

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Antti Kontto

HIHNAKALANTERIN TERÄSHIHNAN KUNNONVALVONTA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 25.03.2008

Työn valvoja

Professori Raimo Sepponen

Työn ohjaaja

Hannu Rautiainen
Metso Automation Oy

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Metso Paper Oy:n Järvenpään yksikössä kalanterituotekehityksen tilaamana työnä vuoden 2007 aikana. Metso Automatio Oy on osallistunut työhön antamalla resursseja työn ohjaamiseen sekä tukemiseen kunnonvalvontajärjestelmän kannalta katsottuna. Haluan kiittää Metso Automaationin henkilökunnasta Hannu Rautiaista, työn ohjaaja, sekä Mikko Härköstä neuvoista ja tuesta työtä tehdessä. Lisäksi haluan kiittää Metso Paperin henkilökunnasta Mika Viljanmaata sekä Jani Hakolaa kalantereihin liittyvän tiedon jakamisesta.

Kiitän professori Raimo Sepposta työn valvonnasta sekä työhön liittyvästä neuvonnasta. Suuri kiitos kuuluu myös vanhemmilleni, jotka mahdollistivat tuellaan tämän työn sekä opintojeni valmistumisen.

Järvenpäässä 04.03.2008

Antti Kontto

Tekijä: Antti Kontto

Työn nimi: Hihnakalanterin teräshihnan kunnonvalvonta

Päivämäärä: 25.03.2008

Sivumäärä: 113

Osasto: Sähkö- ja tietoliikennetekniikka

Professuuri: S-66 Sovellettu elektroniikka

Työn valvoja: Raimo Sepponen

Työn ohjaaja: Hannu Rautiainen

Tämän diplomityön päätavoite oli selvittää tekniikoita, joilla pystyttäisiin parantamaan hihnakalanterin teräshihnan kunnonvalvontaa nykyisestään. Eri tekniikoilla pyrittiin selvittämään teräshihnan pyörimistäajuus sekä havaitsemaan teräshihnaan syntyneet viat.

Työssä testattiin eri tekniikoiden soveltuvuutta ongelmien ratkaisuun. Teräshihnan pyörimistäajuuden määrittämiseen käytettiin autokorrelaatiota, pyörrevirta-anturia sekä valokennoa. Teräshihnassa olevien vikojen havaitsemiseksi testattiin pyörrevirta-anturin sekä mikrofoniin soveltuvuutta. Testattavia tekniikoita valittaessa valintakriteereinä pidettiin yksinkertaisuutta, alhaisia kustannuksia sekä käyttöön soveltuvia valmiita toteutuksia.

Testit suoritettiin kaikille muille paitsi autokorrelaatiolle laboratorio-olosuhteissa tarkoitukseen suunnitellulla testilaitteella. Tämän lisäksi teräshihnan pyörimistäajuuden määrittäystä testattiin tuotantolaitteessa autokorrelaation ja pyörrevirta-anturin osalta.

Testilaitteella sekä tuotantolaitteella saatujen tuloksien yhdistämisen jälkeen voidaan todeta, että teräshihnan pyörimistäajuuden määrittämiseen soveltuvat parhaiten autokorrelaatio sekä valokenno. Pyörrevirta-anturin toiminta oli vaaditulla tasolla testilaitteella tehdyissä testeissä, mutta tippuivat käyttökelvottomiksi tuotantolaitteella. Vian havainnointiin testilaitteella soveltui paremmin pyörrevirta-anturi herkkyytensä sekä tarkkuutensa johdosta. Myös mikrofoneilla päästiin hyviin tuloksiin, mutta sen herkkyys ei yltänyt pyörrevirta-anturin tasolle.

Avainsanat: kunnonvalvonta, kalanteri, teräshihna

Author: Antti Kontto

Name of the Thesis: Condition Monitoring of Metal Belt in Metal Belt Calender

Date: 25.03.2008

Number of pages: 113

Department of Electrical and Communications Engineering

Professorship: S-66 Applied Electronics

Supervisor: Raimo Sepponen

Instructor: Hannu Rautiainen

Purpose of this master thesis is to find technique to improve condition monitoring of metal belt in metal belt calender. Different techniques were used to find out rotation frequency of metal belt in metal belt calender and to inspect failures in metal belt.

Autocorrelation, eddy current sensor and photoelectric sensor were used to measure rotation frequency of metal belt. To inspect failures in metal belt, eddy current sensors and microphones were used. When used methods were chosen, great interest was used to evaluate simplicity, cost and ready-to-use degree.

Tests were carried out with purpose-built test equipment in laboratory environment excluding autocorrelation. Addition to these tests rotation frequency of metal belt was also tested in production equipment with autocorrelation and eddy current sensor.

