideoiden pohjalta. Mikäli toimiva työkalu saadaan hankittua ja sen toiminta todetaan toimivaksi, voidaan sitä lähteä jatkokehittämään yhteistyössä yritysten kanssa. Yritysten kautta voidaan myös saada tietoa mittausalan erilaisista messuista ja niillä ilmenneistä ratkaisuista.

Tulevaisuudessa ilmavälin mittaamisen kehittäminen on erittäin tärkeää. Tarkemmalla mittaussvälineellä laatuongelmiin saadaan aikaan muutoksia, ja voidaan paremmin päättellä koneen epäkeskisyyteen johtaneita syitä ja ehkäistä niitä.

## 11 Yhteenveto

Työssä oli tavoitteena löytää mahdollisimman monta ratkaisuvaihtoehtoa ilmavälin mittaamisen kehittämiseksi AMI 400-500, AMI 560-630 ja HXR 355-560 -tuotantolinjojen sähkömoottoreille. Työ sisältää myös ilmavälimittaamisen nykyisen menetelmän kartoituksen ja sen ongelmien tutkimista.

Ilmavälin mittaamisen tarkoitus käydään läpi teoriaosassa sekä sen vaikutus koneen toiminta-arvoihin. Ilmavälimittaamisen nykytilaa kartoitetaan esittelemällä nykyinen mittaustapa ja sen toimintaperiaatteet. Moottorin epäkeskisyydestä ja sen seurauksista kerrotaan omilla kappaleillaan.

Tulevaisuuteen perehdytään selvittämällä mahdolliset menetelmät, joita voitaisiin soveltaa ilmavälin mittaamiseen sähkömoottorissa. Yritysten esittelemät ratkaisut esitetään myös sekä perehdytään mahdollisiin jatkotoimiin.

Työn tekeminen oli mielenkiintoinen ja opettava kokemus. Työtä tehtäessä toimittiin tuotannonkehitystiimissä, joka on koko ajan tekemisissä käytännön asioiden kanssa. Työ opetti eri teorioiden soveltamista käytännön asioihin ja niiden yhdistämistä työelämään. Lisäksi kiinnostavia olivat eri yritysten vierailut ABB:hen sekä yritysten tuotteiden ja esitteiden näkeminen lähietäisyydeltä. Oli hieno kokemus päästä osaksi yritysmarkkinointia ja nähdä, miten ammattielämässä hoidetaan erilaiset tilanteet.

