

Juho Rajamäki
Minnamari Vippola
Antti Nurmikolu

Pyörrevirtatarkastus kiskon kunnon valvonnassa



Juho Rajamäki, Minnamari Vippola, Antti Nurmikolu

Pyörrevirtatarkastus kiskon kunnan valvonnassa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 27/2016

Kannen kuva: Pekka Salmenperä

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-269-2

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Juho Rajamäki, Minnamari Vippola ja Antti Nurmikolu: Pyörrevirtatarkastus kiskon kunnan valvonnassa. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2016. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 27/2016. 41 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-269-2.

Avainsanat: raiteet, ratakiskot, kuntotarkastus

Tiivistelmä

Suomessa kiskon tarkastus perustuu pääsääntöisesti visuaaliseen- ja ultraäänitarkastukseen. Visuaalinen tarkastus antaa kokonaiskuvan kiskon kunnosta ja ultraäänitarkastuksella voidaan havaita kiskon sisällä olevia vikoja. Ultraäänitarkastus ei kuitenkaan pysty mittaamaan pinnan läheisyydessä olevien säröjen syvyyttä luotettavasti. Pyörrevirtatarkastus sopii pinnan läheisyydessä olevien murtumien mittaamiseen ja tämä tekee pyörrevirtatarkastuksesta ultraäänitarkastusta täydentävän menetelmän.

Pyörrevirtatarkastus perustuu muutosten havaitsemiseen pyörrevirta-anturin ja tarkastettavan pinnan muodostamassa sähkömagneettisessa kokonaisuudessa. Kaikki sähkömagneettiset muutokset anturissa, tarkastettavassa pinnassa tai näiden välissä aiheuttavat havaittavan muutoksen pyörrevirtatarkastus-laitteella luettavassa signaalissa. Tämä signaali koostuu sekä amplitudista että vaiheesta (oikeammin vaihe-ero lähtö- ja tulovirran vaiheesta, mutta tässä pelkkä signaalin vaihe). Tavallisimmat pyörrevirtalaitteella havaittavat muutokset aiheutuvat pinnan vaurioista tai anturin etäisyyden muutoksista. Nämä kaksi voidaan erottaa toisistaan luotettavasti mitattujen signaalien vaihe-eron avulla (oikeammin vaihe-erojen ero).

Pyörrevirtatarkastuksessa vikojen kokoa voidaan arvioida vertaamalla viasta saatavaa signaalia tunnetuista referenssivioista saataviin signaaleihin. Referenssivikojen täytyy olla muodoltaan ja kooltaan tarkastettavaa vikaa vastaavia, jotta tällaiseen vertailuun perustuvaa arviointia voidaan pitää luotettavana. Lisäksi pyörrevirta-anturin synnyttämien pyörrevirtojen täytyy tunkeutua pintaan koko särön syvyydelle, jotta särön syvyys voidaan mitata.

Kiskon tarkastuksessa pyörrevirtojen tunkeuman syvyys muodostaa ongelman, koska teräksen ferromagneettisuus rajoittaa merkittävästi pyörrevirtojen tunkeutumista pintaan. Tunkeuman syvyyttä voidaan periaatteessa parantaa vaihtovirran taajuutta alentamalla, mutta samalla signaalissa oleva kohina kasvaa ja vioista saatavan signaalin vaihe lähenee anturin etäisyyden vaihtelusta syntyvän signaalin vaihetta. Näistä syistä esimerkiksi teräspuikien pyörrevirtatarkastuksessa käytetään yleensä noin 1 MHz taajuuksia, jolloin pyörrevirrat tunkeutuvat vain noin 0,01 mm syvyydelle. Tällöin vian syvyyden arviointi perustuu pelkkään signaalin amplitudiin.

Kiskon pyörrevirtatarkastus on ongelmallista, koska kiskon jäännösjännitykset ja pinnan muokkauslujittunut rakenne aiheuttavat häiriösignaaleja. Lisäksi kiskon tarkastuksessa anturin ja pinnan välistä etäisyyttä on erittäin vaikea pitää vakiona, koska kiskon pinta ei ole tasainen eikä tasomainen ja kiskon profiili vaihtelee. Nämä pinnan häiriösignaalit ja anturin etäisyyden vaihtelu vähentävät tarkastuksen luotettavuutta merkittävästi. Tämä ongelma korostuu erityisesti automatisoidussa kiskon pyörrevirtatarkastuksessa.

Juho Rajamäki, Minnamari Vippola och Antti Nurmikolu: Virvelströmskontroll vid övervakning av rälsens skick. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2016. Trafikverkets undersökningar och utredningar 27/2016. 41 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-269-2.

Sammanfattning

I Finland baserar sig kontrollen av räls i regel på visuell kontroll och ultraljudskontroll. Visuell kontroll ger en helhetsbild av rälsens skick och med ultraljudskontroll kan defekter inuti rälsen upptäckas. Ultraljudskontrollen kan dock inte tillförlitligt mäta djupet på sprickor nära ytan. Virvelströmskontroll lämpar sig för mätning av brott nära ytan och detta gör virvelströmskontroll till en metod som kompletterar ultraljudskontroll.

Virvelströmskontroll baserar sig på iakttagelse av förändringar i den elektromagnetiska helhet som virvelströmmsgivaren och den yta som kontrolleras bildar. Alla elektromagnetiska förändringar i givaren, i ytan som kontrolleras eller mellan dem ger upphov till en förändring som kan observeras i den signal som avläses av virvelströmsinstrumentet. Denna signal består både av amplitud och fas (rättare sagt en fasskillnad i utströmmens och inströmmens fas, men här enbart signalens fas). De vanligaste förändringarna som kan observeras med ett virvelströmsinstrument är skador i ytan eller förändringar i givarens avstånd. Dessa två kan tillförlitligt skiljas åt med hjälp av fasskillnader mellan uppmätta signaler (rättare sagt skillnaden i fasskillnad).

Vid virvelströmskontroll kan defekternas storlek bedömas genom att jämföra den signal som defekten ger med signaler från kända referensdefekter. Referensdefekterna ska till sin form och storlek motsvara den defekt som kontrolleras för att en bedömning som baserar sig på en sådan jämförelse ska anses vara tillförlitlig. Dessutom ska de virvelströmmar som virvelströmmsgivaren åstadkommer tränga in i ytan lika djupt som hela sprickan för att sprickans djup ska kunna mätas.

Vid kontroll av rälsen utgör virvelströmmarnas inträngningsdjup ett problem, eftersom stålets ferromagnetism avsevärt begränsar virvelströmmarnas penetrationsförmåga. Inträngningsdjupet kan i princip förbättras genom att sänka växelströmmens frekvens, men samtidigt ökar brusets i signalen och fasen för signalen som fås från defekterna närmar sig fasen för den signal som uppkommer av växlingar i givarens avstånd. På grund av detta används frekvenser på 1 MHz vid virvelströmskontroll av stålrör, varvid virvelströmmarna endast tränger 0,01 mm djupt. Då baserar sig bedömningen av defektens djup enbart på signalens amplitud.

Virvelströmskontroll av rälsen är problematisk, eftersom restspänning i rälsen och ytans deformationshärdade struktur orsakar störningssignaler. Dessutom är det vid kontroll av rälsen väldigt svårt att hålla avståndet mellan givaren och ytan stabilt, eftersom rälsens yta inte är jämn eller plan och profilen på rälsen varierar. Dessa störningssignaler från ytan och växlingarna i givarens avstånd minskar betydligt kontrollens tillförlitlighet. Detta problem accentueras speciellt vid automatiserad virvelströmskontroll av en räls.

Juho Rajamäki, Minnamari Vippola and Antti Nurmikolu: Eddy-current inspection in rail condition monitoring. Finnish Transport Agency, Technology and Environment. Helsinki 2016. Research reports of the Finnish Transport Agency 27/2016. 41 pages and 1 appendix. ISSN-L ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-269-2.

Summary

In Finland, rail inspection is primarily based on visual and ultrasonic inspection. Visual inspection provides an overview of the condition of the track and ultrasonic inspection can be used to detect internal rail defects. However, the depth of cracks near the surface cannot be measured reliably with ultrasonic inspection. Eddy-current inspection is suitable for measuring cracks near the surface, making it a complementary method to ultrasonic inspection.

Eddy-current inspection is based on detecting changes in the electromagnetic spectrum generated by the eddy-current sensor and the surface inspected. All electromagnetic changes in the sensor, the surface inspected or between the two cause a detectable change in the signal read with the eddy-current inspection device. This signal consists of both amplitude and phase (*rather the phase difference between output and input current phase, but here just the signal phase*). The most common variations detected with an eddy-current device result from surface damage or changes in sensor distance. These two can be reliably distinguished from each other by the phase difference between measured signals (*rather, the difference between the phase differences*).

With eddy-current inspection, defect size can be estimated by comparing the signal received from the defect to signals received from known reference defects. The reference defects must correspond with the defect inspected with regard to shape and size so that an estimate based on such a comparison can be considered reliable. Furthermore, the eddy currents generated by the eddy-current sensor must penetrate the entire depth of the crack on the surface so that the depth of the crack can be measured.

The penetration depth of eddy currents poses a problem in rail inspection because the ferromagnetism of steel limits eddy current penetration of the surface significantly. In principle, penetration depth can be improved by lowering the frequency of the alternating current. However, the noise in the signal increases at the same time and the phase of the signal received from defects approaches the phase of the signal generated by changes in sensor distance. For these reasons, frequencies of approximately 1 MHz are usually used in eddy-current inspections of steel pipes, for example, in which case the eddy currents penetrate an approximate depth of only 0.01 mm. Evaluating the depth of the defect is thus based only on the amplitude of the signal.

Eddy-current inspection of rails is problematic because rail residual stresses and the work-hardened structure of the surface cause disturbance signals. Furthermore, it is very difficult to maintain a constant distance between the sensor and the surface during rail inspection because the surface of the rail is not even and the rail profile varies. These surface disturbance signals and variations in sensor distance reduce the reliability of the inspection significantly. This problem is particularly pronounced in automated eddy-current inspection of rails.

Esipuhe

Tämä raportti on yhteenveto kiskon pyörrevirtatarkastusta käsittelevästä esiselvityksestä. Se on tehty osana TERA2-tutkimusohjelmaa (Tutkimusohjelma Elinkaariteho-kas Rata 2) ja se liittyy kiskovikoihin keskittyneeseen osakokonaisuuteen. Raportti on tehty Tampereen teknillisellä yliopistolla Liikenneviraston tilauksesta ja yhteyshenkilönä Liikennevirastossa on toiminut Tuomo Viitala.

Tämä raportti on osa laajempaa tutkimusta, jossa selvitetään vierintäväsytymisen vaikutusta kiskojen käyttöikään Suomen rautateillä. Samaan aihealueeseen liittyvät myös Tampereen teknillisen yliopiston raportti, joka on julkaistu LIV:in raportti-sarjassa: "Ratakiskon elinkaari" sekä muut Tampereen teknillisen yliopiston raportit: "Kiskon koneellisen ultraäänitarkastuksen sovellettavuus; kirjallisuusselvitys", "Ratakiskojen tutkiminen Barkhausen kohina -menetelmällä", "Selvitys ratakiskojen ominaisuuksista Suomen rataverkolla; Kiskonäytteiden laboratoriokarakterisointi" ja "Yhteenveto kiskon vierintäväsytymiseen liittyvästä kansainvälisestä tutkimuksesta". Lisäksi vuoden 2016 aikana valmistuu aiheeseen liittyvä ja laajaan mittausaineistoon perustuva väitöstutkimus, joka kulkee työnimellä: "Vierintäväsytymisen Suomen rataverkolla".

Helsingissä toukokuussa 2016

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto

Sisällys

1	JOHDANTO	9
2	PYÖRREVIRTATARKASTUKSEN PERUSTEET	11
2.1	Sähköfysiikan perusteet.....	11
2.1.1	Lorentzin voima ja Maxwellin yhtälöt.....	12
2.1.2	Sähkötekniikassa käytettävät yksiköt	14
2.1.3	Vaihtovirta, vaihekulma ja impedanssi	16
2.2	Pyörrevirtalaitteiston rakenne ja toiminta.....	19
2.2.1	Pyörrevirtalaitteisto.....	19
2.2.2	Pyörrevirta-anturit	21
3	SÄRÖJEN HAVAITSEMINEN JA ARVIOINTI.....	23
3.1	Säröstä saatava signaali	23
3.1.1	Mittausparametrien vaikutus.....	24
3.1.2	Anturityypin vaikutus	27
3.2	Säröhavainnon syvyyden arvioiminen.....	28
4	KISKON HAMARAN VIKAHAVAINTOJEN TULKITSEMINEN.....	32
4.1	Vikojen tarkastelusyvyys kiskossa	32
4.2	Hamaran pinnan tarkastuksen ongelmat.....	33
4.2.1	Valmistukseen liittyvät ominaisuuksien vaihtelut.....	33
4.2.2	Käytön aiheuttamat ominaisuuksien vaihtelut.....	34
4.3	Vikasignaalien erottaminen muista signaaleista	36
5	YHTEENVETO.....	38
	LÄHTEET	39
	LIITTEET	
Liite 1	Tässä työssä hyödynnettävät sähkötekniikan peruskäsitteet	

Käytetyt merkinnät ja määritelmät

δ	standarditunkeumasyyvyys
ϵ_0	tyhjiön permittiivisyys
θ	vaihekulma
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
μ_r	suhteellinen permeabiliteetti
σ	johtavuus
Φ_B	magneettivuo
Φ_E	sähkökentän vuo
χ_m	magneettinen susceptibiliteetti
ω	kulmanopeus
A	amplitudi
A	pinta-ala
B	magneettivuon tiheys
C	kapasitanssi
dB	desibeli
E	sähkökenttä
f	taajuus
F	voima
Fe_3O_4	magnetiitti
H	magneettikentän voimakkuus
Hz	hertsi
i	hetkellinen virta
I	virta
l	pituusalkio
L	induktanssi
q	varaus
Q	kokonaisvaraus
q_{encl}	pinnan sisäänsä sulkema varaus
r	säde
R	resistanssi
t	aika
U	jännite
v	nopeus
V	voltti, potentiaalin ja jännitteen yksikkö
WEL	White-Etching-Layer
x	etäisyys pinnasta
X_C	kapasitiivinen reaktanssi
X_L	induktiivinen reaktanssi
Z	impedanssi
Z_x	tuntematon impedanssi

1 Johdanto

Tavallisesti kaikki rakenteet suunnitellaan kestävänsä koko käyttöikänsä muokkauksittomina tai ilman että näissä olevat säröt kasvavat vaaralliseen mittaan koko elinkaarensa aikana. Kisko on toiminnaltaan hyvin poikkeuksellinen kuormaa kantava rakenne, koska pyörä-kisko kontaktin jännitykset ylittävät kiskoteräksen myötölujuuden, mutta kuitenkin historiallisista syistä kisko mitoitetaan tarvittavan jäykkyyden mukaan. Kiskon käyttöikä määräytyy todellisen kulumisen tai murtuman kasvun mukaan. Tämän vuoksi kiskon kunnan valvonta ja siinä käytettävät menetelmät ovat keskeisiä radan käytön turvallisuuden kannalta (Zerbst et al. 2005).

Yleisimmät radan tarkastusmenetelmät ovat kiskon visuaalinen tarkastus ja ultraäänitarkastus. Näiden avulla voidaan havaita suuret kiskon pintaviat sekä kiskon sisäiset viat. Molemmat näistä tarkastuksista tehdään tavallisesti kävelytarkastuksina, jossa tarkastaja kävelee koko radan läpi suorittaen samalla ultraäänitarkastusta. Nämä menetelmät soveltuvat hyvin vakavien vikojen etsimiseen, mutta heikosti radan kunnan kehittymisen seurantaan, koska subjektiivisia havaintoja on vaikea kvantifioida. Lisäksi kävelytarkastus on hidasta työtä, jota vain ammattitaitoiset tarkastajat voivat tehdä (Kauppinen 2010).

Pyörrevirtatarkastus on mielenkiintoinen radanpidon kannalta, koska se voidaan automatisoida ja sen avulla on mahdollista seurata radan kunnan kehittymistä. Pyörrevirta-anturien nopea vaste mahdollistaa myös radan tarkastamisen suurilla nopeuksilla täysin automatisoidussa mittausvaunussa, mikäli erilaiset tähän liittyvät tekniset ongelmat pystytään ratkaisemaan (Pohl et al. 2006). Pyörrevirtatarkastus tulee kuitenkin olemaan aina muita tarkastuksia täydentävä menetelmä, koska pyörrevirtalaitteistojen avulla ei ole mahdollista havaita kiskon sisäisiä vikoja tai murtumia.