Results acquired with test and production equipment indicate that autocorrelation and photoelectric sensor were best suitable for measuring rotation frequency of metal belt. Eddy current sensor worked properly with test equipment but failed with production equipment. Failure inspection was better carried out with eddy current sensor thanks to sensitivity and accuracy of sensor. With microphone results were also good but didn't achieve eddy current sensors standards.

Keywords: condition monitoring, calender, metal belt

SISÄLLYSLUETTELO

Nimilehti

Alkusanat

Diplomityön tiivistelmä

Abstract of the Master's Thesis

Sisällysluettelo

Symbolit ja lyhenteet

1.	JOHDANTO.....	10
2.	TUTKIMUKSEN TARKOITUS	12
2.1	KALANTERIN TERÄSHIHNAAN KIERROSTAAJUUDEN MITTAUS	12
2.2	KALANTERIN TERÄSHIHNAAN VIANHAVAINNOINTI	12
3.	HIHNAKALANTERI.....	14
3.1	TOIMINTAPERIAATE	14
3.2	SAAVUTETTU HYÖTY	15
3.3	TERÄSHIHNA.....	15
3.4	OLOSUhteet JA PAPERITEHDASympÄRISTÖ	17
4.	SENSODEC 6S.....	19
4.1	VÄRÄHTELYNMITTAUS	19
4.2	TAHDISTETTU AIKAKESKIArVOISTUS.....	20
4.3	NYKYINEN HIHNAAN KUNNONVALVONTA.....	23
5.	HIHNAAN TAHDISTUS.....	26
5.1	AUTOKORRELAATIO.....	26
5.1.1	<i>Diskreetti aikaisten signaalien risti- ja autokorrelaatio.....</i>	<i>26</i>
5.1.2	<i>Risti- ja autokorrelaation ominaisuuksia.....</i>	<i>28</i>
5.1.3	<i>Jaksollisen sekvenssin korrelaatio.....</i>	<i>29</i>
5.2	PYÖRREVIRTA	31
5.2.1	<i>Pyörrevirran sähkömagneettinen perusta.....</i>	<i>32</i>
5.2.2	<i>Pyörrevirtatestausta</i>	<i>36</i>
5.3	HIHNAAN MERKKAUS MITTAUSPISTEELLÄ	42
5.3.1	<i>Mittauspisteen lukeminen optisella anturilla.....</i>	<i>42</i>
6.	HIHNAAN KUNNONVALVONTA.....	49

6.1	MIKROFONI.....	49
6.1.1	Kondensaattori- ja elektreettimikrofoni.....	49
6.1.2	Dynaaminen Mikrofoni.....	53
6.1.3	Esivahvistin.....	56
6.1.4	Suuntaominaisuudet.....	56
6.1.5	Taajuusvaste.....	57
6.1.6	Herkkyys.....	58
6.2	PYÖRREVIRTA-ANTURI.....	59
7.	KOKEELLINEN OSA	62
7.1	KOEJÄRJESTELYT	62
7.2	TAHDISTUKSEN MITTAUS	63
7.2.1	Pyörrevirta-anturi.....	63
7.2.2	Optinen anturi.....	66
7.2.3	Autokorrelaatio.....	68
7.3	VIAN HAVAINNOINTI HIHNASTA.....	69
7.3.1	Pyörrevirta-anturi.....	70
7.3.2	Mikrofoni	71
7.4	TUOTANTOLAITTEEN TAHDISTUS	73
8.	TULOKSET	76
8.1	TAHDISTUS	76
8.1.1	Signaalin piikkien esiintymistaajuuden keskihajonta	76
8.1.2	Signaalin piikkien nousuaika.....	79
8.1.3	Signaalin piikkien signaali-kohina-suhde.....	80
8.1.4	Pulssin pituus.....	81
8.1.5	Autokorrelaatio.....	82
8.2	HIUSHALKEAMAN HAVAINNOINTI	85
8.2.1	Pyörrevirta-anturit	85
8.2.2	Mikrofoni	88
8.3	ISKEMÄN HAVAINNOINTI.....	90
8.3.1	Pyörrevirta-anturit	90
8.3.2	Mikrofoni	93
8.4	TUOTANTOLAITTEEN MITTAUKSET	95
8.4.1	Nykyinen hihnan kunnonvalvonta.....	95
8.4.2	Tahdistus pyörrevirta-anturilla	97
9.	JOHTOPÄÄTÖKSET TULOKSISTA	99
9.1	TAHDISTUS	99
9.2	VIAN HAVAINNOINTI.....	102
9.3	TUOTANTOLAITTEEN HIHNAN KUNNONVALVONTA JA TAHDISTUS	106