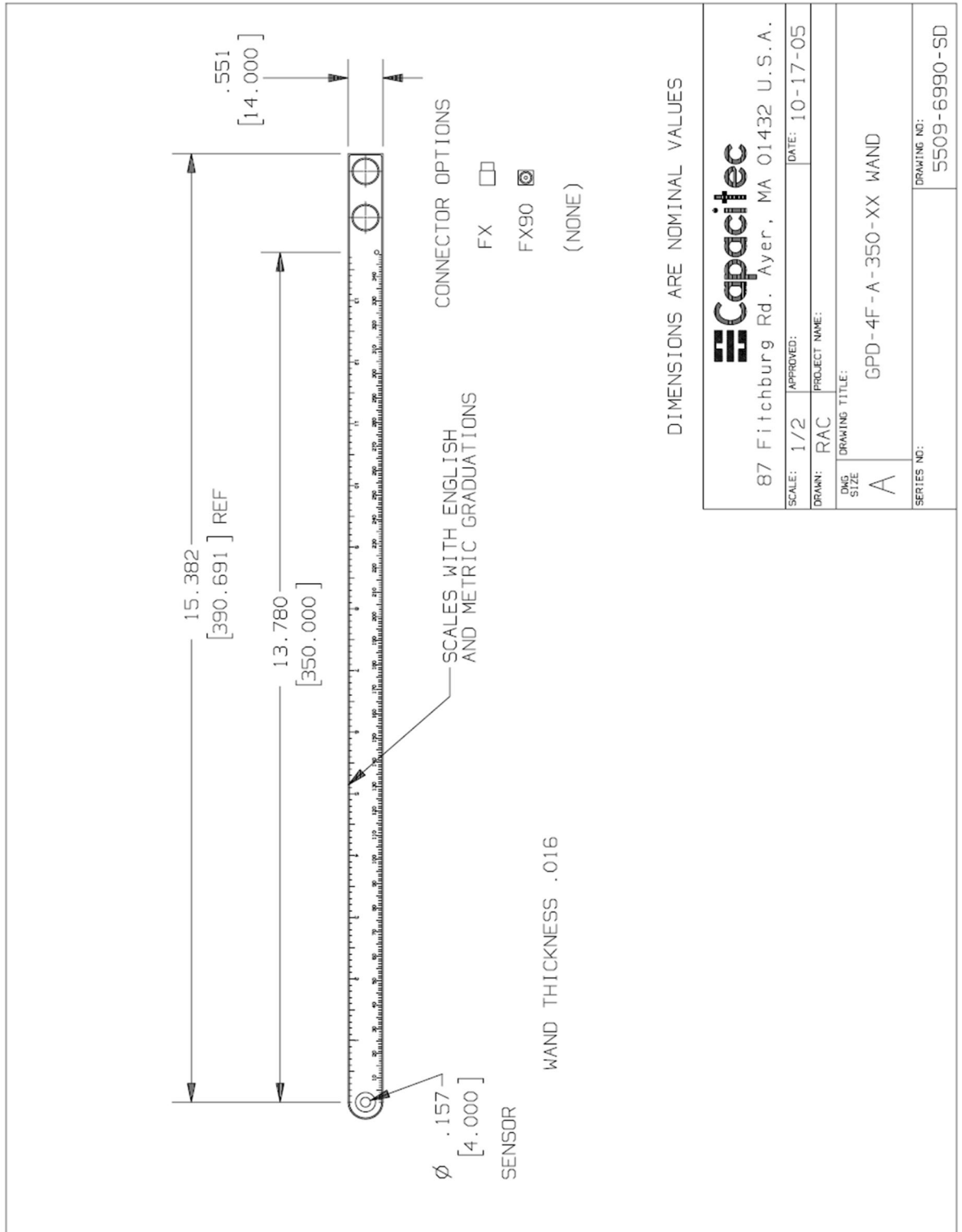
## Lähteet

- 1 Aura Lauri & Tonteri Antti J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. 1. painos. Porvoo: WSOY.
- 2 Korpinen, Leena. SHKVOIMATEKNIikkaOPUS, sähkökoneet. Verkkodokumentti. <[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)>. Luettu 20.2.2013.
- 3 Ruuhonen, Marko. 2011. Komposiittirakenteiden hyödyntäminen sähkömoottorin tuotekehityksessä. Insinööriyö, Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti. <[https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/36750/ruuhonen\\_marko.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/36750/ruuhonen_marko.pdf?sequence=1)>. Luettu 3.3.2013.
- 4 Hämäläinen, Tapani. 2009. Eristystekninen koulutusmateriaali. Insinööriyö, Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti. <<http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2408/Eristystekninen%20koulutusmateriaali.pdf?sequence=1>>. Luettu 3.3.2013.
- 5 Kinanen, Juha. 2001. Sähkökoulutus. ABB Oy. Koulutusmateriaali. Saatavissa ABB:n sisäisessä verkossa. Luettu 16.3.2013.
- 6 Aura Lauri & Tonteri Antti J. 2000 (1994). Teoreettinen sähkötekniikka. 3.-4. painos. Vantaa: WSOY.
- 7 Tiainen, Risto. 2004. Sähkökoneiden etädiagnostiikan kenttätason tiedonsiirtotarpeen arviointi ja instrumentoinnin kehittäminen. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. Verkkodokumentti. <<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/34527/nbnfi-fe20051353.pdf?sequence=1>>. Luettu 14.3.2013.
- 8 Tekninen opas nro 7 – Sähkökäytön mitoitus. Abb Oy. Verkkodokumentti. <[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/b11dafa92973be93c1256d2800415027/\\$file/tekninen\\_opasnro7.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/b11dafa92973be93c1256d2800415027/$file/tekninen_opasnro7.pdf)>. Luettu 4.3.2013
- 9 Hakkarainen, Veijo. Kokoonpanotyöntekijä. ABB Oy. Helsinki. Haastattelu 05.02.2013.
- 10 AutoCAD Mechanical 2010-ohjelmalla luotu kuva koneen rakenteesta.
- 11 Ilmavälin mittaamisohje. 2011. ABB Oy. Toimintaohje, saatavissa ABB:n sisäisessä verkossa. Luettu 24.1.2013.
- 12 Valurautarunkoisten koneiden ilmavälin mittaamisohje. 2011. ABB Oy. Toimintaohje. Saatavissa ABB:n sisäisessä verkossa. Luettu 24.1.2013.