Radan kunnan valvonnassa pyörrevirtalaitteistojen avulla mitataan kiskon pinnassa olevien säröjen lukumäärää ja syvyyttä. Pyörrevirtatarkastusta voidaan käyttää myös kiskonhionnan laadun valvonnassa mittaamalla säröjen lukumäärää ennen hiontaa ja tämän jälkeen. Pyörrevirtatarkastuksen tarkkuus on huomattavasti parempi kuin visuaalisen tarkastuksen ja datan kerääminen mahdollistaa kokonaisten rataosuuksien kunnan ja tämän kehittymisen monitoroimisen.

Pyörrevirtatarkastusta verrataan usein ultraäänitarkastukseen, koska molempien avulla paikannetaan kiskossa olevia säröjä. Nämä ovat kuitenkin toiminnaltaan ja käytöltään hyvin erilaisia ja toisiaan täydentäviä menetelmiä. Käytännössä pyörrevirtatarkastuksella etsitään alle 3 mm syvyydellä olevia murtumia ja ultraäänitarkastuksella tätä syvemmällä olevia murtumia. Koska pyörrevirtatarkastuksessa ja ultraäänitarkastuksessa ei ole yhdistäviä tekijöitä, näitä ei oikeastaan kannata vertailla.

Pyörrevirtatarkastus on pintaherkkä sähkömagneettinen ainetta rikkomaton tarkastusmenetelmä, jonka avulla voidaan havaita kiskon pinnassa olevia säröjä ja arvioida näiden vakavuutta. Pyörrevirtatarkastus on sekä nopea että jatkuva menetelmä, jossa mittausdata voidaan analysoida heti tai tallentaa myöhempää analysointia varten. Se on herkkä menetelmä, jonka erottelukyky voi olla jopa millimetrin osia. Pyörrevirtatarkastus voidaan suorittaa kiskolle käytännössä kaikissa olosuhteissa. Kuvassa 1 on esitetty kylmässä tapahtuvaa kiskon pyörrevirtatarkastusta.



Kuva 1. Kiskon pyörrevirtatarkastus Venäjällä (Railway company PUTEETS 2013).

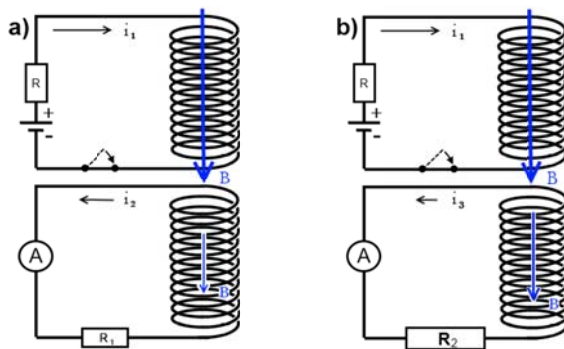
Pyörrevirtatarkastusta voidaan käyttää materiaalien erottamiseen toisistaan, poikkeamien havaitsemiseen materiaaliominaisuuksissa, pinnoitteiden ja ohuiden kappaleiden dimensioiden mittaamiseen, korroosiovaurioiden etsimiseen ja säröjen havaitsemiseen. Kiskojen tarkastuksessa pyörrevirtalaitteistoja käytetään kuitenkin lähinnä säröjen havaitsemiseen.

Tämän työn tarkoitus on esitellä pyörrevirtatarkastuksen mahdollisuudet ja rajoitteet ratakiskojen kunnon valvonnassa. Tämä raportti jakautuu kolmeen osaan, joista ensimmäinen käsittelee pyörrevirtatarkastuksen fysikaalisia perusteita tärkeimmiltä osiltaan, toinen säröjen havaitsemista käytännön laitteistolla ja kolmas kiskon tarkastukseen liittyviä erityispiirteitä. Kaikissa luvuissa käsittely on pyritty pitämään suppeana, jotta pyörrevirtatarkastuksen pääpiirteet olisivat helposti hahmotettavissa. Tämän raportin ei ole tarkoitus toimia ohjeena käytännön pyörrevirtatarkastukselle. Pyörrevirtatarkastus on ammattitaitoa vaativa ainetta rikkomaton tarkastusmenetelmä.

2 Pyörrevirtatarkastuksen perusteet

Pyörrevirtatarkastus perustuu materiaalin sähkömagneettisen vasteen tutkimiseen ulkoisen magneettikentän avulla. Mikäli tätä kokonaisuutta halutaan ymmärtää, sähkömagnetismin peruskäsitteet on tunnettava, mutta näiden syvämpi hallitseminen ei ole välttämätöntä. Tässä työssä fysikaaliset perusteet esitellään vain niiltä osin kuin niitä tarvitaan mitattujen signaalien tulkinnessa ja tarkastukseen liittyvien rajoitteiden ymmärtämisessä.

Pyörrevirtatarkastuksen periaate on esitetty piirikaavioiksi yksinkertaistettuna kuvassa 2. Tässä ylemmät piirit esittävät tutkivaa anturia, alempi piiri tutkittavaa materiaalia ja alemmassa piirissä oleva virtamittari A mittaavaa laitteistoa. Kun kuvassa olevat ylemmät piirit suljetaan, ne synnyttävät magneettikentän B , joka ulottuu alemmassa piirissä olevaan kelaan. Alemmaan piiriin syntyy tällöin induktiovirta, koska magneettinen vuorovaikutus yhdistää piirit. Tämä induktiovirta vastustaa alkuperäisen tilanteen muutosta. Induktiovirta on suurempi kuvassa 2 a, koska kuvan 2 b vastus on suurempi ($R_1 < R_2$).

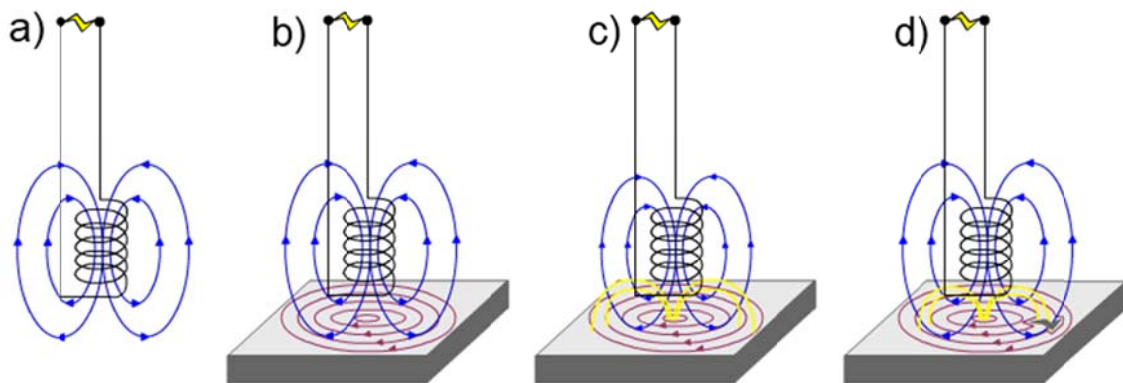


Kuva 2. Kahden piirin välinen sähköinen vuorovaikutus

Kuvassa 2 pienempi vastus R_1 kuvaa ehjää materiaalia, ja R_2 materiaalia jossa on vika. Vian havaitseminen perustuu tässä yksinkertaistetussa tapauksessa sen aiheuttamaan resistanssin muutokseen. Jos virtamittaria A luetaan jatkuvasti ja tässä havaitaan muutos, voidaan päätellä että piirin resistanssi on muuttunut. Jos resistanssi muutos johtuu viasta, se voidaan havaita kyseisellä laitteistolla. Käytännössä pyörrevirtalaitteistot ovat jonkin verran monimutkaisempia kuin kuvassa 2 on esitetty, mutta niiden toimintalogiikka on sama.

2.1 Sähköfysiikan perusteet

Kuvassa 3 on esitetty pyörrevirtalaitteiston toiminta vaiheittain (NDT Resource Center). Kuvassa 3 a) vaihtovirta tarkastavan anturin kelassa synnyttää muuttuvan magneettikentän, joka puolestaan aiheuttaa muuttuvan sähkökentän anturin alapuolelle. Tämä sähkökenttä saa johtavassa kappaleessa olevat vapaat varaukset liikkumaan, eli synnyttää kuvassa 3 b) punaisella esitetyn ympyrän muotoisen virtajakauman. Kuvan 3 c) kohdassa tämä virtajakauma aiheuttaa oman keltaisella esitetyn magneettikenttensä, joka on vastakkaisuuntainen anturin magneettikenttään nähden. Vastakkaisuuntainen magneettikenttä sekä heikentää anturin magneettikenttää että aiheuttaa varausten kulkua vastustavan voiman anturiin, mikä havaitaan anturin impedanssin muutoksena.



Kuva 3. Pyörrevirtalaitteiston sähköfysiikka vaiheittain esitettynä (NDT Resource Center).

Muutos jossain kohdassa yllä mainittua ketjua aiheuttaa muutoksen lopulliseen impedanssiin. Tämä nähdään kuvassa 3 d). Alustassa oleva harmaa särö vastustaa punaisten pyörrevirtojen kulkua, mikä pienentää keltaista magneettikenttää ja kasvattaa sinistä magneettikenttää. Muutoksen suuruudesta ja sen aiheuttamasta vaihesiirtymästä päätellään, mikä muutoksen on aiheuttanut. Päättely perustuu sekä tarkastajan kokemukseen että referenssikappaleista saataviin signaaleihin. Päätelmien pohjana on kuitenkin sähköfysiikan perusteiden hallitseminen (Saariaho 1995).

Tämän luvun pääpaino on pyörrevirtatarkastuksen kannalta oleellisten sähkömagneettisten ilmiöiden esittelyssä. Ilmiöt käsitellään ehjänä kokonaisuutena, mutta näihin liittyvä asian ymmärtämisen kannalta tarpeeton laskenta sivuutetaan. Käsitteily pidetään mahdollisimman suppeana, minkä vuoksi muiden lähteiden käyttäminen on suositeltavaa, mikäli jotkin yksityiskohdat kaipaavat tarkempaa selvitystä. Esimerkiksi Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics (Young et al. 2008) esittää sähköfysiikan perusteet hyvin kattavasti ja ymmärrettävällä tavalla.

Tässä luvussa esitellään monia sähköä ja magnetismia käsitteleviä yksiköitä ja kaavoja. Kokonaisuuden hahmottamisen tueksi liitteessä 1 on annettu yhteenveto sähkön ja magnetismin peruskäsitteistä. Sen avulla on helpompaa hahmottaa eri suureiden suhdetta toisiinsa, kuten esimerkiksi miten sähkökentän voimakkuus liittyy jännitteeseen.

2.1.1 Lorentzin voima ja Maxwellin yhtälöt

Lorentzin voima ja Maxwellin yhtälöt muodostavat sähkömagnetismin aksiomat¹, eli ne ovat perusteita, joita ei voida johtaa muista laeista. Sähkö ja magnetismi noudattavat näitä lakeja. Lorentzin voima ja Maxwellin yhtälöt voidaan rinnastaa muun muassa Newtonin lakeihin tai termodynamiikan lakeihin, koska ne luovat samanlaisen perustan sähköfysiikalle kuin Newtonin lait luovat mekaniikalle. Tämän vuoksi Lorentzin voiman ja Maxwellin yhtälöiden ymmärtäminen on perusedellytys sähkömagnetismin ymmärtämiselle (Young et al. 2008).

Lorentzin voima ja Maxwellin yhtälöt on esitetty taulukossa 1 (Young et al. 2008). Tässä Maxwellin yhtälöt on esitetty integraalimuodossaan yksinkertaisuuden vuoksi.

¹ Tarkalleen ottaen Lorentzin voima ei ole täysin itsenäinen Maxwellin yhtälöistä, koska Gaussin laista sähkökentille voidaan johtaa Coulombin voima.

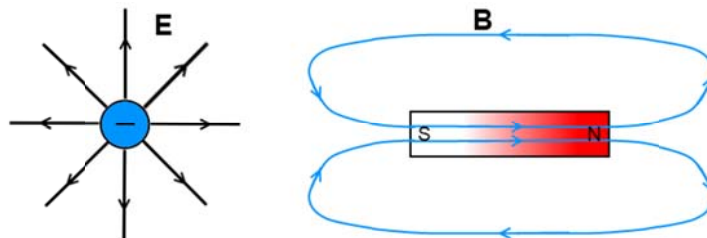
On kuitenkin hyvä tietää, että yhtälöt voidaan esittää tarvittaessa myös muunlaisissa muodoissa, esimerkiksi differentiaalimuodossa. Kyse on kuitenkin samoista yhtälöistä. Yhtälöissä lihavoidut kirjaimet tarkoittavat vektoreita ja lihavoimattomat kirjaimet skalaareita.

Taulukko1. Lorentzin voima ja Maxwellin yhtälöt (Young et al. 2008).

Yhtälön nimi	Yhtälö	
Lorentzin voima	$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$	(1)
Gaussin laki sähkökentille	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$	(2)
Gaussin laki magneettikentille	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$	(3)
Ampèren laki	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$	(4)
Faradayn laki	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	(5)

Yhtälö 1 on Lorentzin voima ja se kuvaa voimaa, jonka sähkö- ja magneettikenttä (\mathbf{E} ja \mathbf{B}) kohdistavat varaukseen q . Yhtälö kertoo, että molemmat näistä voimista ovat suoraan verrannollisia varauksen suuruuteen ja kenttien voimakkuuteen. Lisäksi se kertoo, että magneettikentän aiheuttama voima riippuu myös varauksen nopeudesta (\mathbf{v}), ja se vaikuttaa kohtisuoraan nopeuden ja magneettikentän määrittelemään tasoon nähden (Young et al. 2008).

Yhtälöt 2 ja 3, eli Gaussin lait, kuvaavat kuinka sähkökenttä lähtee negatiivisesta varauksesta ja päättyy positiiviseen, mutta magneettikenttä ei lähde mistään tai päädy mihinkään. Magneettikenttä ei käyttyä samalla tavalla kuin sähkökenttä, koska ei ole olemassa negatiivista tai positiivista magneettista alkiota. Jos magneettikenttää kuvattaisiin kenttäviivoilla, nämä olisivat Gaussin lain mukaan suljettuja silmukoita (Young et al. 2008). Asian havainnollistamiseksi kuvassa 4 on esitetty varauksesta lähteviä sähkökentän kenttäviivoja ja kestopagneetin lähteviä kenttäviivoja.



Kuva 4. Varauksen aiheuttama sähkökenttä ja kestopagneetin magneettikenttä.

Ampèren laki yhtälössä 4 esittää kuinka liikkuva varaus synnyttää magneettikentän ympärilleen. Magneettikentän voimakkuus on suoraan verrannollinen hetkelliseen virtaan i_c , eli liikkuvien varausten määrään ja nopeuteen. Jälkimmäinen termi kuvaa kuinka muutos sähkökentässä ($d\Phi_E/dt$) synnyttää magneettikentän samalla tavalla kuin liikkuva varaus. Näillä tavoilla syntyneet magneettikentät ovat keskenään identtisiä (Young et al. 2008). Kuvassa 4 esitetty magneettikenttä syntyy elektronien kulmaliikemäärästä, joka on kohtisuorassa magneettikentän kenttäviivoja vastaan.

Yhtälö 5 on Faradayn laki, joka kuvaa kuinka muutos magneettikentässä ($d\Phi_B/dt$) synnyttää sähkökentän, joka vastustaa muutosta. Tämä on symmetrinen Ampèren lain kanssa, eli muutos sähkökentässä aiheuttaa muutoksen magneettikentässä (Young et al. 2008).

Yhtälöt 4 ja 5 yhdistävät sähkön ja magnetismin toisiinsa. Sähkökentän muutos johtaa magneettikentän muutokseen. Vastaavasti magneettikentän muutos johtaa sähkökentän muutokseen. Tällainen sähkökentän ja magneettikentän välinen vaihtelu synnyttää sähkömagneettisen säteilyn (Young et al. 2008). Sähkömagneettisen säteilyn ymmärtäminen ei ole välttämätöntä pyörrevirtatarkastuksen kannalta, joten siihen ei enää palata tässä selvityksessä.