10. YHTEENVETO	107
10.1 JATKOTUTKIMUS	110
LÄHDELUETTELO.....	111

Lyhenteet ja merkinnät

A	pinta-ala
A/D	analogia-digitaali
$\bar{B}$	magneettivuon tiheys
B	magneettikenttä
BNC	liitin tyyppi
C	kapasitanssi
δ	tunkeutumisvyvyys
d	kondensaattorilevyjen etäisyys
dB	desibeli
DO	Dark-On
ε	sähkömotorinen voima
ε	ilman dielektrisyysvakio $\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m
E	kondensaattorin yli oleva jännite
f	värähtelytaajuus
f_k	kierrostaajuus
F	voima
I	johteessa kulkeva virta
l	aikasiirtymä eli viive
l	magneettikentän alueella olevan johtimen osan efektiivinen pituus
LO	Light-On
L_0	alkuperäinen pituus
μ	permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
m	mittausten lukumäärä
M	herkkyys
$\bar{n}$	normaalin suuntainen yksikkövektori
N_x	x. mittauksen kohinan voimakkuus
NDT	Nondestructive testing, ainetta rikkomaton testaus
p	paine
Q	kondensaattorilevyjen välinen varaus
$r_{xx}(l)$	signaalin $x(n)$ autokorrelaatio
r_{xy}	signaalien $x(n)$ ja $y(n)$ välinen ristikorrelaatio
r	virtaelementin ja kenttäpisteen etäisyys
$\bar{r}$	etäisyyden yksikkövektori
R	resistanssista
σ	johtavuus
s_h	teräshihnan pituus
S_x	x. mittauksen signaalin voimakkuus
<i>Sensodec 6S</i>	Metso Automationin kunnon- ja käynninvalvonta järjestelmä
<i>STA</i>	Synchronous Time Averaging, Tahdistettu aikakeskiarvoistus
SNR_m	aikakeskiarvostetun signaalin signaali-kohina-suhde
α	lämpölaajenemiskerroin

t_k	kierrosaika
Δt	lämpötilan muutos
u	mikrofonin kalvon nopeus
v	ratanopeus
φ	resistiivisyys
ϕ	magneettivuo
X_L	induktiivinen reaktanssi
Z	impedanssi
Z_m	mekaaninen impedanssi
$Z_{m(sät)}$	säteilyimpedanssi

1. JOHDANTO

Nykyaikaisissa teollisuuden tuotantolaitteissa automaattinen käynnin- ja kunnonvalvonta ovat hyvin tärkeässä roolissa prosessin toiminnan kannalta. Tuotantolaitteiden herkeämätön reaaliaikainen valvonta varmistaa sen, että mahdolliset vikaantumiset huomataan ajoissa. Ajoissa todettu vika pystytään huoltamaan ja korjaamaan pienemmin toimenpitein. Lisäksi kunnonvalvonnalla vähennetään tuotantolaitteiden vaatimia alasajojen määrää, koska vaadittavat huollot pystytään keskittämään ennalta suunnitelluille huoltoseisokeille. Teollisuudessa käytettävät tuotantolaitteet monimutkaistuvat koko ajan, ja tämä lisää kunnonvalvonnalla valvottavien kohteiden ja rakenteiden lukumäärää. Yhä enemmän käytetään elektroniikkaa sekä elektronisia mittalaitteita, jotta pienetkin muutokset normaalitoiminnassa havaittaisiin. Elektroniikka on, ja tulee vielä kasvavassa määrin olemaan, osa nykyaikaista teollisuuden tuotantolaitetta. Tuotantomäärien kasvaessa laitteiden käyntinopeudet ovat nousseet yhä korkeammiksi. Tällöin laitteisiin mahdollisesti syntyvien vikojen eteneminen kriittiselle tasolle, niiden syntymisen jälkeen, saattaa olla hyvinkin nopeaa. Aika vian syntymisestä siihen, kun jotain peruuttamatonta tapahtuu, saattaa olla hyvinkin lyhyt. Tarkka, automatisoitu kunnonvalvonta on siis elinehto laitteiston kunnossa pysymiselle, ja tätä kautta katkeamattomalle tuotannolle.

Tässä työssä tulen keskittymään kartongin valmistuksessa käytettävän hihnakalanterin ruostumattomasta teräksestä valmistetun hihnan kunnonvalvontaan. Teräshihnan mahdollinen säröytyminen ja kolhiintuminen on pyrittävä havaitsemaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, jotta hihna saataisiin seuraavan suunnitellun seisokin aikana korjattua ja huollettua. Tällöin varmistutaan, ettei kalanterista aiheudu laatuhaittoja paperiin.

Työ jakaantuu kahteen kokonaisuuteen; ensin selvitetään menetelmä hihnan kierrosajan ja -taajuuden tarkkaan mittaamiseen, jonka jälkeen selvitetään mahdollisia tekniikoita, jotka soveltuisivat hihnassa olevien vikojen tunnistamiseen. Ensimmäisenä tavoitteena on löytää riittävällä tarkkuudella toimiva kierrostaajuuden mittaja, jotta hihnan kunnonvalvontasignaalin tahdistettu aikakeskiarvoistus olisi mahdollista. Työn toisena tavoitteena on löytää anturitekniikka, jolla päästään nykyistä vianvalvontaa parempaan lopputulokseen.