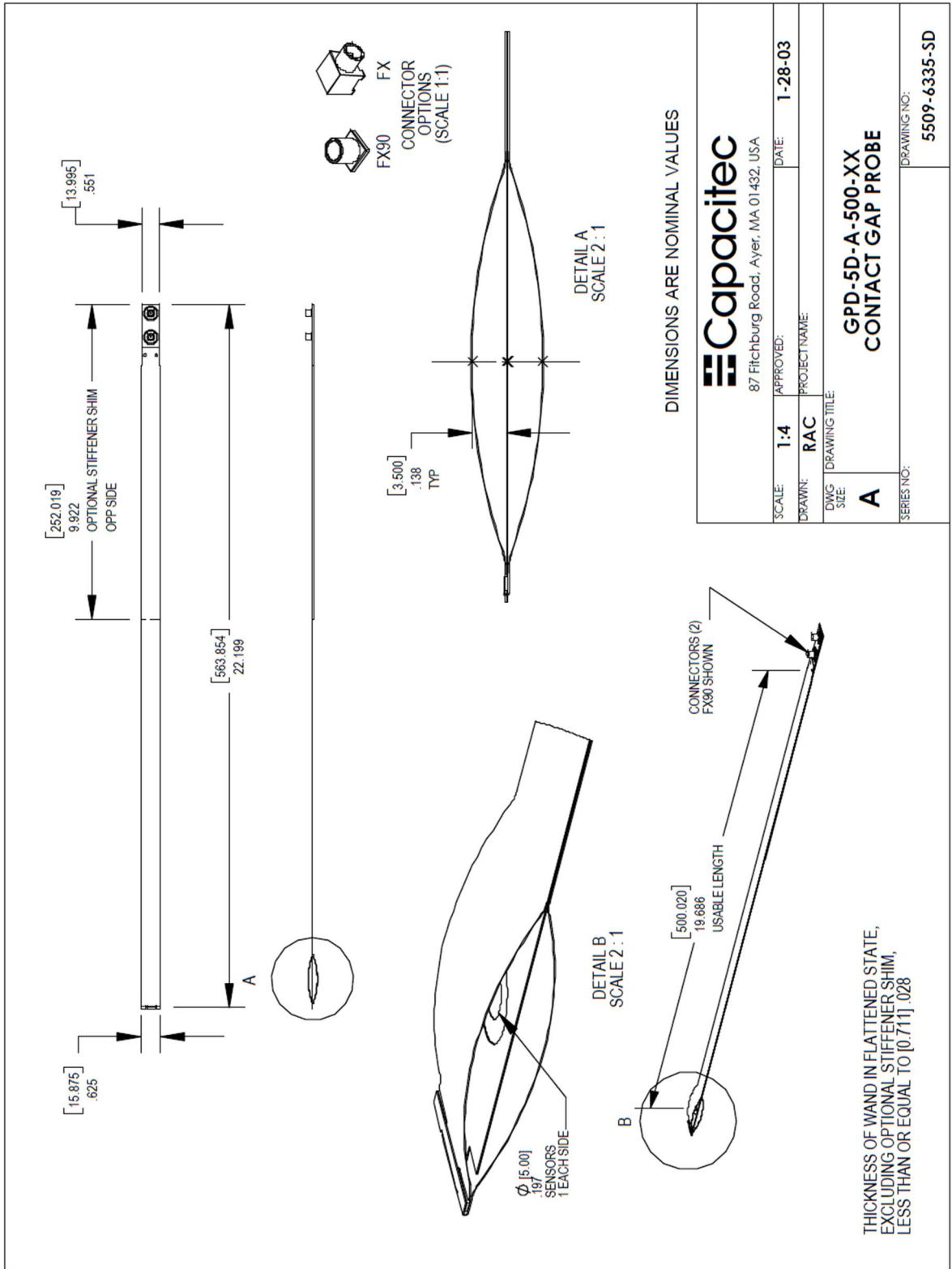
- 13 Kokoonpanotyöläisten haastattelu. 2013. AMI 400-500 tuotantolinja, ABB Oy, Helsinki. Haastattelu 12.3.2013.
- 14 Jokiniemi, Matti I. 1979. Sähkökoneiden ilmavälin epäkeskeisyys. Verkkodokumentti. Saatavissa ABB:n sisäisessä verkossa. Luettu 15.1.2013.
- 15 Takahata, R. ; Wakui, S. ; Miyata, K. ; Noma, K. ; Senoo, M. 2010. Analysis of rotor eccentricity on permanent magnet synchronous motor characteristics. The 2010 International Power Electronics Conference. Luettu 15.4.2013.
- 16 Bruzzese, C. ; Giordani, A. ; Santini, E. 2008. Static and Dynamic Rotor Eccentricity On-Line Detection and Discrimination in Synchronous Generators By No-Load E.M.F. Space Vector Loci Analysis. SPEEDAM 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Luettu 11.4.2013.
- 17 Hento, Pekka. 2013. Tuotannonkehitysinsinööri, ABB Oy, Helsinki. Keskustelu 18.4.2013.
- 18 Austin H. Bonnett, George C. Soukup. 1992. Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications. Luettu 3.4.2013.
- 19 Tärinän mittaamisohje. 2003. ABB Oy. Toimintaohje, saatavissa ABB:n sisäisessä verkossa. Luettu 15.4.2013.
- 20 Oulun yliopisto, Eteläinen instituutti. 2007. Venymäliuska: virikemateriaalia opettajalle. Verkkodokumentti. <<http://www oulu.fi/teknokas/tehtavakortit/venymaliuska.pdf>>. Luettu 21.4.2013.
- 21 Ohjaustekniikka, Anturitekniikan perusteet. Anturit ja kenttälaitteet. 1997. Ammatti-instituutti, Helsinki. Verkkodokumentti. <[http://personal.inet.fi/yritys/kkov.eduserver/yhteinen/anturitekniikka3\\_54\\_84.pdf](http://personal.inet.fi/yritys/kkov.eduserver/yhteinen/anturitekniikka3_54_84.pdf)>. Luettu 21.4.2013.
- 22 Alander, Jarmo T. 2013. Elektroniikan alkeita. Verkkodokumentti. <<http://lipas.uwasa.fi/~TAU/AUTO1060/slides.php?Mode=Printer&File=0030Ohmi.txt&MicroExam=Off>>. Luettu 20.4.2013.
- 23 Kärhä, Petri. 2006. Luento 1: Anturit ja mittausvahvistimet. Verkkodokumentti. <[http://metrology.tkk.fi/courses/S-108.2010/Luento1\\_2006.pdf](http://metrology.tkk.fi/courses/S-108.2010/Luento1_2006.pdf)>. Luettu 20.4.2013
- 24 Non - contact displacement. 1998. Capacitec, Inc. Verkkodokumentti. <<http://www.capacitec.com/content/editor/file/Capacitec.pdf>>. Luettu 26.4.2013.