2.1.2 Sähkötekniikassa käytettävät yksiköt

Varaus on sähkötekniikan perusyksikkö ja se synnyttää sähköisen voiman. Kahden varauksen välillä vaikuttaa aina Coulombin lain mukainen sähköinen voima. Tämä voima on suoraan verrannollinen varauksien suuruuteen ja näiden etäisyyden neliöön. Coulombin laki tyhjiössä on esitetty yhtälössä 6. Yhtälössä F on coulombin voima, q_1 sekä q_2 varaus, r varausten välinen etäisyys, ja ϵ_0 tyhjiön permittiivisyys (Young et al. 2008).

$$F = \epsilon_0 \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (6)$$

Coulombin voima ulottuu kaikkialle varauksen ympäristöön, minkä vuoksi sen voidaan ajatella luovan ympärilleen sähköisen kentän. Varauksen liikuttamiseen sähkökentässä tarvitaan energiaa samalla tavalla kuin kappaleen nostamiseen maan gravitaatiokentässä. Tästä johtuen varauksella on sijaintiin liittyvää potentiaalienergiaa sähkökentässä. Kun tämä potentiaalienergia jaetaan liikutettavan varauksen suuruudella, saadaan puhtaasti sähkökentän energiaa kuvaava suure. Tätä suureta kutsutaan sähkökentän potentiaalienergiaksi tai pelkästään sähkökentän potentiaaliksi. Potentiaali on absoluuttinen sähköisen energian määrä sähkökentän yhdessä pisteessä. Sähkökentän potentiaalinen yksikkö on voltti (V) (Young et al. 2008).

Kaikki sähkökentän potentiaalienergia ei ole aina käytettävissä. Kahden potentiaalisen välistä eroa kutsutaan jännitteeksi (U), ja se kuvaa käytettävissä olevan energian määrää. Myös jännitteen yksikkö on myös voltti (V). Sähköisen potentiaalisen ja jännitteen ero on se, että jännite on suhteellinen suure ja sähköinen potentiaali absoluuttinen.

Jännite saa varauksen kuljettajat liikkumaan. Johtimen poikkipinnan yli liikkuvan kokonaisvarauksen määrää (Q) aikayksikössä (t) sanotaan virraksi ja sen yksikkö on ampeeri (A). Tämä on esitetty yhtälössä 7. Metallissa olevan jännitteen ja virran suhdetta sanotaan metallin resistanssiksi ja sen yksikkö on ohmi (Ω). Usein puhutaan

myös metallin johtavuudesta, joka on resistanssin käänteisluku. Virran (I), jännitteen (U), resistanssin (R) ja johtavuuden (σ) keskinäiset suhteet on myös esitetty yhtälössä 7 (Young et al. 2008).

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{U}{R} = \sigma U \quad (7)$$

Liikkuva varaus ja johtimessa oleva virta aiheuttavat ympäristöön magneettikentän. Magneettikenttä on kohtisuorassa virran liikkeen suuntaan nähden ja se heikkenee etäisyyden neliöön samalla tavalla kuin sähkökenttäkin. Magneettikenttä aiheuttaa varaukseen magneettisen voiman. Tämä on esitetty yhtälössä 8.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (8)$$

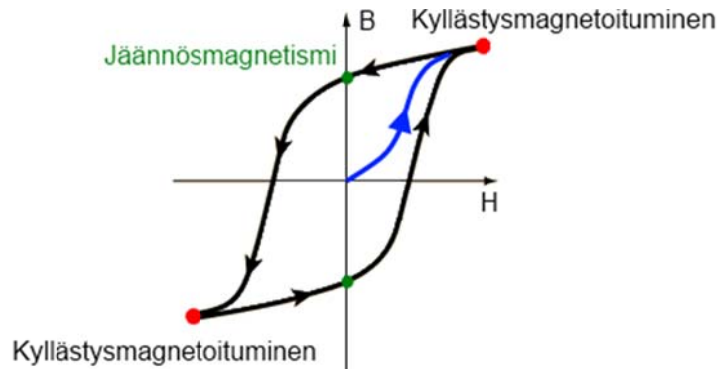
Yhtälössä 8 \mathbf{F} on magneettinen voima, q varaus, \mathbf{v} nopeus ja \mathbf{B} magneettivuon tiheys. Magneettikentän aiheuttama voima riippuu siis varauksen suuruudesta, tämän nopeudesta, magneettivuon tiheydestä, sekä magneettikentän ja nopeuden välisestä kulmasta. Ristitulo tarkoittaa, että voima on kohtisuorassa nopeutta ja magneettikenttää vastaan (Young et al. 2008).

Magneettikentän voimakkuus (H) materiaalin sisällä on erisuuruinen kuin tyhjiössä. Tämän vuoksi magneettikentän voimakkuutta väliaineessa mitataan magneettivuon tiheydellä (B). Magneettikentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden yhteys ilmaistaan yhtälöllä 9. Tässä μ_r on suhteellinen permeabiliteetti, μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/A/m) ja χ_m magneettinen susceptibiliteetti. Magneettinen susceptibiliteetti on väliaineen ominaisuus, sen arvo on tavallisesti hyvin lähellä ykköstä, ja sen suuruus on magneettikentän voimakkuudesta riippumaton. Tällöin magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden välillä vallitsee yksinkertainen yhteys ($B = 4\pi \cdot 10^{-7} H$).

$$B = \mu_r H \quad , \text{ missä } \mu_r = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (9)$$

Magneettinen vuorovaikutus on selvästi monimutkaisempi kuin sähköinen vuorovaikutus, koska sen aiheuttama voima riippuu magneettivuon tiheyden lisäksi varauksen nopeudesta. Magneettikenttä ei voi myöskään tehdä työtä vapaasti liikkuvaan varaukseen, koska sen aiheuttaman voiman suunta on aina varauksen kulkusuuntaan nähden kohtisuorassa. Koska työtä ei tehdä, ei varauksen nopeus muutu eikä energiaa siirry. Tästä syystä magneettikentällä ei ole samanlaista potentiaalia kuin sähkökentällä (Young et al. 2008). Magneettinen vuorovaikutus kannattaa käsitellä erillään sähköisestä vuorovaikutuksesta sekaannusten välttämiseksi, aina kun tämä on mahdollista.

Magneettinen vuorovaikutus tunnetaan parhaiten kestromagneeteista, joihin jää sisäinen magneettikenttä B ulkoisen magneettikentän H poistuttua. Kestomagneetit ovat ferromagneettista (tai ferrimagneettista) materiaalia ja näiden magneettinen susceptibiliteetti χ_m on väliltä 10^2 – 10^6 materiaalista riippuen. Näillä materiaaleilla magneettinen susceptibiliteetti myös riippuu magneettikentän voimakkuudesta. Tämä johtaa magneettiseen hystereesiin, jota on havainnollistettu kuvassa 5. Teräs on yleisin ferromagneettinen ja magnetiitti (Fe_3O_4) yleisin ferrimagneettinen materiaali (Callister 2003).



Kuva 5. Magneettinen hystereesi.

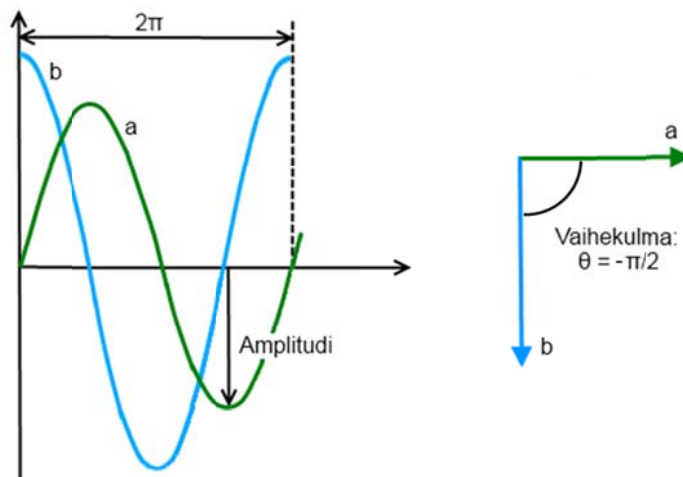
Kun ferromagneettiseen kappaleeseen tuodaan ulkoa magneettikenttä H , sen sisäinen magneettikenttä B kasvaa ensin kuvan 5 sinisen viivan osoittamalla tavalla. Kasvu on aluksi hidasta, mutta nopeutuu tietyn kynnyksarvon jälkeen merkittävästi, kunnes se taas hidastuu. Punaisen pisteen kohdalla materiaali on kyllästysmagnetoitunut, jonka jälkeen magneettikentän voimakkuuden nostaminen kasvattaa magneettivuon tiheyttä lineaarisesti (Callister 2003).

Jos ulkoisen magneettikentän suuntaa vaihdellaan ääriarvojen välillä, magneettivuon tiheys ferromagneettisessa aineessa seuraa mustia viivoja. Jos ulkoinen magneettikenttä poistetaan kokonaan, materiaalin sisälle jää magneettikenttä, jonka magneettivuontiheys on vihreän pisteen kohdalla. Kestomagneetit ovat tällaisessa tilassa, minkä vuoksi niillä on magneettisia ominaisuuksia ilman ulkoista kenttää. Kestomagnetismi voidaan poistaa muokkaamalla, kuumentamalla tai vaihtelemalla ulkoisen magneettikentän suuntaa samalla kuin amplitudia pienennetään (Callister 2003).

2.1.3 Vaihtovirta, vaihekulma ja impedanssi

Vaihtovirrassa jännitteen napaisuus ja jännitteen suuruus vaihtelee jatkuvasti. Kotitalouksissa käytettävässä vaihtovirrassa jännite vaihtaa suuntaa 100 kertaa sekunnissa arvojen ± 325 V välillä. Tämä sanotaan 50 Hz taajuiseksi 230 V vaihtovirraksi. Tässä 230 V on tehollisarvo sinimuotoisesta 325 V vaihtojännitteestä, joka saadaan laske- malla todellisesta jännitteestä neliöllinen keskiarvo. Vaihtojännite antaa tehoa kuor- maan yhtä paljon kuin sen tehollisarvoinen tasajännite antaisi (Young et al. 2008).

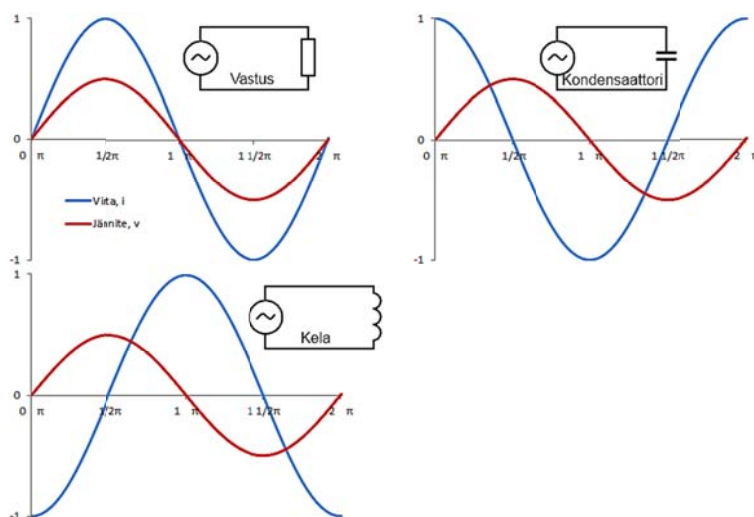
Tehollisarvoa käytetään usein vaihtovirralla toimivissa laitteissa, mutta vaihtovirran laskennassa käytetään tämän sijaan hetkellistä virran arvoa. Toistuvaa vaihtovir- tasiignaalia kuvataan yhdellä taajuusjaksolla. Tarkempi jännitteen arvo saadaan tästä vaiheen ja amplitudin avulla. Taajuusjakson pituudeksi on sovittu 2π eli 360° , koska tavallinen verkkovirta on sinimuotoista, jolloin sen voidaan kuvata kertomalla ampli- tudi taajuusvaiheen sinillä ($A\sin(\theta)$), missä on A amplitudi ja θ vaihekulma (Young et al. 2008). Kuvassa 6 on esitetty kaksi sinimuotoista vaihtovirtasiignaalia.



Kuva 6. Kaksi saman taajuista vaihtovirta signaalia ja näiden välinen vaihekulma.

Kuvan 6 signaalien a ja b taajuus on sama, mutta nämä ovat eri vaiheessa keskenään. Vaihe-ero eli vaihekulma on kuvassa $-\pi/2$, mikä tarkoittaa että signaali b on signaalia a jäljessä 90° . Vaihe-ero on vaihtovirtaan liittyvä suure, eikä sitä kannata sekoittaa tasavirtaan millään tavalla. Vaihe-ero on tärkeä suure pyörrevirtatarkastuksessa, koska se antaa tietoa särön syvyydestä. Käytännössä vaihe-eroa havainnoidaan vertaamalla syötetyn jännitteen ja mitatun virran vaihetta toisiinsa (Saariaho 1995).

Vaihe-eroa mitataan yleensä virtapiirin ohjaavan jännitteen ja virtapiirin virran välillä. Vaihe-ero syntyy piiriin tässä olevien kondensaattorien ja kelojen vaikutuksesta. Vastuksella ei ole samanlaista vaikutusta piirin vaiheeseen. Vastuksen, kondensaattorien ja kelan vaikutukset virran vaiheeseen on esitetty kuvassa 7. Kuvassa punaisella merkitty jännite on piiriin syötetyn ohjaavan jännitteen arvo.



Kuva 7. Ohjausjännite ja virta yksinkertaisissa piireissä.

Kondensaattori kerää varaus-eroa ja vapauttaa tämän virran suunnan kääntyessä. Tällöin virta on suurimmillaan heti, kun jännitteen suunta kääntyy. Vastaavasti kela hidastaa varausten kulkua. Kela hidastaa varausten kulkua, koska sähkökentän energia muuttuu magneettikentäksi, josta se taas purkautuu takaisin sähkökentäksi virran laskiessa. Kondensaattorien ja kelan aiheuttamien vaihesiirtymien suuruus on $\pi/2$,

mutta näiden suunnat ovat vastakkaiset. Kelan aiheuttama vaihesiirtymä on $+\pi/2$, koska jännitteen huippuarvot tulevat tämän verran ennen virran huippuarvoja. Vastaavasti kondensaattori aiheuttaa $-\pi/2$ vaihesiirtymän, koska virta saa maksimiarvonsa ennen jännitettä (NDT Resource Center, Young et al. 2008).

Kondensaattori ja kela vastustavat vaihtovirtaa eri tavalla kuin pelkkä vastus. Näiden vaikutusta virtaan kuvataan kapasitiivisella reaktanssilla (X_C) ja induktiivisella reaktanssilla (X_L). Reaktanssien ja resistanssin yhteisvaikutusta sanotaan piirin impedanssiksi (Z). Impedanssi on esitetty yhtälössä 10. Reaktanssien laskentakaavat on esitetty yhtälöissä 11 ja 12. Näissä f on taajuus, ω kulmanopeus, C kondensaattorin kapasitanssi ja L kelan induktanssi. Kapasitanssi ja induktanssi kuvaavat kondensaattorin ja kelan voimakkuutta (Young et al. 2008).

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (10)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C} \quad (11)$$

$$X_L = 2\pi f L = \omega L \quad (12)$$

Impedanssi lasketaan resistanssista ja reaktansseista pythagoraan lauseen avulla yhtälön 10 mukaisesti. Tämä on mahdollista, koska resistanssi ei vaikuta mitattavan virran vaiheeseen ja reaktanssit aiheuttavat $\pi/2$ siirtymän virran vaiheeseen (Young et al. 2008). Impedanssin on esitetty kuvassa 8. Pyörrevirtatarkastuksessa mitataan yleisesti impedanssin muutosta, ja tätä käytetään induktiivisen reaktanssin laskemiseen. Induktiivinen reaktanssi on pyörrevirtatarkastuksessa oleellinen, koska mittalaitteen resistanssi on vakio, jolloin reaktanssi kertoo muutoksesta mittakelan magneettikentässä (Saariaho 1995).