Tarkemmin tutkimuksen tarkoituksesta sekä motiiveista kerrotaan luvussa 2. Luvussa käydään läpi syyt työn tekemiseen, sekä millaisiin ongelmiin tällä työllä haetaan ratkaisua.

Luvussa 3 esitellään tarkemmin uuden innovatiivisen hihnakalanterin toimintaa sekä ominaisuuksia. Hihnakalanterin käyttöönotosta saavutettavat hyödyt verrattuna perinteiseen nippikalanteriin käydään myös läpi tässä luvussa. Lopuksi käydään vielä läpi kalanterissa sijaitsevan teräshihnan ominaisuuksia.

Luvussa 4 esitellään Metso Automation Oy:n kunnon- ja käynninvalvontaan suunnitellun Sensodec 6S järjestelmän toimintaa. Sensodec 6S on myös hihnakalanterissa tällä hetkellä käytettävä kunnonvalvontajärjestelmä, joten sen

voidaan katsoa kuuluvan tiiviisti kalanterin toimintaan. Luvussa esitellään työn kannalta tärkeitä Sensodec 6S:n ominaisuuksia sekä toimintoja.

Hihnan kierrostaajuuden mittaamiseen käytettävien anturitekniikoiden teoriaan syvennyttään luvussa 5. Luvussa käydään läpi eri tekniikoiden toimintaperiaatteet sekä työn aiheen kannalta merkittävät edellytykset sekä rajoitteet. Läpikäytävät osakokonaisuudet ovat autokorrelaatio, pyörrevirta-anturi sekä optinen valokenno.

Luvussa 6 keskitytään tekniikoihin, joilla pyritään havaitsemaan teräshihnassa olevat hiushalkeamat sekä iskemät. Tekniikoiden taustalla olevat teoriat käydään läpi ja niiden soveltuvuutta ongelman ratkaisuun punnitaan. Tutkittavia tekniikoita ovat pyörrevirta-anturi sekä mikrofoni.

Anturitekniikoiden soveltuvuutta mittauksiin selvitettiin tekemällä niillä erä erilaisia testejä. Tehtyjen testien kuvaus on esitetty luvussa 7, jossa selvitetään mitä testattiin ja miten. Kokeellisessa osassa myös esitellään yksityiskohtaisesti anturit, jotka valittiin testien tekemiseen.

Kokeissa saatujen tuloksien esittely on suoritettu luvussa 8. Tulokset on esitetty testi kohtaisesti eri antureille. Tässä luvussa ainoastaan esitellään saadut tulokset, analysointi suoritetaan seuraavassa luvussa.

9. luvussa tehdään johtopäätökset edellisessä luvussa esitetyistä tuloksista. Tuloksien perusteella tehdään arvio, mitkä anturien ominaisuudet sekä mittauksien tekijät vaikuttavat mitenkään tuloksiin.

2. TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Hihnan kunnonvalvonnalla pyritään selvittämään hihnan kunto, sekä tämän tiedon pohjalta toimimaan laitteiston oikean toiminnan kannalta vaaditulla tavalla. Jos hihnassa havaitaan vika, tuotantolaitteisto ajetaan tarvittaessa alas huoltoa varten. Tällaiset huoltoseisokit ovat kuitenkin kalliita, sillä niiden aikana koko tuotanto seisoo. Tämän vuoksi olisi taloudellisesti kannattavaa suorittaa mahdollisimman moni huoltotyötä saman huoltoseisokin aikana.

Tällä työllä tähdätään tekniikkaan, joka osaltaan auttaisi huoltoseisokkien suunnittelussa ja aikatauluttamisessa. Laitteisto, joka ilmoittaisi hihnakalanterin hihnan lähitulevaisuudessa tarvitseman huollon tarpeen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, mahdollistaisi huoltoseisokin suunnittelun ja toteutuksen tehokkaasti.

2.1 Kalanterin teräshihnan kierrostaajuuden mitta

Hihnan tarkan kierrostaajuuden määrittäminen mahdollistaa kunnonvalvonnassa käytettävien anturisignaalien tahdistetun aikakeskiarvoistuksen. Näin saadaan käyttöön signaalinkäsittelytekniikka, joka paljastaa kohinan alta pienetkin muutokset, jotka esiintyvät jaksollisesti kerran kierroksessa. Tämä mahdollistaa pientenkin hihnassa esiintyvien vikojen havaitsemisen sekä tunnistamisen.