- 25 Manning Bryan & Foster Robert L. 2011. An Electronic Gap Measurement System for Aircraft Applications. Capacitec Inc. Verkkodokumentti. <<http://www.sensorsmag.com/aerospace-military-hs/an-electronic-gap-measurement-system-aircraft-applications-8410>>. Luettu 26.4.2012.
- 26 Air Gap Monitoring System. 2013. MC-monitoring SA. Verkkodokumentti. <<http://www.mc-monitoring.com/data/pdf/Flyer%20AirGap.pdf>>. Luettu 21.4.2013
- 27 Air Gap Sensor AGS - Installation and user manual. 2012. Mikrotrend d.o.o. Verkkodokumentti. <<http://www.mikrotrend.com/pdf/ags-installation-and-user-manual.pdf>>. Luettu 21.4.2013.
- 28 Tekniset endoskoopit. 2008. Richard Wolfin tuote-esite, Sähkölehto Oy. Luettu 22.4.2013.
- 29 Agoston, Gregg. 2009. Redefining endoscope quality in HD world. Verkkodokumentti. <<http://www.hpnonline.com/inside/2009-11/0911-scopes-ksea.html>>. Luettu 22.4.2013.
- 30 Extech HDV640 High Definition Boroscope, PAT Training Services Limited. <<http://www.test-meter.co.uk/products/electricians-tools/extech-hdv640-high-definition-boroscope/>>. Luettu 23.4.2013.
- 31 XLG3 VideoProbe Manual, Everest XLG3™ VideoProbe® System. 2009. GE Measurement & Control Solutions. Verkkodokumentti. <[http://www.ge-mcs.com/download/RVI/XLG3/XLG3A-MAN-EN\\_RevK.pdf](http://www.ge-mcs.com/download/RVI/XLG3/XLG3A-MAN-EN_RevK.pdf)>. Luettu 18.4.2013.
- 32 XLG3™ VideoProbe® Inspection Technologies. 2011. GE Measurement & Control Solutions. Verkkodokumentti. <[http://www.ge-mcs.com/download/RVI/XLG3/GEIT-65042EN\\_xlg3-Brochure-lo.pdf](http://www.ge-mcs.com/download/RVI/XLG3/GEIT-65042EN_xlg3-Brochure-lo.pdf)>. Luettu 18.4.2013.
- 33 IPLEX FX, LX/LT Stereo Measurement Reference Guide, Olympus Corporation. Verkkodokumentti. <[http://www.olympus-ims.com/en/.downloads/download/?file=285212978&fl=en\\_US](http://www.olympus-ims.com/en/.downloads/download/?file=285212978&fl=en_US)>. Luettu 24.4.2013.