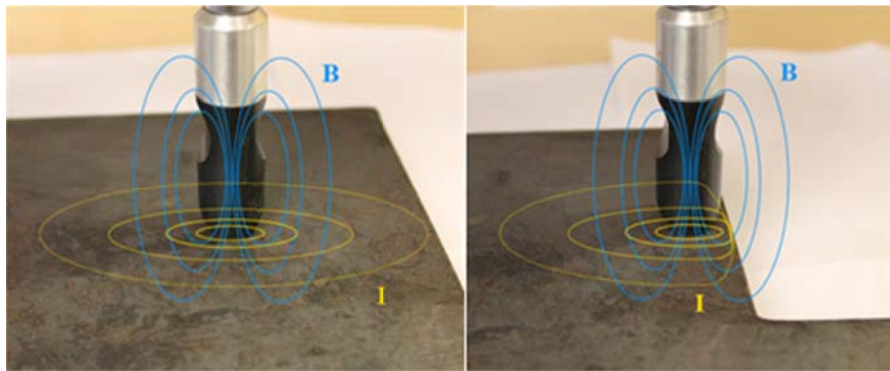


Kuva 8. Impedanssin muodostuminen ja vaihekulma.

Induktanssi, induktiivinen reaktanssi ja impedanssi menevät helposti sekaisin keskenään. Tämä voi tuottaa ongelmia tulevassa käsittelyssä, joten näiden termien erot on hyvä kerrata. Induktanssi kuvaa kelan muodosta johtuvaa kykyä vastustaa varausten kulkua. Induktiivinen reaktanssi on todellisuudessa syntyvä vastus kyseisellä taajuudella. Impedanssi on koko virtapiirin kokonaisvastus.

2.2 Pyörrevirtalaitteiston rakenne ja toiminta

Pyörrevirtatarkastuslaitteisto kehittää vaihtovirtasignaalin, joka johdetaan anturina toimivaan kelaan ja sieltä takaisin analysoitavaksi. Analysointi ei perustu monimutkaiseen materiaalin rakenteen ja sähköisten ominaisuuksien väliseen yhteyteen, vaan poikkeamien havaitsemiseen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 9.



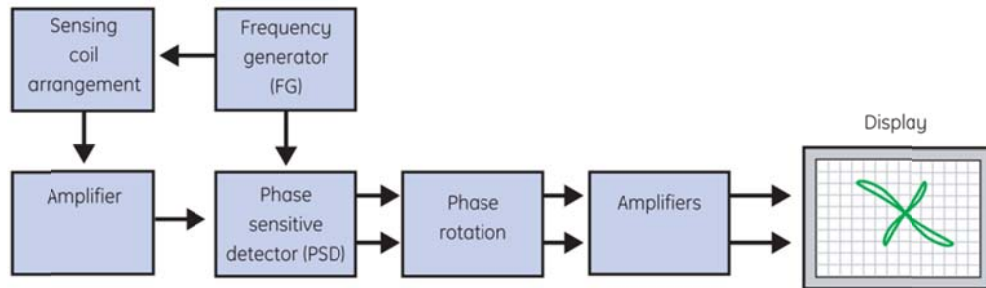
Kuva 9. Magneettikenttä ja virrat pyörrevirta-anturin läheisyydessä.

Pyörrevirta-anturi muodostaa ympäristöönsä muuttuvan magneettikentän, joka aiheuttaa ympyrämaisen sähkökentän. Johtavan kappaleen läheisyydessä tämä sähkökenttä liikuttaa varauksia, eli aiheuttaa virran. Tällä tavalla syntyneet virrat muistuttavat veteen syntyviä pyörteitä, minkä vuoksi niitä kutsutaankin pyörrevirroiksi (Saariaho 1995).

Pyörrevirtamittauksessa anturi viedään mitattavan pinnan lähelle ja analysoiva virtapiiri tasapainotetaan kuvassa 9 vasemmalla näkyvään tilanteeseen. Anturin ja ehjä materiaalin pinta muodostavat tällöin virtapiirin, koska ne vuorovaikuttavat magneettikentän välityksellä. Materiaalin tarkastuksessa anturia aletaan liikuttaa pintaa pitkin, jolloin anturista mitattava signaali pysyy samana niin kauan kuin pyörrevirrat pystyvät muodostumaan materiaaliin koko mitassa. Reunan tai särön läheisyydessä pyörrevirrat häiriintyvät, jolloin tasapaino järkkyy. Tämä muutos havaitaan anturin signaalissa palaavassa signaalissa (Hellier 2001).

2.2.1 Pyörrevirtalaitteisto

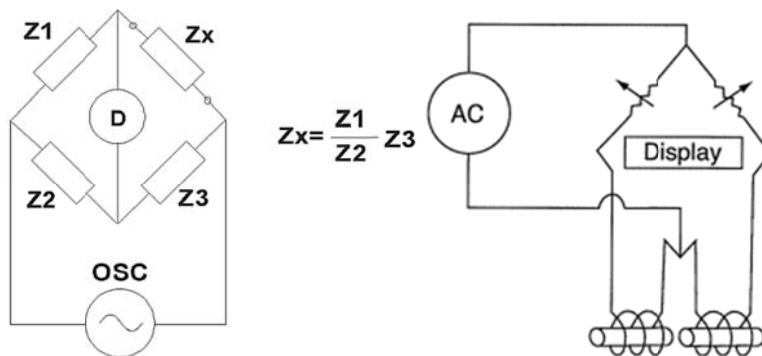
Pyörrevirtatarkastuslaitteisto on rakenteeltaan ja toiminnaltaan hyvin yksinkertainen. Se sisältää kolme toiminnallista kokonaisuutta, jotka ymmärtämällä laitteen toiminnan voi käsittää. Nämä ovat oskilloskooppi, anturi sekä tasapainotuspiiri. Näiden lisäksi pyörrevirtalaitteisto sisältää vahvistimia, signaalinkäsittelylaitteiston ja näytön (Saariaho 1995). Nämä osat on esitetty kuvassa 10 (GE Inspection Technologies 2005).



Kuva 10. Pyörrevirtalaitteiston osat (GE Inspection Technologies 2005).

Oskilloskooppi kehittää halutun jännitesignaalin anturille ja tasapainotuspiirille. Anturina voi toimia yksittäinen kela, mutta se voi olla myös useammasta kelasta koostuva hieman monimutkaisempi virtapiiri. Tasapainotuspiiri on periaatteeltaan yksinkertainen sähköiseen siltaan perustuva virtapiiri, jonka avulla käytetään anturin impedanssin amplitudi ja vaihekulma voidaan mitata.

Tasapainotusvirtapiiriä tarvitaan, jotta anturissa tapahtuvat impedanssin muutokset voitaisiin mitata. Kuvassa 11 on esitetty tasapainotusvirtapiirin periaatekaavio vasemmalla ja kaksi mittaavaa kelaä kytkettynä tällaiseen piiriin oikealla. Tällaisessa piirissä oleva tuntematon impedanssi Z_x voidaan laskea, kun piiri on tasapainossa, eli tunnistimen D virta on nolla. Piirin tasapainottaminen tapahtuu säädettävillä vastuksilla ja kondensaattoreilla. Tällainen tasapainottava piiri on tarkka lähellä tasapainoa, ja rajallisella impedanssin Z_x alueella, koska säädettävien komponenttien säätövara on rajallinen (Agilent Technologies).



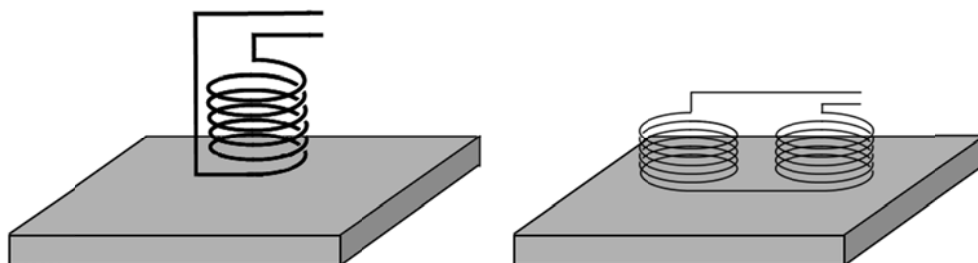
Kuva 11. Tuntematonta impedanssia mittaava silta vasemmalla (Agilent Technologies) ja kaksi mittaavaa kelaä kytkettynä tällaiseen piiriin oikealla (Hellier 2001).

Pyörrevirta-anturit pyritään rakentamaan puhtaasti induktiivisiksi kokonaisuuksiksi. Kapasitanssin muodostumista pyritään välttämään, koska se aiheuttaa vaihesiirtymää, joka sekoittaa mitattavaa signaalia. Lisäksi anturissa oleva kapasitanssi voi aiheuttaa piirin sähköistä resonointia korkeilla taajuuksilla, mikä lisää kohinaa ja voi rajoittaa käyttötaajuutta. Anturit täytyy suunnitella toimimaan tasapainotuspiirin käyttöalueella tarkastustaajuudella. Liian suuria taajuuksia ei voida käyttää, koska anturin impedanssi kasvaa liian suureksi. Liian matalien taajuuksien käyttöä rajoittaa kohinan lisääntyminen ja anturin kuumeneminen (Saariaho 1995).

Edellä esiteltyjen osien lisäksi pyörrevirtalaitteistossa on myös muita toiminnan kannalta oleellisia osia. Käytännössä nykyisissä pyörrevirtatarkastuslaitteistoissa on sisällä myös tietokone, joka hoitaa virtapiirin tasapainottamisen, sekä mitatun datan tallentamisen ja käsittelyn (Saariaho 1995). Näiden toiminnan tarkempi tunteminen ei ole kuitenkaan välttämätöntä pyörrevirtatarkastuksen perusteiden ymmärtämisen kannalta.

2.2.2. Pyörrevirta-anturit

Pyörrevirta-antureilla on kaksi eri toimintatapaa. Ne voivat olla absoluuttisia (absolute) tai vertailevia (differential). Absoluuttisissa antureissa mittakela toimii lähettimenä ja vastaanottimena, jolloin kaikki muutokset kelan magneettikentässä näkyvät signaalissa. Vertailevat anturit koostuvat kahdesta samanlaisesta yhdistetystä erisuuntaisesta kelasta, jotka muodostavat yhden signaalin. Signaali kuvaa tällöin kahden kelan keskinäistä eroa (Saariaho 1995, Hellier 2001). Kuvassa 12 on esitetty vasemmalla absoluuttinen- ja oikealla vertaileva-anturi.



Kuva 12. Anturin absoluuttinen toimintatapa vasemmalla ja vertaileva tapa oikealla.

Absoluuttisilla antureilla voidaan havainnoida hitaasti muuttuvia asioita, kuten materiaalin ominaisuuksien muutoksia, ja nopeita muutoksia kuten säröjä. Vertailevissa antureissa kelat sijaitsevat lähekkäin, jolloin ne havaitsevat vain nopeita muutoksia kuten säröjä. Vertailevilla antureilla on merkittävästi pienempi anturin ja pinnan etäisyyden vaihtelusta johtuva lift-off-signaali (Saariaho 1995).

Anturityypit jaetaan myös tavallisiin ja heijastaviin antureihin. Kuvan 12 anturit ovat tavallisia. Heijastavissa (reflection) eli ns. lähetä-vastaanota-antureissa herätinkela muodostaa magneettikentän ja mittakela havainnoi sen muutoksia. Kelat ovat yleensä asemoitu sisäkkäin siten, että suurempi ulkopuolinen kela on herätin ja sisällä oleva pienempi kela mittaava (NDT Resource Center).

Heijastavan anturikonfiguraation etu on, että suuremmalla kelalla voidaan luoda pienemmän läheisyyteen homogeenisempi magneettikenttä kuin tavallisissa antureissa. Mittakela voidaan pitää myös pienenä, jolloin se on herkempi pienille vioille. Näistä syistä heijastavalla konfiguraatiolla saadaan voimakkaampi signaali kuin tavallisilla antureilla (Olympus 2013). Heijastavat anturit toimivat myös laajemmalla taajuuksialueella (Saariaho 1995).

Anturien tuottama magneettikenttä voidaan myös rajata vain anturin kärjen alle peittämällä anturi johtavalla vaipalla. Tätä sanotaan anturin suojaamiseksi. Suojaamatomat anturit tuottavat pyörrevirtoja laajemmalle alueelle, ja tarkastavat tästä syystä myös laajemman alueen kerrallaan. Kappaleen reunojen tarkastaminen suojaamattomalla anturilla voi olla hankalaa, koska reuna aiheuttaa merkittävän signaalin muu-

toksen. Vastaavasti suojatut anturit keskittävät pyörrevirrat pienemmälle alueelle, ja havaitsevat tästä syystä myös pienet säröt helpommin (Saariaho 1995).

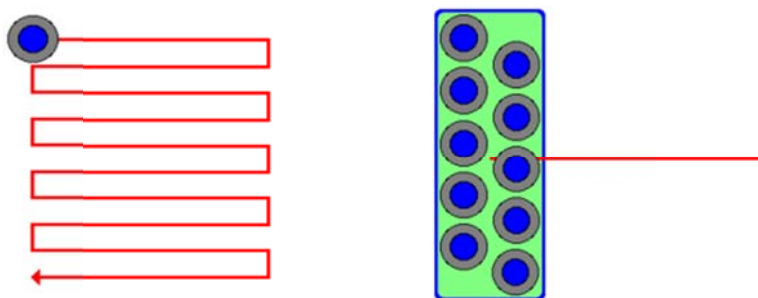
Antureissa olevan kelan sisusta on joko muovia tai magneettista ainetta. Tavalliset magneettiset sydämet ovat umpirautaisia, pakkarautaisia (puikoista tai levyistä tehtyjä), rautajauhetta tai ferriittiä (Fe_3O_4). Pyörrevirtatarkastuksen kannalta ferriittisydämet ovat näistä parhaita, koska rautasydämiin syntyy pyörrevirtoja, jotka aiheuttavat häviöitä korkeilla taajuuksilla (Elektroniikan laitos 2000). Magneettinen sydän voimistaa kelan magneettikenttää ja keskittää sen tarkemmin anturin alle. Tämä vaikuttaa särösignaalien voimakkuuteen ja tarkastusherkkyyteen (Saariaho 1995).

Anturit jaetaan tavallisesti myös niiden käyttötarkoituksen tai ulkonäön mukaan. Näin luokitellut anturit voidaan kuitenkin luokitella aina edellä mainittuihin toimintatapoihin ja konfiguraatioihin. Kuvassa 13 on esitetty erilaisia antureita ja näistä käytettyjä nimityksiä (Olympus 2013).



Kuva 13. Erilaisia pyörrevirta-antureita (Olympus 2013).

Uusimmat pyörrevirtalaitteistot pystyvät tarkastamaan leveitä alueita sarja-anturien (array-probe) avulla. Sarja-anturit ovat tavallisia pyörrevirta-antureita, joita on yhdistetty monta vierekkäin yhdeksi kokonaisuudeksi. Anturit on rakennettu siten, että ne tarkastavat koko anturin pinta-alan yhdellä pyyhkäisyllä, jolloin tarkastusta voidaan nopeuttaa ilman, että pienimmän havaittavan vian koko kasvaa. Sarja-anturin kulkemaa matkaa pinta-alan tarkastamisessa on verrattu tavallisen anturin kulkemaan matkaan kuvassa 14 (Eclipse Scientific).



Kuva 14. Tavallisen anturin ja sarja-anturin liikkuma matka saman alan tarkastuksessa (Eclipse Scientific).

3 Säröjen havaitseminen ja arviointi

Kun materiaalin pintaan tasapainotettu pyörrevirta-anturi viedään särön läheisyyteen, mitattavassa impedanssissa tapahtuu muutos. Muutoksen amplitudi riippuu särön koosta ja anturin rakenteesta. Saatavan signaalin suuruus riippuu muutoksen suuruudesta suhteessa magneettikentän kokonaisvuohon. Pieni absoluuttinen muutos voi aiheuttaa suuren suhteellisen muutoksen, mikäli anturin impedanssi on pieni (Saariaho 1995).

Särön paikantaminen oikein säädetyllä pyörrevirtalaitteistolla on helppoa, mutta laitteiston säätäminen vaikeata. Materiaalin ja laitteiston ominaisuudet vaikuttavat syntyvään signaaliin ja näiden tunteminen on siksi tärkeä osa pyörrevirtatarkastusta. Väärin valitut mittaussparametrit voivat estää säröhavainnon tai aiheuttaa virheellisiä havaintoja. Mittauksessa käytettävien parametrien valinnalla on erityistä merkitystä särön syvyyden arvioimisessa. Särön syvyys on luotettavasti mitattavissa vain hyvin säädetyllä laitteistolla.