Tällä hetkellä kierrostaajuuden määrittäminen on toteutettu laskennallisesti hihnan pituuden sekä laitteen käyntinopeuden avulla. Hihna saattaa kuitenkin venyä käytössä jännitysvoiman sekä lämmön vaikutuksesta, joten täysin tarkkaa kierrostaajuutta on kylläkin ajan hetkellä vaikea määrittää. Myös hihnan mahdollinen luistaminen suhteessa teloihin saattaa aiheuttaa virhettä pyörimisnopeudessa, jonka ansiosta keskiarvoistaminen ei onnistu halutulla tavalla.

Työn tarkoitus on löytää menetelmä tai tekniikka, jolla kierrostaajuus määritetään suoraan itse hihnasta. Tällöin kierrostaajuus saadaan selville tarkasti suoraan kohteesta, eikä välillisesti muiden suureiden kautta, jotka ovat alttiita virheille ja muutoksille.

2.2 Kalanterin teräshihnan vianhavainnointi

Automaattisella kunnonvalvonnalla pyritään havaitsemaan kaikki hihnaan mahdollisesti syntyvät viat. Vikojen havaitseminen mahdollisimman varhaisessa vaiheessa ja tarkasti, on edellytys luotettavalle kunnonvalvontajärjestelmälle.

Tällä hetkellä tiedossa on kaksi erilaista hihnan vaurioitumistapaa; sivuttaissuunnassa laajeneva hiushalkeama sekä iskemä. Nämä kaksi eri tapausta on pyrittävä havaitsemaan mahdollisimman nopeasti ja tarkasti hihnan pinnasta kalanterin käytön aikana.

Halkeama voi syntyä hihnaan, joko ulkopuolisen partikkelin joutumisesta puristuksiin hihnan ja telan väliin, tai metallin väsymisestä. Ulkopuolisen partikkelin joutuminen hihnan ja telan puristuksiin aiheuttaa hihnan pintaan pistemäisen särön. Tämän hetkisen tiedon mukaan särön alku laajenee molemmista päistä noin yhden senttimetrin päivävauhtia. Särön kasvaminen johtuu hihnaan kohdistuvasta korkeasta jännitysvoimasta sekä jatkuvasta taipumisen suunnan muuttumisesta. Metallin väsymisestä johtuvasta säröytymisestä ei vielä ole kokemuksia kentältä. Tästä huolimatta voidaan pitää täysin mahdollisena, että metallin väsymisestä saattaa aiheutua halkeamia hihnaan pitkän ajan kuluessa.

Iskemän hihnan pintaan aiheuttaa myös vieraan partikkelin joutuminen hihnan ja telan väliin. Tällöin syntyvä iskemä aiheuttaa hihnassa ollessaan laatuvirheitä rainaan kalanteroinnin aikana. Ongelmia aiheutuu myös, kun iskemän muokkaama hihna joutuu puristuksiin termotelan ja taipumakompensoidun telan väliin. Tuloksena saattaa olla telojen tai hihnan vaurioituminen sekä nipin värähtelyä.

Tässä työssä pyritään löytämään anturitekniikka, jolla yllä mainitut viat saadaan havaittua nopeasti pyörivästä teräshihnasta. Havaitsemisen täytyy olla tarkkaa ja nopeaa, jotta anturin käyttäminen kunnonvalvontasignaalin tuottajana olisi perusteltua.

3. HIHNAKALANTERI

Hihnakalanterissa perinteinen nippi tai nipit on korvattu yhdellä metrin mittaisella, pituussuuntaisella kalanterointivyöhykkeellä. Tämä pitkä nippileveys saavutetaan hihnakalanterissa olevan sileän teräshihnan sekä sen kanssa kosketuksissa olevan termotelan ansiosta. Myös teräshihna on lämmitettävä, joten rainaan saadaan plastisoiva lämpövaikutus molemmilta puolilta. Tällä uudella, innovatiivisella tekniikalla pystytään parantamaan useita paperin laatuominaisuuksia, joiden saavuttaminen perinteisiin menetelmin on vaikeaa tai jopa mahdotonta.[1]

3.1 Toimintaperiaate

Hihnakalanterissa raina johdetaan ohjaustelojen avulla teräshihnan ja termotelan väliin, jossa kalanterointi tapahtuu. Viipymäaika nipissä on noin satakertainen tavallisiin telanippeihin verrattuna. Kalanterointivyöhykkeen pidennetyn viipymäajan, korkean lämpötilan, paperirainan kosteuden sekä matalan puristuspaineen ansiosta, rainan pinta saadaan plastisoitumaan tehokkaasti, johtaen paperin matalaan karkeuteen ja parannettuun painettavuuteen. Plastisoituminen tapahtuu rainan molemmille puolille, sillä hihna ja termotela ovat molemmat lämmitettävissä. [1]