Puolijäykkä GPD-4F-A-350-XX -mittauspää

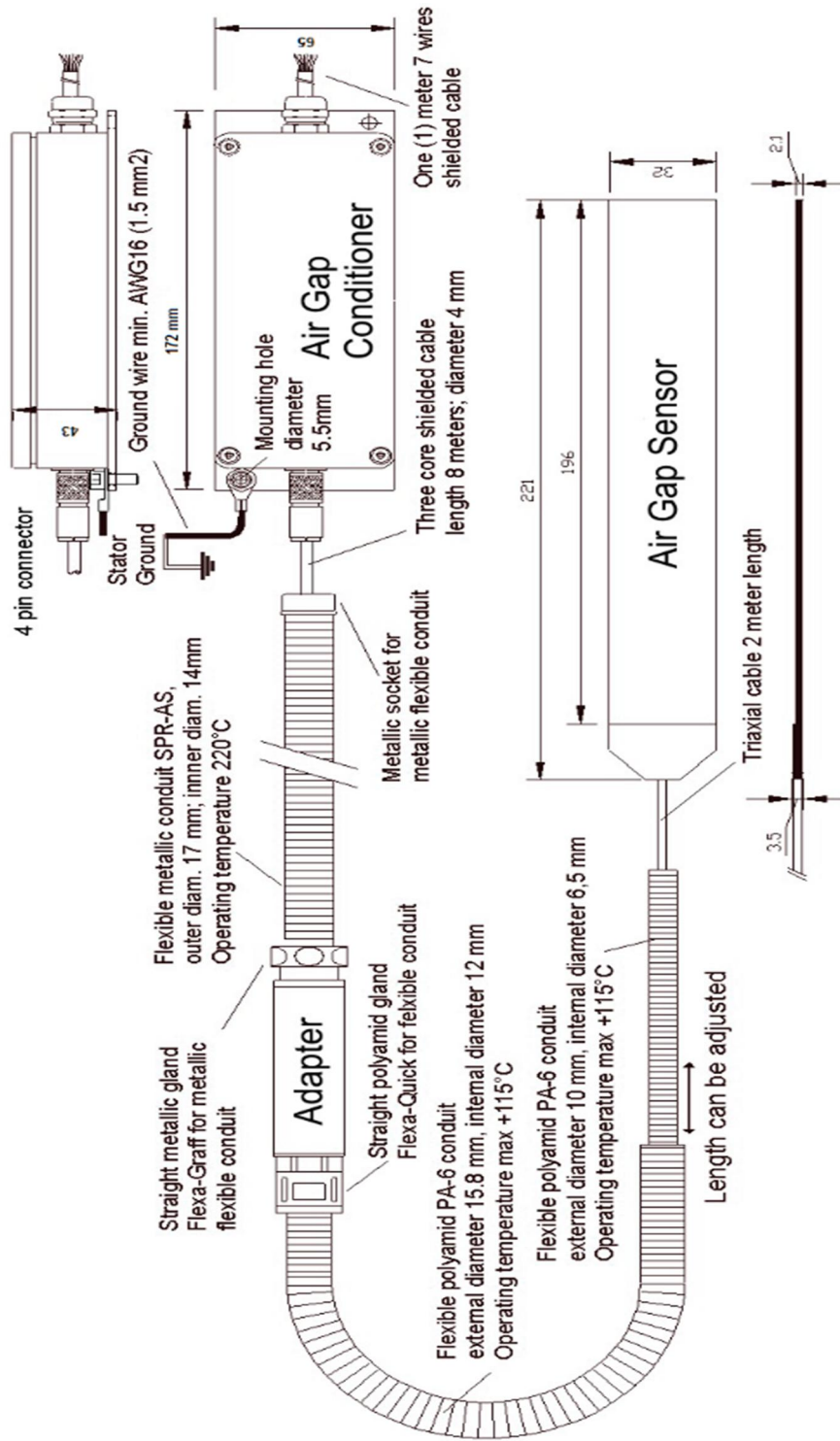


# Kontaktivälin jäykkä GPD-5D-A-500-XX -mittauspää



THICKNESS OF WAND IN FLATTENED STATE, EXCLUDING OPTIONAL STIFFENER SHIM, LESS THAN OR EQUAL TO [0.711] .028

Ilmavälianturin fyysiset mitat



[http://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/PDF-Files/Documentation/Sensors/EQ/EQ2431-A\\_Air\\_Gap\\_5\\_25mm\\_vers\\_16.pdf](http://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/PDF-Files/Documentation/Sensors/EQ/EQ2431-A_Air_Gap_5_25mm_vers_16.pdf)