3.1 Säröstä saatava signaali

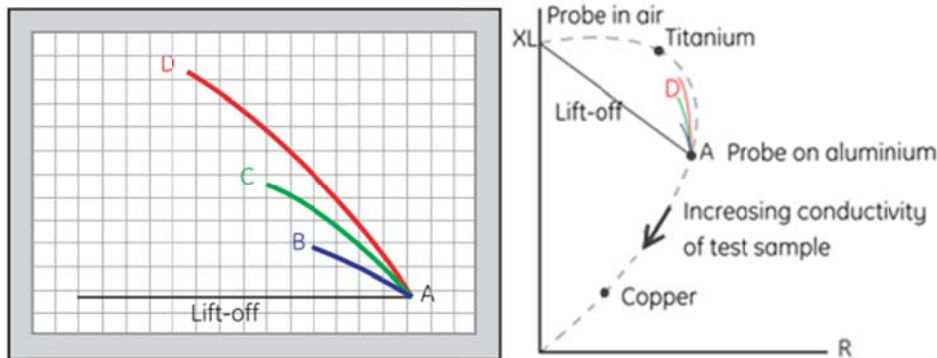
Pyörrevirtatarkastus alkaa mittaussparametrien valitsemisella mitattavan kohteen ja etsittävien vikojen mukaan. Anturin täytyy olla käyttötarkoitukseen sopiva, ja sen täytyy toimia tarvittavalla taajuudella. Tämän jälkeen laitteiston muut parametrit säädetään oikeiksi ja anturi tasapainotetaan. Tarkastus suoritetaan ensin tunnetut säröt sisältävälle vertailukappaleelle, jotta laitteiston oikea toiminta voidaan varmistaa. Vertailun jälkeen varsinainen tarkastus voidaan aloittaa. Tarkastus suoritetaan liikuttamalla anturia säännönmukaisesti ja rauhallisesti. Samalla seurataan anturin impedanssin muutosta (SFS-EN 1711 2000).

Mitattava impedanssi muuttuu, kun anturin magneettikentässä tapahtuu muutos. Muutos voi johtua tarkastettavan materiaalin sähköisten tai magneettisten ominaisuuksien muuttumisesta, mutta se voi syntyä myös anturista itsestään. Esimerkiksi muutos anturin lämpötilassa muuttaa sen resistanssia, mikä aiheuttaa signaalin hitaan vaeltamisen. Väärä signaali voi myös syntyä anturin ja pinnan välisen etäisyyden vaihtelusta. Tätä kutsutaan lift-off-signaaliksi (Saariaho 1995).

Impedanssin muutos esitetään joko pelkkänä amplitudina tai impedanssidiagrammina. Impedanssidiagrammin näyttäminen on kehittyneempi ja yleensä parempi tapa, koska se helpottaa väärin signaalien erottamista. Impedanssidiagrammin perustana on luvun 2.1.3. lopussa kuvassa 8 esitetty periaate, jonka mukaan impedanssi voidaan esittää koordinaatistossa resistanssin ja induktiivisen reaktanssin avulla (Saariaho 1995).

Impedanssidiagrammi saadaan, kun ehjästä pinnasta saatava signaali siirretään koordinaatiston keskelle ja akseleita (R , X_L) kierretään siten, että lift-off-signaali osoittaa vaakatasoon ja vasemmalle. Tällöin säröistä tulevat signaalit osoittavat yleensä yläviistoon. Kierrettyjä koordinaattiakseleita ei tavallisesti piirretä analysoitavaan diagrammiin, koska ne sekoittaisivat näyttämää, eivätkä ne suoranaisesti auta signaalien tulkinnassa (Saariaho 1995). Tarkastuksessa käytettävä impedanssidiagrammi on esitettyinä kuvassa 15 vasemmalla. Tässä lift-off on anturin etäisyyden vaihtelusta aiheutuva signaali ja B, C sekä D vertailukappaleen lovista saatavia sig-

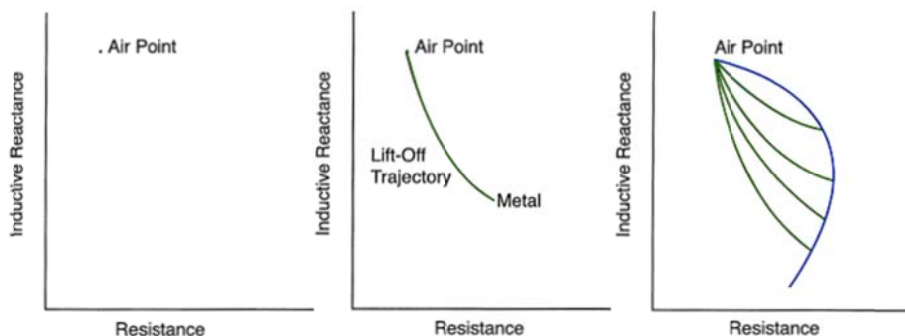
naaleita. Kuvassa 15 oikealla on esitetty absoluuttinen impedanssi, josta näkyy vasemmanpuoleisen kuvan näyttämä ilman käsittelyä. Oikeanpuoleisessa kuvassa katkoviiva kuvaa tutkittavan materiaalin johtavuutta; johtavuus kasvaa siirryttäessä alaspäin katkoviivaa pitkin nuolen osoittamaan suuntaan (GE Inspection Technologies 2005).



Kuva 15. Kohdistamalla ja kiertämällä saatu impedanssidiagrammi ja impedanssi käsittelemättömässä muodossaan (GE Inspection Technologies 2005).

3.1.1 Mittausparametrien vaikutus

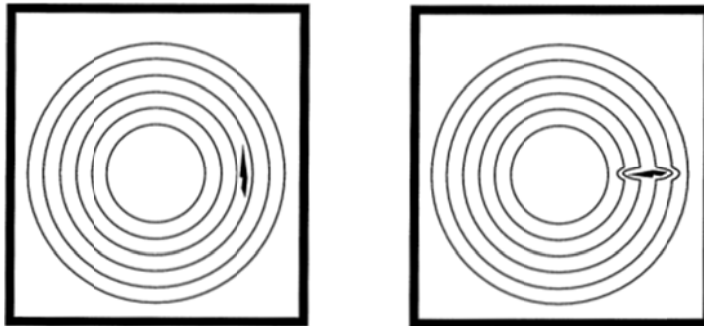
Kuvassa 16 on esitetty materiaalin johtavuuden vaikutus impedanssiin ja lift-off-signaaliin. Vasemmanpuolimmaisessa kuvassa näkyy anturin impedanssi ilmassa. Keskimmäisessä kuvassa vihreä käyrä kuvaa impedanssin muutosta, joka syntyy kun anturi tuodaan johtavaan materiaaliin kiinni. Mikäli etäisyys pinnan ja anturin välillä vaihtelee, impedanssi muuttuu tämän käyrän suuntaisesti. Oikealla puolella sininen käyrä esittää tutkittavan materiaalin johtavuuden vaikutusta signaaliin. Johtavuus paranee siirryttäessä käyrää pitkin alaspäin. Samalla lift-off-signaalin suunta vaihtuu. Oikean puoleisessa kuvassa on esitetty vihreillä viivoilla neljä eri lift-off käyrää, jotka vastaavat neljää eri johtavuuden omaavaa materiaalia (Hellier 2001).



Kuva 16. Impedanssi anturin ollessa ilmassa, metallin pinnalla ja eri metallin johtavuuden arvoilla (Hellier 2001).

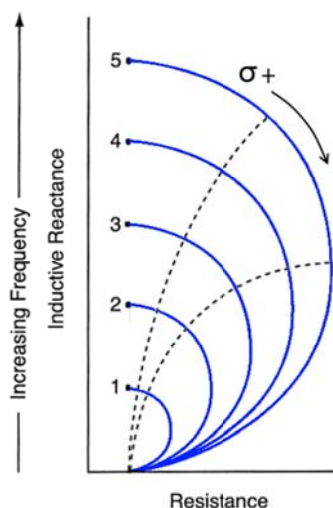
Anturin ja pinnan välinen etäisyys vaikuttaa lift-off-signaaliin, mutta se vaikuttaa myös säröistä saataviin signaaleihin. Etäisyyden kasvaessa pienempi osa magneettikentästä tunkeutuu tarkastettavaan materiaaliin, jolloin myös säröt aiheuttavat pienemmän signaalin. Tällä on merkitystä pinnoitteen läpi tehtävässä tarkastuksessa sekä karkeiden pintojen tarkastuksessa. Ohuen pinnoitteen läpi tarkastaminen on yleistä, koska anturin kärjessä käytetään yleensä suojaa, jottei anturi kuluisi (Saari-aho 1995).

Materiaalin johtavuuden lisäksi geometriset tekijät, tarkastustaajuus ja materiaalin permeabiliteetti vaikuttavat impedanssiin. Särön suunnan vaikutus pyörrevirtojen muotoon on esitetty kuvassa 17, taajuuden vaikutukset kuvassa 18, ja magneettisten ominaisuuksien vaikutukset kuvassa 19. Kuvasta 17 näkyy kuinka pyörrevirtojen suuntaiset säröt eivät häiritse pyörrevirtoja, mutta poikkisuuntaiset säröt aiheuttavat selvän poikkeaman (Hellier 2001). Käytännössä särö ei ole koskaan täysin pyörrevirtojen suuntainen ja se aiheuttaa aina poikkeaman, mutta tämä saattaa joissain tapauksissa jäädä huomaamatta laitteiston kohinan vuoksi.



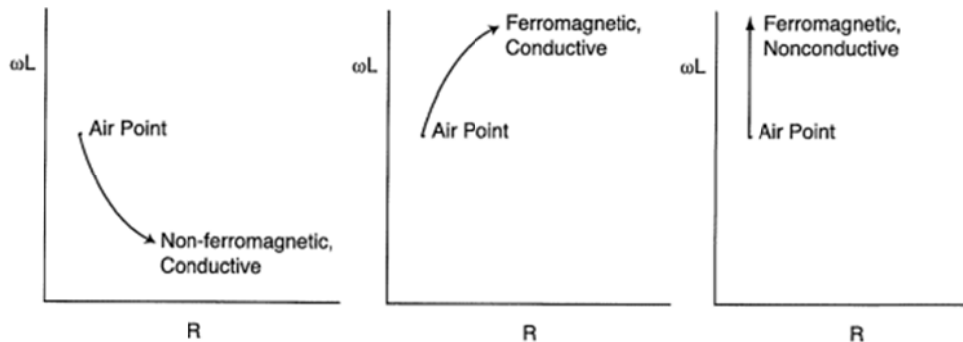
Kuva 17. Särön suunnan vaikutus pyörrevirtojen muotoon (Hellier 2001).

Kuvassa 18 näkyvät siniset puoliympyrät kuvaavat materiaalin johtavuuden vaikutusta impedanssiin tarkastustaajuuksilla 1–5. Ulommat käyrät saadaan suuremmilla taajuuksilla eli tarkastustaajuus kasvaa käyrän numeron mukaan. Kuvassa on esitetty katkoviivoilla kahdesta materiaalista saatavia impedanssin arvoja eri tarkastustaajuuksilla. Tavallisesti pyörrevirtojen syntymistä voimistavat tekijät siirtävät impedanssia johtavuuskäyrää pitkin alaspäin, ja magneettikentää voimistavat tekijät kasvattavat käyrän kokoa (Hellier 2001).



Kuva 18. Taajuuden vaikutukset anturin impedanssiin (Hellier 2001).

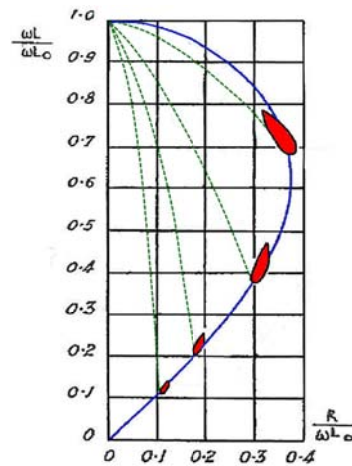
Kuvassa 19 on esitetty ei-ferromagneettiselle johtavalle, ferromagneettiselle johtavalle ja ferromagneettiselle johtamattomalle materiaalille ominaiset impedanssin arvot. Kupari ja alumiini käyttäytyvät kuin johtava ei-ferromagneettinen materiaali, ja teräs käyttäytyy kuin johtava ferromagneettinen materiaali. Tästä syystä näiden pyörrevirtatarkastuksessa käytetään hyvin erilaisia mittaussparametreja. Ferromagneettisuuden vaikutus on samanlainen kuin tarkastustaajuuden kasvattamisen vaikutus. Tämä johtuu siitä, että ferromagneettisuus vahvistaa anturin magneettikenttää ja sitä kautta kasvattaa induktiivista reaktanssia.



Kuva 19. Magneettisten ominaisuuksien vaikutus impedanssiin (Hellier 2001).

Jotta havaittu särö olisi tunnistettavissa, sen aiheuttaman signaalin suunnan täytyy poiketa lift-off-signaalin suunnasta. Lähellä lift-off-signaalia olevat särösignaalit voidaan tulkita väärin, koska anturin etäisyyden pieni vaihtelu on yleistä tarkastuksissa. Anturin ominaisuudet ja tarkastustaajuus vaikuttavat sekä lift-off-signaalin suuntaan että särösignaalien suuntaan, joten nämä valitaan tarkastettavalle materiaalille sopiviksi. Samasta syystä mittauslaitteiston käyttäminen tarkastettavaa kohdetta vastaavaan vertailukappaleeseen on erittäin tärkeää, jotta säröindikaatioiden todellinen suunta voidaan varmistaa (Saariaho 1995).

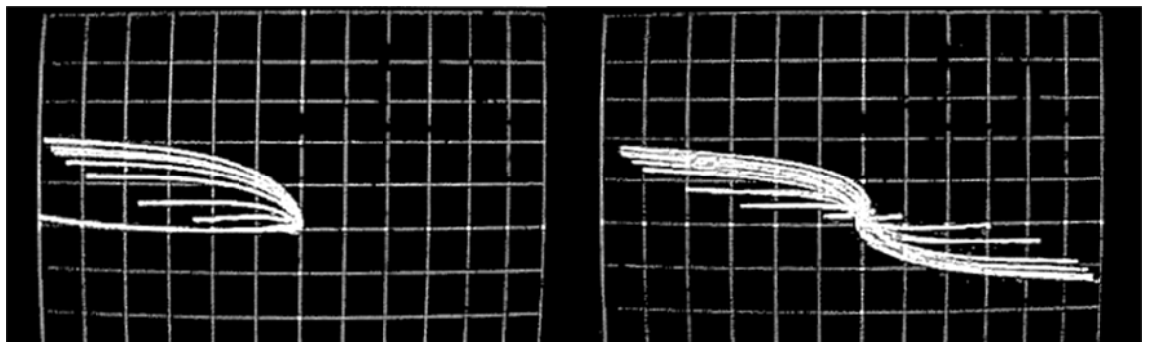
Kuvassa 20 on normalisoitu impedanssidiagrammi tankoa ympäröivälle anturille. Normalisointi tarkoittaa sitä, että resistanssin ja reaktanssin arvot on jaettu ilmassa olevan anturin reaktanssilla (ωL_0). Kuvassa 20 punaiset alueet edustavat säröhavaintojen paikkoja ja vihreä katkoviiva lift-off-signaalin tyyppistä kohinaa, joka aiheutuu tangon värähtelystä ja vähäisistä halkaisijan muutoksista. Taajuuden kasvaessa normalisoitu impedanssi siirtyy sinistä käyrää pitkin alaspäin (vertaa kuvan 18 katkoviivat). Suuremmilla taajuuksilla säröhavainnon ja lift-off-signaalin välinen kulma on suurempi, mutta säröjen signaalit pienempiä (Saariaho 1995).



Kuva 20. Normalisoitu impedanssidiagrammi, jossa säröindikaatiot näkyvät punaisella (Saariaho 1995).