Kuva 1. Metso Paper Oy:n hihnakalanteri ValZone. [1]

3.2 Saavutettu hyöty

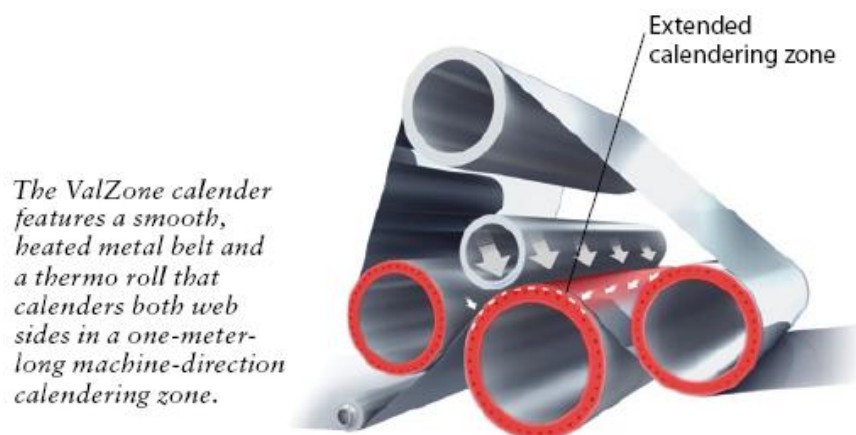
Pitkän nipin etuna on siis se, että viipymäaika saadaan pidennettyä merkittävästi. Tällöin lämpö pääsee vaikuttamaan mahdollisimman kauan rainaan, ja tätä kautta plastisoituminen pinnassa paranee. Tämä parantaa huomattavasti pintaominaisuuksia; formaatiomittakaavainen sileys paranee, jolloin kartongin pinnoista tulee erittäin tasaisia ja kartonki näyttää paremmalta molemmilta puolilta. Valmistettavan tuotteen painettavuus on erinomainen sekä musteen asettuminen ja painojälki tasaisempaa.

Pitkän viipymäajan ansiosta myös kalanteroinnin lämpötilaa voidaan laskea kohtuulliseen (150...200 °C) arvoon, jolloin ylimääraisten lämmön tuottajien käyttäminen on tarpeetonta. Hyvien plastisoimisominaisuuksien ansiosta kalanterointipaine pystytään pitämään alhaisena, jolloin paperin bulkki pysyy halutun suuruisena. Pitkän kalanterointiosan ansiosta ajonopeutta pystytään nostamaan, sillä viipymäaika nipissä pysyy nopeuden nostosta huolimatta tarpeeksi pitkänä. Ajonopeuden nostaminen mahdollistaa taas tuotannon kasvattamisen, jos muita pullonkauloja ei linjassa ole. [1]

3.3 Teräshihna

Hihnakalanterin metallihihna on martensiittista, erkautuskarkaistua ruostumatonta terästä, joka magneettisilta ominaisuuksiltaan on ferromagneettista. Hihnan valmistusmateriaalin sähköisistä ja magneettisista ominaisuuksista voidaan mainita resistiivisyys (φ) 0,80 $\mu\Omega\text{m}$ sekä suhteellinen permeabiliteetti (μ) 483. Hihna on tuotantolaitteessa 4400 mm leveä ja 11755 mm pitkä, sekä se on hiottu 0,8 mm paksuuteen.