3.1.2 Anturityypin vaikutus

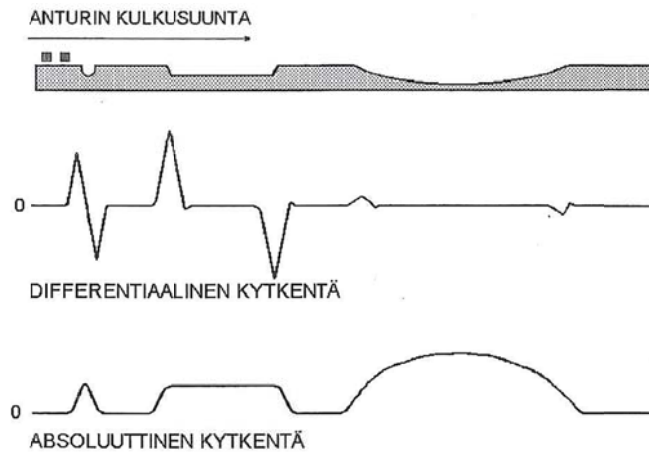
Absoluuttisella ja vertailevalla anturilla saadut näyttämät poikkeavat merkittävästi toisistaan. Kuvassa 21 vasemmalla on esitetty absoluuttisen anturin näyttämä seitsemästä säröstä ja oikealla vertailevan anturin näyttämä samoista säröistä (Hellier 2001). Vertailevan anturin signaalissa kaksi pienintä poikkeamaa ovat joko lift-off-signaaleita tai pienimmistä säröistä saatuja signaaleita. Vertailevilla antureilla on pieni lift-off, koska anturissa olevien kahden kelan signaalit vähennetään toisistaan, jolloin molempiin antureihin vaikuttavat tekijät eivät muuta signaalia (NDT Resource Center).



Kuva 21. Absoluuttisen ja vertailevan anturin näyttämät 7 erikokoisesta säröstä (Hellier 2001).

Vertailevan anturin näyttämä syntyy kahteen suuntaan, koska vertaileva anturi mittaa kahden kelan välisiä poikkeamia. Kun ensimmäinen kela ylittää särön, syntyy absoluuttisen anturin signaalia muistuttava näyttämä, joka alkaa pienentyä kun särö alkaa vaikuttaa jälkimmäisen kelan vasteeseen. Kun särö on kelojen keskellä, signaalia ei synny, sillä särön vaikutus molempiin keloihin on sama. Tarkastuksessa syntyy vielä vastakkaisuuntainen signaali, kun ensimmäinen kela ohittaa särön mutta jälkimmäinen havaitsee sen vielä (Hellier 2001).

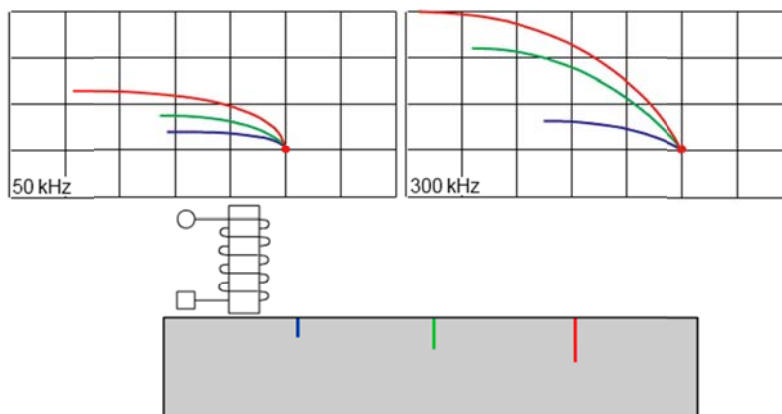
Kuvassa 22 on havainnollistettu vertailevan ja absoluuttisen anturin tuottamien signaalien eroja. Näyttämät kuvaavat pelkkää signaalin amplitudia, eli signaalin vaihetta ei ole annettu. Signaalit syntyvät, kun anturi kulkee vasemmalta oikealle ylimmäisenä esitetyn harmaan testikappaleen yli. Kuva havainnollistaa hyvin, miten vertaileva anturi peittää laaja-alaiset poikkeamat ja tuo esille yksittäiset lyhyet säröt (Saariaho 1995).



Kuva 22. Vertailevan ja absoluuttisen anturin tuottamien signaalien amplitudit yllä näkyvistä vioista (Saariaho 1995).

3.2 Säröhavainnon syvyyden arvioiminen

Särön koon, muodon ja syvyyden arvioiminen pyörrevirtatarkastuksessa perustuu signaalin amplitudiin ja vaiheeseen. Koska anturin signaali riippuu myös käytettävistä mittaussparametreista, täytyy tarkastaessa käyttää vertailukappaleita. Kuvassa 23 on tavallinen kolme tunnettua säröä (tavallisesti 0,5 mm, 1,0 mm ja 2,0 mm (SFS-EN 1711 2000)) sisältävä vertailukappale ja tästä saatavat särösignaalit eri taajuuksilla (NDT Resource Center). Kuvan 23 signaalit on käsitelty kuvassa 15 näytettävällä tavalla, jolloin lift-off signaalin suunta on suoraan vasemmalle.



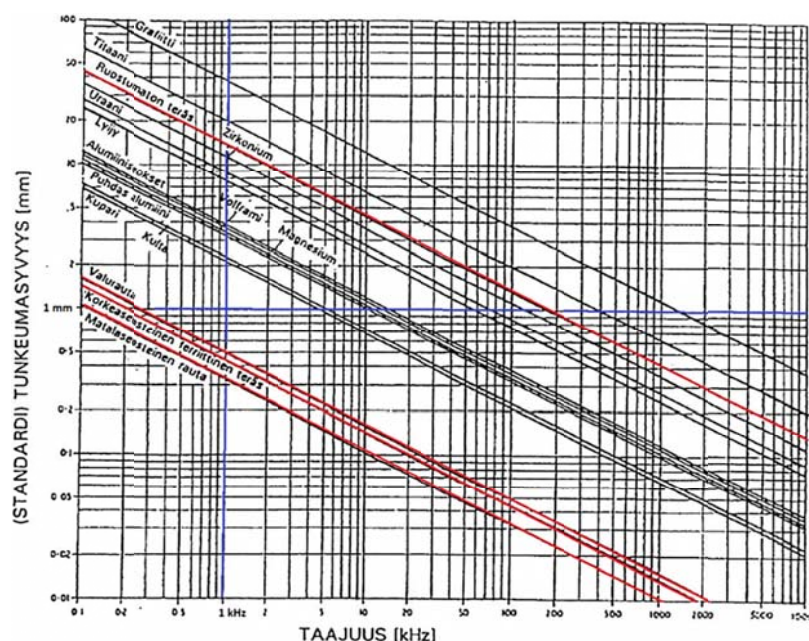
Kuva 23. Absoluuttisen anturin särösignaalit 50Hz ja 300Hz taajuuksilla (NDT Resource Center).

Kuvasta 23 nähdään kuinka 50 kHz taajuudella sinisestä ja vihreästä säröstä saatavan signaalin amplitudin on lähes sama, mutta vaihekulma lift-off signaalin suuntaan nähden on selvästi eri. Huomion arvoista on myös, että punaisen särön signaalin amplitudin ei ole särön syvyyteen nähden samassa suhteessa suurempi. 300 kHz taajuudella amplitudit ovat merkittävästi suurempia ja ne kasvavat selkeämmin suhteessa särön syvyyteen. Näiden tulosten selittämiseksi täytyy tarkastella pyörrevirtojen tunkeutumista materiaaliin.

Muuttuva magneettikenttä keskittää pyörrevirrat kappaleen pinnan läheisyyteen. Tätä sanotaan pintailmiöksi (skin-effect). Pintailmiö johtuu magneettikentän ja sähkökentän vuorovaikutuksesta materiaalin sisällä, ja se voidaan johtaa Maxwellin yhtälöistä 4 ja 5 (Popovic & Popovic 2000). Näin saadun differentiaaliyhtälön yleinen ratkaisu on vaikeasti käytettävä eksponenttiyhtälö, minkä vuoksi pyörrevirtatarkastuksen yhteydessä on otettu käyttöön standarditunkeumasyyvyys. Tämä tarkoittaa syvyyttä, jolla virrantiheys on pudonnut arvoon $1/e$ eli $\sim 37\%$ alkuperäisestä. Standarditunkeumasyyvyys voidaan laskea yhtälöllä 13. Yhtälössä f on taajuus, μ_0 tyhjiön permittiivisyys, μ_r suhteellinen permittiivisyys ja σ johtavuus (García-Martín et al. 2011).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (13)$$

Yhtälön 13 mukainen standarditunkeumasyyvyys alumiinille 1 kHz tarkastustaajuudella on noin 3 mm. Pyörrevirtatarkastuksessa katsotaan, että merkittävää signaalia voidaan saada maksimissaan 3δ syvyydeltä. Tällöin virrantiheys on $\sim 5\%$ pinnan virrantiheydestä. Laskennan vähentämiseksi eri materiaalien standarditunkeumasyyvydet esitetään log-log kuvaajissa taajuuden funktiona. Tällainen kuvaaja on esitetty kuvassa 24 (Saariaho 1995). Kuvasta nähdään, että standarditunkeumasyyvyys teräksessä on noin kolmanneksen pienempi kuin alumiinissa.



Kuva 24. Eri metallien standarditunkeumasyyvyksiä taajuuden funktiona (Saariaho 1995).

Kuvassa 24 siniset viivat edustavat 1kHz tarkastustaajuutta ja 1 mm standarditunkeumasyvyyttä. Kolme alhaalla olevaa punaista viivaa ovat ferromagneettisten rautaseosten standarditunkeumasyvyyksiä ja ylin ei-ferromagneettisen ruostumattoman teräksen standarditunkeumasyvyyys. Kuvasta nähdään, että raudan ferromagneettisuus eli korkea μ_r pudottaa teräksien standarditunkeumasyvyyden noin kymmenesosaan verrattuna johtavuudeltaan vastaaviin materiaaleihin.

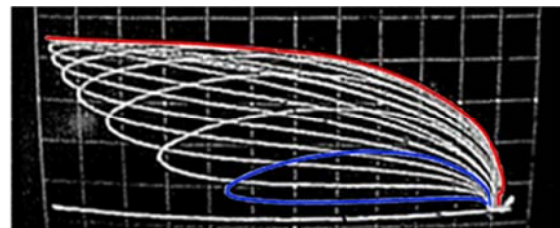
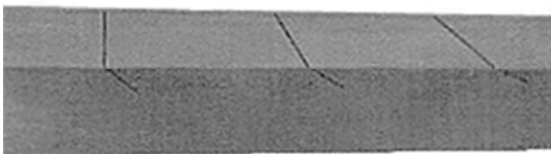
Kuvan 24 mukaiset standarditunkeumasyvyydet pitävät tarkalleen ottaen paikkaansa vain yhdellä anturilla. Taajuuden lisäksi kaikki muutkin magneettikentän voimakkuutta kasvattavat tekijät vähentävät standarditunkeumasyvyyttä. Näitä ovat magnetoivan kelan geometriset tekijät, kuten koko ja kierrosten lukumäärä, anturin rautasydän, ja vähäisemmässä määrin myös anturin kärjen suojaus. Näiden lisäksi havaintojen luotettavuutta vähentää myös laitteistoon ja anturiin liittyvä kohina. Luotettavan tarkistuksen varmistamiseksi signaali-kohina-suhteen täytyy olla yli 3, eli pienimmän vian aiheuttaman signaalin täytyy olla 3 kertaa kohinaa suurempi (Saariaho 1995).

Pintailmiöön liittyy läheisesti myös vaihesiirtymäksi (phase-lag) kutsuttu ilmiö. Samasta virrantiheyden pienenemisestä materiaalin sisällä seuraa virran vaiheen muuttuminen. Yhden standarditunkeumasyvyyden etäisyydellä virran vaihe muuttuu 1 rad verran eli $\sim 57^\circ$. Vaihekulma θ syvyydellä x voidaan laskea yhtälön 14 avulla (Saariaho 1995).

$$\theta = \frac{x}{\delta} \quad (14)$$

Säröhavainnon syvyyttä voidaan arvioida vaihesiirtymän avulla. Syvemmältä materiaalista tulleen signaalin vaihe on hieman jäljessä eli signaali on kiertynyt myötäpäivään lift-off-signaaliin nähden, kuten havaittiin kuvasta 23. Vaihesiirtymää pidetään luotettavampana arvioina särön syvyydestä kuin signaalin amplitudi, koska siihen vaikuttaa harvempi tekijä. Huomion arvoista on kuitenkin, että vaihesiirtymä riippuu myös signaali amplitudista, minkä vuoksi myös vaihesiirtymän tulkitsemisessä tarvitaan referenssisäröjä (Saariaho 1995).

Kuvassa 25 vasemmalla on esitetty alumiininen referenssikappale, jonka avulla voidaan tutkia särön kulman vaikutusta signaaliin. Kappaleessa on 9 keinoitekoista samanpituista lovea kulmissa 10° – 90° pintaan nähden 10° eroilla. Kuvassa 25 oikealla on näiden lovien tuottamat pyörrevirtasignaalit. 90° lovi tekee viivamaisen signaalin ja signaali aukeaa silmukaksi, jonka leveys kasvaa kulman pienentyessä (Hellier 2001). 90° lovesta tuleva signaali on vahvistettu kuvaan punaisella ja 10° signaali sinisellä.



Kuva 25. Vasemmalla alumiininen referenssikappale, jossa 9 lovea eri kulmissa. Oikealla näiden tuottamat pyörrevirtasignaalit (Hellier 2001).

Suurempi kulma johtaa suurempaan signaalin amplitudiin, koska lovi leikkaa pyörrevirrat terävämmin ja aiheuttaa näin suuremman muutoksen. Kulman pienentyessä signaali tulee myös lähempää pintaa, jolloin pyörrevirtojen vaihesiirtymä pienenee. Kuvassa 25 tämä nähdään, kun vertaillaan signaalien pystyyn nousevien osien ja lift-off-signaalin välisiä kulmia. Jos säröt ylitetään pintaan aukeavasta päästä eli kuvassa vasemmalta oikealle, signaali muodostaa silmukan myötäpäivään. Toiseen suuntaan liikuttaessa signaali muodostuu vastapäivään, koska vaihekulma on särön syvemmässä päässä suurempi ja amplitudi pienempi (Hellier 2001).

4 Kiskon hamaran vikahavaintojen tulkitseminen

Pyörrevirtatarkastusta käytetään sekä kiskon valmistuksen yhteydessä laadunvalvontaan (JFE Steel Corporation) että kiskon tarkastuksessa vierintäväsylimisvaurioiden etsimiseen (Dey et al. 2008, Schmid et al. 2010). Tässä luvussa keskitytään pintavikojen etsimiseen käytetyn kiskon pinnasta, joten tarkastelu keskittyy hamaran erityispiirteiden esittelemiseen sekä näiden merkitykseen pyörrevirtatarkastuksessa.

4.1 Vikojen tarkastelusyvyys kiskossa

Teräksen ferromagneettisuus tuottaa ongelmia pyörrevirtatarkastuksessa, koska korkea suhteellinen permeabiliteetti rajoittaa pyörrevirtojen tunkeutumista. Matalilla taajuuksilla tarkastettaessa standarditunkeumasyyvyys paranee, mutta virrantiheys heikkenee koska kelaan syötetystä energiasta pienempi osuus menee pyörrevirtojen muodostamiseen ja suurempi kelan resistiiviseen lämmittämiseen. Tämä rajoittaa alinta käytettävää taajuutta. Kelan X_L/R suhdetta kutsutaan Q-tekijäksi, ja se kuvaa pyörrevirtojen syntymistä. Q-tekijän tulisi olla yli 1,7 jotta tarkastuksessa saataisiin luotettavia havaintoja. Pieni Q-tekijän arvo johtaa myös anturin kuumenemiseen, mikä lisää resistanssia ja voi vahingoittaa kelaa (Saariaho 1995).

Matalien taajuuksien käyttäminen teräksen mittaamisessa on ongelmallista, koska paikalliset permeabiliteettivaihtelut aiheuttavat ylimääräistä kohinaa. Tämän vuoksi teräskappaleiden tarkastuksessa käytetään yleensä korkeita, noin 1 MHz taajuuksia, jolloin permeabiliteettivaihteluiden vaikutus häviää. Korkea taajuus rajoittaa pyörrevirrat hyvin lähelle kappaleen pintaa ($\delta \approx 0,01$ mm), jolloin signaali saadaan vain särön suuaukon lähistöltä. Tällöin särön koon arviointi perustuu signaalin amplitudiin. Amplitudia voidaan käyttää särön koon arvioimisessa, mikäli särön muoto ja muut piirteet tunnetaan hyvin (Saariaho 1995). Tämä on kuitenkin epäluotettava tapa mitata särön kokoa, koska pienet muutokset särön suuaukon leveydessä tai muodossa voivat aiheuttaa merkittävän amplitudin muutoksen.