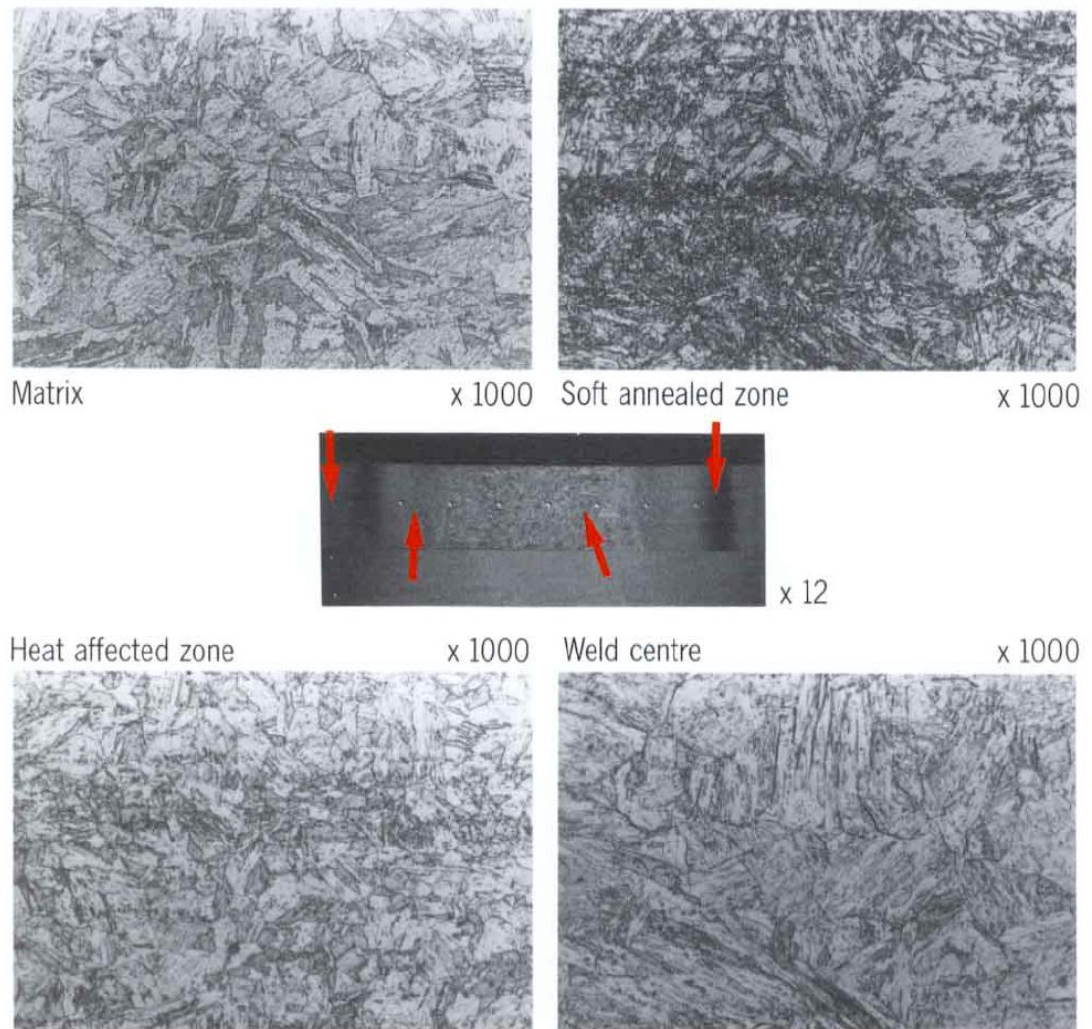
Teräshihna liikkuu kalanterissa samalla nopeudella kuin raina. Hihnakalanterin tämän hetkinen huippunopeus on 600 m/min, joten tällöin ratanopeus on yksikköä muuttamalla 10 m/s. Yksikköä m/min käytetään tässä yhteydessä siitä syystä, että se on vakiintunut ilmaisemaan paperiteollisuudessa ja paperikoneissa nopeutta.



Kuva 2. Hihnakalanterin telojen ja hihnan sijainti laitteessa. [1]

Sivuttaissuunnassa hihnan liike on olematonta. Hihnan paikkaa sivusuunnassa valvotaan jatkuvasti optisilla antureilla, ja jos muutosta sijoittumisessa havaitaan, korjataan hihnan paikkaa ohjaustelojen avulla.

Päättymätön teräshihna on valmistettu siten, että se sisältää useita poikittaissuuntaisia hitsausaumoja. Hihna on rakennettu kahdeksasta teräslevyn kappaleesta, jotka yhdistetään toisiinsa TIG-hitsaamalla. Hihna hiotaan paksuuteensa tarkasti niin, että paksuuden poikkeamaksi sallitaan 0,02 mm koko hihnan alalla saumat mukaan lukien. Hitsausaumot aiheuttavat hihnaan pituussuunnassa mikrorakenteellisia epäjatkuvuuskohтия, joiden pituus on noin 6 mm. Tämän lisäksi saumoista hihnan pintaan aiheutuvat tasaisuuden muutokset saavat maksimissaan olla 0,05 mm suuruisia. Kuvassa 3 on esitetty hihnan mikrorakenne eri osissa hihnää. [2]



Kuva 3. Hitsauksen vaikutus hihnan materiaalissa mikrorakennetasolla; Karkaistu perusmatriisi (vasemmalla ylhäällä), pehmeäksi hehkutettu alue (oikealla ylhäällä), lämmön vaikutusalue (vasemmalla alhaalla) ja hitsisauma (oikealla alhaalla). [2]

3.4 Olosuhteet ja paperitehdasympäristö

Hihnakalanterin lämmitettävien ohjaustelojen sekä termotelan ansiosta, lämpötila nousee varsin korkeaksi kalanterin läheisyydessä. Telan ollessa noin 200°C asteessa ja hinnankin ollessa noin 150°C asteessa, voidaan olettaa, että ympäröivän ilman lämpötila saattaa lähennellä 100°C astetta. Tämä asettaa vaatimuksen elektroniikalle sekä antureille, joilla kalanterin toimintaa valvotaan.