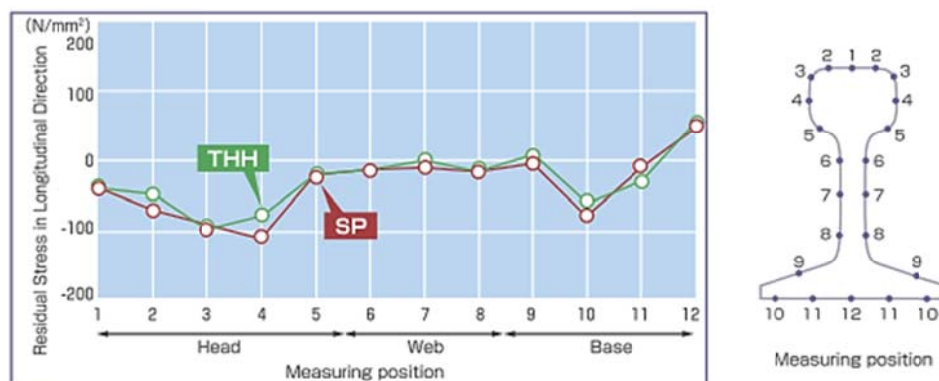
Teräksen ferromagneettisia ominaisuuksia voidaan periaatteessa vähentää voimakkaan ulkoisen magneettikentän avulla. Ohuiden putkien tai kapeiden tankojen tarkastuksessa voidaan käyttää voimakasta ulkoista magneettikenttää vähentämään permeabiliteetin vaihtelusta johtuvia ylimääräisiä kohinapiikkejä. Tätä kutsutaan magneettisen häiriön (magnetic bias) tuottamiseksi tai kyllästysmagnetoinniksi (saturation magnetization). Kyllästysmagnetointi mahdollistaa ainakin ohutseinäisten putkien tarkastuksen koko seinämän vahvuudelta. Sen suurimmat ongelmat liittyvät voimakkaan ja tasaisen ulkoisen magneettikentän tuottamiseen ja tarkastusanturien toiminnan varmistamiseen (García-Martín et al. 2011, McMaster 1977).

4.2 Hamaran pinnan tarkastuksen ongelmat

Kiskon hamaraan syntyy valmistuksessa jännityksiä, jotka sekoittuvat vielä käytössä tapahtuviin pinnan rakenteellisiin muutoksiin. Lopputuloksena on sähköisiltä ominaisuuksiltaan hyvin heterogeeninen rakenne, jossa suurimmat poikkeamat keskittyvät pyörrevirtatarkastuksen kannalta mielenkiintoisimpaan osaan eli kulkupintaan. Nämä ominaisuuksien vaihtelut näkyvät pyörrevirtatarkastuksessa ja vaikeuttavat tarkastuksen tekemistä.

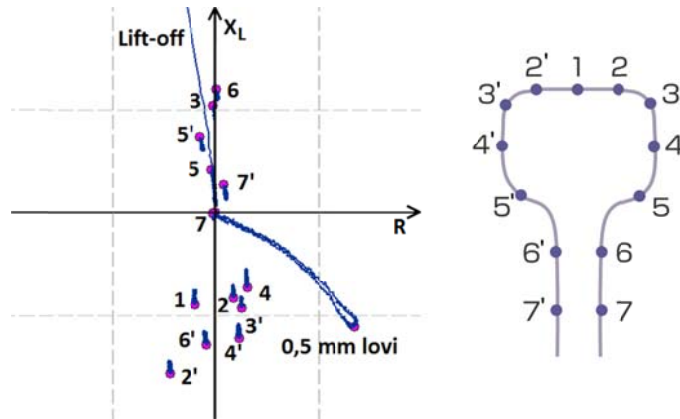
4.2.1 Valmistukseen liittyvät ominaisuuksien vaihtelut

Kisko taipuu jäähtyessään ja se suoristetaan valmistusprosessin loppupäässä rulla-oikaisemalla. Tämä oikaisu aiheuttaa kiskoon merkittäviä jäännösjännityksiä, jotka puolestaan vaikuttavat kiskon pinnan ominaisuuksiin. Valmistuksen aiheuttamat pitkittäiset jännitykset kahden eri teräslaataa olevan kiskon pinnassa on esitetty kuvassa 26 (JFE Steel Corporation). Kuva edustaa hienoperlitoitua kiskoterästä ja se poikkeaa lämpökäsittelmättömistä kiskoteräsladuista jonkin verran. Kuvassa 26 esitetty jännityksien vaihtelu näkyy myös kiskon pyörrevirtatarkastuksessa saatavissa signaaleissa. Jännitykset täytyy huomioida esimerkiksi hamaran kyljestä ja selästä mitattuja anturin impedansseja vertaillessa.



Kuva 26. Pitkittäiset valmistuksen aikaiset lämpöjännitykset kiskon pinnassa (JFE Steel Corporation)

Kuvassa 27 on esitetty käyttämättömän kiskon hamaran eri kohdissa ja 0,5 mm lovesta saadut signaalit. Anturi on tasapainotettu pisteeseen 7, joten mitatut impedanssit ovat suhteessa tämän pisteen impedanssiin. Kuvan signaaleissa näkyy suurta hajontaa lift-off-signaalin suunnassa. Tämä johtuu pinnankarheuden aiheuttamasta etäisyyden vaihtelusta. Lift-off vaihtelut korostuvat myös, koska käytetty anturi on erityisen herkkä näille. Kuvasta 27 näkyy, kuinka tämä sähköisten ominaisuuksien ero voi aiheuttaa säröindikaation suuntaisen signaalin, ja kuinka se lisää merkittävästi taustakohinaa.



Kuva 27. Eri puolilta kiskoa mitatut pyörrevirtasignaalit. Anturi on tasapainotettu varren pisteeseen 7.

Pinnan epätasaisuuden aiheuttama anturin ja kiskon välisen etäisyyden vaihtelu on todellinen ongelma kiskon tarkastuksessa. Etäisyyden vaihtelu aiheuttaa lift-off-signaalin suuntaista kohinaa, mutta sen lisäksi se vaikuttaa säröstä saatavan signaalin amplitudiin. Esimerkiksi tarkastusetäisyyden muutoksille herkän kynäanturin signaali 0,5 mm lovesta teräksisessä vertailukappaleessa heikkenee noin 7 dB, kun anturi erotetaan pinnasta 0,5 mm kalvolla. Tämä tarkoittaa signaalin putoamista arvosta 0,16 mV arvoon 0,03 mV.

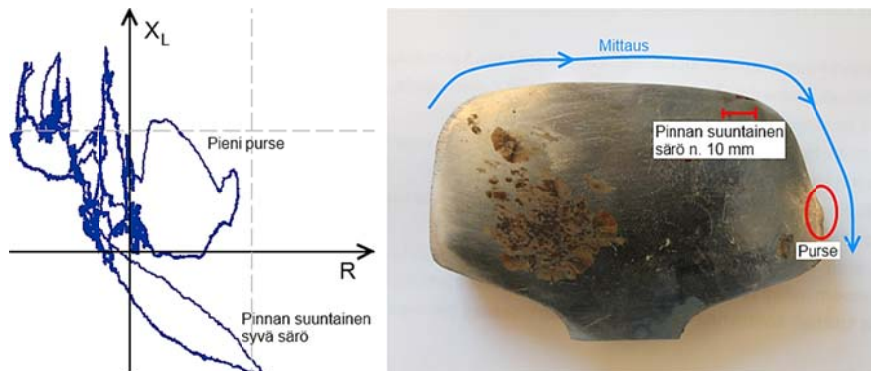
Jatkuvaksi hitsatussa raiteessa kiskoihin syntyy lämpöjännityksiä, koska vapaa lämpölaajeneminen on estetty. Kiskon lämpötila vaikuttaa myös suoraan kiskon resistanssiin ja sitä kautta sähköisiin ominaisuuksiin. Lämpöjännitykset ja tarkastuslämpötila vaikuttavat siten kiskosta saatuun signaaliin. Ulkoisen lämpötilan vaikutus tarkastukseen on kuitenkin pieni verrattuna muihin hajontaa aiheuttaviin tekijöihin. Lisäksi lämpötilan vaikutus voidaan eliminoida tasapainottamalla anturit kiskon pintaan tarkastuslämpötilassa ja kalibroimalla anturit oikein.

Kiskoteräksen kemiallisen koostumuksen muutokset aiheuttavat muutoksia impedanssiin. Tämän vuoksi valmistajan tai jopa valmistuserän muutokset voivat näkyä mitattavassa signaalissa. Myös hitsit aiheuttavat selkeän häiriön tarkastussignaaliin. Manuaalisesti tapahtuvassa tarkastuksessa tällaiset vaihtelut eivät tuota suuria ongelmia, koska anturi voidaan aina tasapainottaa uudelleen. Nämä voivat kuitenkin olla ongelmallisia automatisoidussa radan pyörrevirtatarkastuksessa.

4.2.2 Käytön aiheuttamat ominaisuuksien vaihtelut

Käytön aikana kiskon pinta muokkautuu ja tähän syntyy voimakkaita puristusjäännöjännityksiä. Samalla pinta lujittuu ja sen mikrorakenne hienontuu sekä orientoituu (Kapoor et al. 2006). Nämä kaikki tekijät heikentävät heikentävä pinnan sähköjohtavuutta ja vaikuttavat suhteelliseen permeabiliteettiin. Pinnan muokkautumisen tarkkaa vaikutusta sähköisiin ominaisuuksiin ja esimerkiksi standarditunkeumasyvyyteen ei ole kuitenkaan helppoa arvioida. Muokkautuneen pinnan sähköiset ominaisuudet poikkeavat kuitenkin huomattavasti muokkautumattoman kiskoteräksen ominaisuuksista.

Kuvassa 28 on esitetty jatkuva pyörrevirtasignaali, joka syntyy kun anturi ylittää käytetyn kiskon hamaran. Lift-off-signaalin suunta on tässä yläviistoon samalla tavalla kuin kuvassa 27, mutta signaalit eivät ole näissä kuvissa muuten vertailukelpoisia. Kuvassa 28 vasemmassa yläneljänneksessä näkyvä signaalin vaeltaminen syntyy, kun anturi ylittää hamaran paikoista joissa ei ole säröä. Särön ja purseen aiheuttamat signaalit näkyvät selkeinä oikealla. Ehjästä osasta tuleva kohina on amplitudiltaan samaa kokoluokkaa pinnan suuntaisen särön signaalin kanssa. Purseesta ja säröstä saatavat signaalit erottuvat kuitenkin kohinasta selvästi.



Kuva 28. Pyörrevirtasignaali käytöstä poistetun kiskon hamaran pinnan yli mitattuna.

Kiskon pintaan syntyy säröjä ja siihen sekoittuu ulkopuolisia partikkeleita pinnan muokkautuessa plastisesti. Lisäksi kiskon pinta ruostuu altistuuessaan kosteudelle. Kuvassa 29 on esitetty hamaran pinta, josta erottuu pieniä ja suurempia painumia sekä ruostetta. Nämä jättävät kiskon pinnan usein epätasaiseksi ja lisäävät siten lift-off vaihtelua. Kuvassa 29 hamaran keskellä näkyy myös epätasainen vaalea alue, joka on luultavasti White-Etching-Layer (WEL) eli valkoiseksi syöpyvä kerros. Tämä on ~ 50 μm syvä erittäin muokkautunut kerros (Steenbergen & Dollevoet 2013), joka poikkeaa sähköisiltä ominaisuuksiltaan merkittävästi muusta muokkautuneesta pinnasta. WEL aiheuttaa signaaliin vaihteluita erityisesti korkeilla taajuuksilla tehtävässä pyörrevirtatarkastuksessa.



Kuva 29. Käytetyn kiskon hamarassa olevia jälkiä.

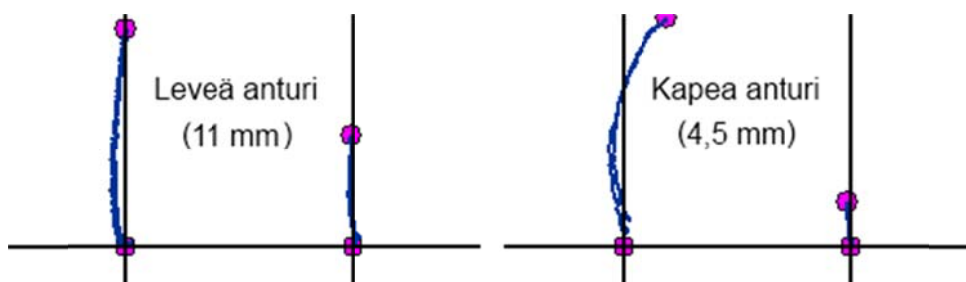
Kiskon kuluminen muuttaa profiilia ja vähentää pinnan karheutta. Pinnankarheuden tasoittuminen vähentää etäisyyden aiheuttamaa kohinaa. Kuitenkin on hyvä huomioda, että kuluminen ei vääjäämättä johda sileään pintaan. Voimakas delaminaatiokuluminen kasvattaa pinnan karheutta ja synnyttää pieniä murtumia (Tunna et al. 2007), jotka lisäävät signaalin kohinaa. Tämä ei kuitenkaan ole ongelmallista radan pyörrevirtatarkastuksen kannalta, koska särön kasvu ei rajoita kiskon käyttöikää koh-teissa, joissa kuluminen on voimakasta.

4.3 Vikasignaalien erottaminen muista signaaleista

Pyörrevirtalaitteistojen avulla on mahdollista havaita hyvin pieniä vikoja kiskon pinnassa, koska pyörrevirrat saadaan helposti keskitetyksi alle 1 mm kerrokseen. Tämän vuoksi kiskon pyörrevirtatarkastuksen ongelmat eivät liity vikojen havaitsemiseen, vaan havaintojen tulkintaan. Kiskon pinnan väsyminen pyöräkontaktissa on satunnaista, koska pyörän tarkka ylityskohta ja kontaktin todelliset voimat vaihtelevat. Tämä vaurioiden kasvuun liittyvä epävarmuus aiheuttaa kiskon pyörrevirtatarkastukseen liittyviä ongelmia.

Kiskon hamaran tarkastuksessa käytettävän anturin pitäisi pystyä erottamaan matalat säröt syvistä. Leveät anturit tarkastavat suuremman alan kerrallaan, joten niiden tuottama signaali ei ole yhtä herkkä särön suuaukon geometriamuutokselle kuin kapeiden antureiden signaali. Tästä syystä leveällä anturilla mitattu signaali edustaa paremmin särön syvyyttä kuin kapealla anturilla mitattu. Leveä anturi ei myöskään ole yhtä herkkä hamaran pinnan paikallisista eroista johtuvalle signaalin vaihtelulle. Toisaalta leveän anturin alle mahtuu useampi vierekkäinen särö, mikä puolestaan kasvattaa signaalia ja heikentää mittauksen luotettavuutta. Kapeilla antureilla tämä useamman signaalin sekoittuminen ei ole ongelma.

Anturin koko vaikuttaa myös pinnankarheuden aiheuttamaan lift-off-signaalien vaihteluun sekä tähän liittyvään signaalien vaimenemiseen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 30 näytettävien signaalien avulla. Kuvassa on neljä pyörrevirtasignaalia, jotka kaikki ovat syntyneet 2,0 mm syvästä lovesta. Signaalit on mitattu kahdella anturilla ja kahdella etäisyydellä pinnasta. Korkeammat signaalit on saatu, kun anturia on pidetty kiinni kappaleen pinnassa tarkastuksen ajan, ja näiden vieressä olevat on mitattu 0,5 mm kalvon läpi. Kuvasta nähdään, että kapeamman anturin amplitudi on huomattavasti herkempi etäisyyden kasvusta johtuvalle signaalien vaimenemiselle.



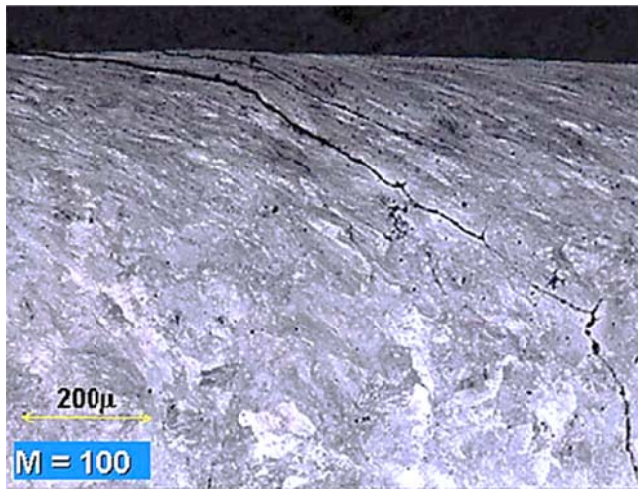
Kuva 30. 0,5 mm kalvon vaikutus lovisignaaliin leveällä ja kapealla anturilla.

Etäisyyden vaihtelun vaikutus signaaliin on suurimmillaan anturin ollessa kiinni näytteessä, ja se heikkenee etäisyyden kasvaessa. Tarkastuksessa anturi on siis parempi pyrkiä pitämään esimerkiksi 1 mm etäisyydellä pinnasta, koska tällöin etäisyyden pienen vaihtelun vaikutus signaaliin pienenee.

Absoluuttiset anturit soveltuvat kiskon hamarassa olevien vikojen havaitsemiseen, mutta nämä ovat alttiita muokkauslujittumisasteen muutoksille ja lift-off-vaihteluiden aiheuttamalle kohinalle. Vertailevia antureita ei voida käyttää, koska näillä ei voi erottaa yksittäisistä vioista syntyviä signaaleita, silloin kun useampi vika jää anturin alle samanaikaisesti.

Spenon kiskonhiontavaunuissa oleva pyörrevirtatarkastusjärjestelmä käyttää neljää noin 10 mm leveää pyörrevirta-anturia, joilla tarkastetaan yhteensä 25 mm leveä osuus. Anturit pidetään 1 mm etäisyydellä hiomattoman kiskon pinnasta ja todellisen etäisyyden vaihtelusta johtuva signaalin vaihtelu korjataan digitaalisesti. Kiskon kylästysmagnetointia ei käytetä, joten tarkastuksen syvyys jää alle 1 mm (Pohl et al. 2006).

Kisko pinnassa olevien murtumien kulma pintaan nähden vaikuttaa merkittävästi viasta saatavaan signaaliin. Lähes pinnan suuntaisesti etenevät säröt leikkaavat pyörrevirrat suurelta alueelta ja voivat aiheuttavat suuren signaalin. Vastaavasti kapeat pystysuorat säröt aiheuttavat pienemmän signaalin. Säröpintojen epätasaisuus vaikuttaa myös signaaliin. Sileät lähes pinnan suuntaiset säröt eivät tuota suurta signaalia, koska ne eivät pysäytä pyörrevirtoja jyrkästi, mutta epätasainen pinta on enemmän kohtisuorassa pyörrevirtoihin nähden ja tuottaa siten suuren signaalin. Kuvassa 31 (Franklin et al. 2005) näkyy kaksi selvää epätasaisista vierintäväsymissäröä.



Kuva 31. Vierintäväsymissäröjä pinnassa (Franklin et al. 2005).

Kiskossa esiintyy monen tyyppisiä vikoja, joista kaikki aiheuttavat tunnistettavan signaalin pyörrevirtatarkastuksessa. Vikoja ei voida kuitenkaan täysin erottaa toisistaan pelkän pyörrevirtasignaalin avulla. Esimerkiksi paikkoihin joissa juna jarruttelee tai kiihdyttelee syntyy leveä WEL-kerros, joka on täynnä pieniä säröjä (Steenbergen & Dollevoet 2013). Nämä säröt voivat aiheuttaa pieneen anturiin suuren signaalin, vaikka ne eivät ole erityisen vaarallisia.

Pyörrevirtatarkastuksen soveltamisesta kiskoon on saatavilla vähän tieteellisiä julkaisuja. Näissä on pystytty paikantamaan head checking-tyyppiset viat luotettavasti. Julkaisuissa kuitenkin järjestelmällisesti ohitetaan muiden pintavikojen ja pinnan muokkautumisen aiheuttamat ongelmat ja anturityypin sekä koon valintaan liittyvä problematiikka. Anturin etäisyyden vaihtelun aiheuttamat ongelmat kuitenkin tunnistetaan yleisesti. Todellisten pyörrevirtojen keskittyminen hyvin ohueen pintakerrokseen mainitaan vain osassa artikkeleista (Dey et al. 2008, Thomas et al. 2000, Innotrack 2008, Papaelias et al. 2008, Song et al. 2011, Liu et al. 2013). Yhteenvetona voidaan todeta, että kiskon pyörrevirtatarkastukseen liittyvä kansainvälinen kirjallisuus ei ole vielä kypsää.

5 Yhteenveto

Pyörrevirtatarkastus on yksinkertaisiin fysikaalisiin ilmiöihin perustuva sähkömagneettinen aineettarikkomaton tarkastusmenetelmä. Oikein säädetyn pyörrevirtalaitteiston käyttäminen on yksinkertaista ja sen avulla voidaan helposti havaita pienetkin pinnassa olevat säröt. Laitteiston oikea säätäminen vaatii kuitenkin ammattitaitoa ja sähkömagneettisten ilmiöiden tuntemista.

Ratakisko pinnassa olevien vikojen havaitsemiseen pyörrevirtatarkastuksessa liittyy muutamia fysikaalisia rajoitteita. Teräs on ferromagneettinen materiaali, minkä vuoksi pyörrevirrat tunkeutuvat vain noin 0,1 mm syvään pintakerrokseen. Tästä seuraa se, että säröistä saatava tieto perustuu säröjen pintaan avautuvan osan geometriaan. Syvien säröjen koon arviointi perustuu siten ylimääräisten särön geometriaa koskevien oletusten tekemiseen. Säröjen syvyyttä voidaan tämän vuoksi arvioida kiskon pyörrevirtatarkastuksessa vain välillisesti.

Pyörrevirtojen tunkeumasyvyyttä kiskoon voidaan teoriassa parantaa kiskolle tehtävän kyllästysmagnetoinnin avulla. Kyllästysmagnetointia on käytetty onnistuneesti putkien laadunvalvonnassa putkitehtailla, mutta menetelmää ei käytetä kaupallisissa kiskon pyörrevirtatarkastuslaitteistoissa. Kiskon kyllästysmagnetoinnista tarkastussyvyyden parantamiseksi ei myöskään löydy tieteellisiä julkaisuja.

Matalasta tarkastussyvyydestä ja kiskon pinnan rakenteesta johtuen, merkityksellisten säröhavaintojen erottaminen merkityksettömistä on haastavaa. Esimerkiksi kiskon pinnan muokkauslujittuminen voi aiheuttaa särön kaltaisen signaalinmuutoksen. Ammattitaitoinen tarkasta pystyy erottamaan vioista tulevat signaalit muista havainnoista, mutta väärät signaalit aiheuttavat merkittäviä ongelmia tarkastuksen automatisointiin.

Lähteet

- Agilent Technologies *Impedance Measurement Handbook: A guide to measurement technology and techniques. (4th ed.)*, Agilent Technologies, <http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>.
- Callister, W.D. 2003, *Materials Science and Engineering: an Introduction*, 6th edn, John Wiley & Sons, USA.
- Dey, A., Thomas, H.-. & Pohl, R. 2008, "The important role of eddy current testing in railway track maintenance", *17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai, China* <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/393.pdf>, 25-28 Oct.
- Eclipse Scientific , *Eddy Current Testing Technology* [Homepage of Eclipse Scientific], [Online]. Available: <http://www.eclipsescientific.com/Books/Eddy%20Current%20Testing%20Technology%20%201st%20Edition%20-%20Sample.pdf> [27.11.2013, .
- Elektroniikan laitos 2000, , *Passiivikomponentit* [Homepage of Tampereen teknillinen yliopisto], [Online]. Available: <http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-2050/LV06-07/passiivikomponentit.pdf> [27.11.2013, .
- Franklin, F.J., Weeda, G.-., Kapoor, A. & Hiensch, E.J.M. 2005, "Rolling contact fatigue and wear behaviour of the infrastar two-material rail", *Wear*, vol. 258, no. 7–8, pp. 1048-1054.
- García-Martín, J., Gómez-Gil, J. & Vázquez-Sánchez, E. 2011, "Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing", *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2525-2565.
- GE Inspection Technologies 2005, , *Principles of Eddy Current Testing* [Homepage of GEInspectionTechnologies.com], [Online]. Available: <http://www.krautkramer.com.au/Hocking/Wall%20Chart.pdf> [2013, 11/26].
- Hellier, C.J. 2001, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 2nd edn, The McGraw-Hill Companies, USA.
- Innotrack 2008, *D4.4.1 – Rail Inspection Technologies*, Innotrack, www, cited 12.12.2013, available at: <http://www.innotrack.net/IMG/pdf/d441.pdf>.
- JFE Steel Corporation , *Rail. Catalog, Cat.No.D1E-001-00* [Homepage of JFE Steel Corporation], [Online]. Available: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/shapes/catalog/d1e-001.pdf> [26.11.2013, .
- Kapoor, A., Fletcher, D.I., Franklin, F.J., Beagles, A.E., Burstow, M., Allen, R., Evans, G. & Jaiswal, J. 2006, *Management and Understanding of Rolling Contact Fatigue*, Rail Safety and Standards Board, WWW, available at: http://www.rssb.co.uk/SiteCollectionDocuments/pdf/reports/research/T355_rpt_final_lit_rev.pdf.
- Kauppinen, M. 2010, *Ratakiskon elinkaari*, Tampereen teknillinen yliopisto.

- Liu, Z., Koffman, A.D., Waltrip, B.C. & Wang, Y. 2013, "Eddy Current Rail Inspection Using AC Bridge Techniques", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 118, pp. 140-149.
- McMaster, R.C. 1977, "The History, Present Status, and Future Developments of Eddy Current Tests", *Eddy current nondestructive testing: proceedings of the Workshop on Eddy Current Nondestructive Testing*, ed. G.M. Free, National Bureau of Standards, USA, 3-4 Nov.
- NDT Resource Center *Introduction to Eddy Current Testing*, (www), cited 19.11.2013, available at: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm.
- Olympus 2013, , *Eddy Current Probes* [Homepage of Olympus Corporation], [Online]. Available: <http://www.olympus-ims.com/en/ec-probes/> [27.11.2013, .
- Papaelias, M., Roberts, C. & Davis, C.L. 2008, "A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, , no. 222, pp. 367-384.
- Pohl, R., Krull, R. & Meierhofer, R. 2006, "A new eddy current instrument in a rail grinding train", *9th European Conference of NDT* NDT.net, Berlin, September.
- Popovic, Z. & Popovic, B.D. 2000, *Introductory Electromagnetics*, Prentice Hall, New Jersey.
- Railway company PUTEETS 2013, . Available: <http://puteets.all.biz/fi/virhe-havaitseminen-s115993> [2013, 22.11.2013].
- Saariaho, P. 1995, *Pyörrevirtatarkastus I ja II. Opintomateriaali*. Polartest Oy, Vantaa.
- Schmid, F., Burstow, M., Clark, S., Eickhoff, B., Hiensch, M., Hsu, S.S. & Kent, S. (eds) 2010, *Wheel-Rail Best Practice Handbook*, First edn, University of Birmingham Press; A & N Harris, Great Britain.
- SFS-EN 1711 2000, *Non-destructive examination of welds. Eddy current examination of welds by complex plane analysis*, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki.
- Song, Z., Yamada, T., Shitara, H. & Takemura, Y. 2011, "Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing", *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, , no. 3, pp. 549-550.
- Steenbergen, M. & Dollevoet, R. 2013, "On the mechanism of squat formation on train rails – Part I: Origination", *International Journal of Fatigue*, vol. 47, no. 0, pp. 361-372.
- Thomas, H.-M., Junger, M., Hintze, H., Krull, R. & Rühle, S. 2000, "Pioneering Inspection of Railroad Rails with Eddy Currents", *15th World Conference on Nondestructive Testing* NDT.net, www, cited 12.12.2013, available at: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn796/idn796.htm>, 15-21.10.

Tunna, J., Sinclair, J. & Perez, J. 2007, "A review of wheel wear and rolling contact fatigue", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 221, pp. 271-289.

Young, H.D., Freedman, R.A. & Ford, A.L. 2008, *Saers and Zemansky's University Physics with Modern Physics*, 12th edn, Pearson Addison Wesley, San Francisco.

Zerbst, U., Mädler, K. & Hintze, H. 2005, "Fracture mechanics in railway applications—an overview", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 72, no. 2, pp. 163-194.

Tässä työssä hyödynnettävät sähkötekniikan peruskäsitteet

Sähkö- ja magneettikentän voimakkuuksia kuvataan monella eri suureella. Tämä johtaa helposti tarpeettomaan sekavuuteen. Asian selkeyttämiseksi sähkötekniikan perusyksiköt on listattuina taulukossa 1. Vastaavasti sähkökentän ja magneettikentän voimakkuutta kuvaavat suureet ovat listattuina taulukoissa 2 ja 3. Näiden taulukoiden on tarkoitus toimia sähköisten ja magneettisten ilmiöiden hahmottamisen tukena, muttei selittää näitä ilmiöitä syvemmin.

Taulukko 1. Sähkötekniikan perusyksiköt

Suure	Yksikön nimi	Yksikön tunnus	Johdannaismuodot
Sähkövirta	Ampeeri	A	C/s
Varaus	Coulombi	C	As
Jännite	Voltti	V	J/C
Magneettivuo	Weber	Wb	V/s, Tm ²
Magneettivuon tiheys	Tesla	T	Wb/m ² , V/sm ²
Resistanssi	Ohmi	Ω	V/A
Kapasitanssi	Faradi	F	As/V
Induktanssi	Henry	H	Vs/A

Taulukko 2. Sähkökenttää kuvaavat suureet.

Nimi	Kaava	Yksikkö
Sähköinen voima (Coulombin voima)	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ q_1q_2 }{r^2}$	N (15)
Sähkökenttä	$E = \frac{F_0}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$	N/C (16)
Potentiaali (=potentiaali-energia/varaus)	$V_E = - \int_a^\infty E \cdot dl$	V = J/C (17)
Jännite eli potentiaaliero	$U_{ab} = V_{E_{a \rightarrow b}} = - \int_a^b E \cdot dl$	V = J/C (18)
Sähkökentän vuo	$\Phi_E = \int E \cdot dA = \int E \cos\phi \, dA$	Nm ² /C = Jm/C (19)
Virta	$I = \frac{dq}{dt}$	A=C/s (Ampeeri) (20)
Virran tiheys	$J = \frac{I}{V}, \text{ johtimessa } J = \frac{I}{A}$	A/m ³ tai A/m ² (21)

Taulukko 3. Magneettikenttää kuvaavat suureet.

Nimi	Kaava	Yksikkö
Magneettinen voima	$F = qv \times B$	N
Magneettikenttä [=magneettivuon tiheys]	$B = \frac{\mu_0 qv \times \hat{r}}{4\pi r^2}$	$T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{As}{m^2}$
Magneettikentän voimakkuus	$H = \frac{B}{\mu_r} \Leftrightarrow B = H\mu_r$	A/m
Magneettivuo	$\Phi_B = \int B \cdot dA = \int B \cos\phi dA$	Wb=As
Suhteellinen permitiivisyys	$\mu_r = \mu_0(1 + \chi_m)$	Tm/A

Sähkökenttä on yhtälön 16 mukainen, eli sähköinen voima määrittelee sähkökentän. Magneettikenttää ei voida määritellä samalla tavalla, koska magneettikenttä sekä sen aiheuttama voima riippuvat varauksen nopeudesta. Yhtälöissä 22 ja 23 on esitelty magneettikentän aiheuttama voima pistemäiseen varaukseen, ja pistemäisen varauksen aiheuttama magneettikenttä. Magneettikenttä ja sähkökenttä ovat luonteeltaan hyvin erilaisia, ja sen vuoksi näiden määritelmätkin poikkeavat toisistaan.

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-269-2
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