Korkean lämpötilan lisäksi kalanterin läheisyydessä vallitsee myös korkea ilmankosteus. Kosteus johtuu rainasta poistuvasta kosteudesta, joka kuivaimien ja lämmön vaikutuksesta höyrystyy ilmaan. Tästä syystä ilman suhteellinen kosteus saattaa nousta lähelle 100 % useissa paikoissa paperikonetta. Kosteudesta johtuen tehdastiloissa olevat anturit on suojattava, tai niiden on omattava tarpeellinen suoja kosteutta vastaan.

Tehdasympäristössä toimiessa ei voida välttyä pölyn sekä muun lian kerääntymiseltä. Kuten kosteuttakin vastaan, on anturien, joita tiloissa käytetään, oltava suojattu pölyä sekä vieraita kappaleita vastaan. Anturien on omattava joko itse soveltuva suojausluokka, tai sitten ne on suojattava erikseen.

Sähkölaitteiden suojausta arvioidaan kansainvälisellä kotelointiluokituksella, niin sanotulla IP-koodilla. IP-luokitus ottaa huomioon sekä vesisuojauksen, että suojauksen vieraiden esineiden ja pölyn sisäänpääsystä. Koodi on muotoa ”IP XY”, jossa X:n ja Y:n paikalle tulevat numerot ilmaisevat suojausluokan. Ensimmäinen numero X kertoo, miten laite on suojattu vieraiden esineiden ja pölyn sisäänpääsystä vastaan. Koodin toinen numero Y kertoo, miten laite on suojattu vedeltä. Taulukossa 1 (s. 18) on esitetty selitykset suojausta kuvaaville numeroille. [3]

Taulukko 1. *IP-luokituksessa esiintyvien numeroiden selitykset. [3]*

Numero	Suojaus vieraita esineitä vastaan	Suojaus vettä vastaan
0	Suojaamaton	Suojaamaton
1	Kun esineen halkaisija on yli 50 mm	Pystysuoraan tippuvalta vedeltä
2	Kun esineen halkaisija on yli 12,5 mm	Tippuvalta vedeltä (laitteen kallistus 15°)
3	Kun esineen halkaisija on yli 2,5 mm	Satavalta vedeltä
4	Kun esineen halkaisija on yli 1,0 mm	Roiskuvalta vedeltä
5	Pölysuojattu	Vesisuihkulta
6	Pölytiivis	Voimakkaalta vesisuihkulta
7		Lyhytaikaiselta upotukselta
8		Jatkuvalta upotukselta

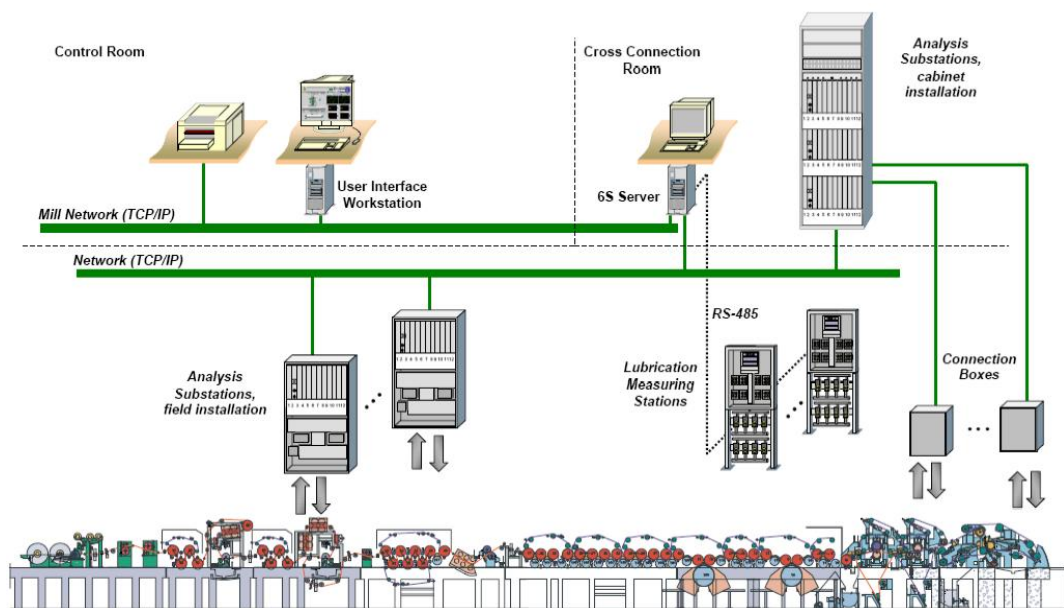
4. SENSODEC 6S

Sensodec 6S on Metso Automation Oy:n integroitu ratkaisu laitteiston kunnon- ja käynninvalvontaan sekä ajettavuuden analysointiin. Tämä systeemi analysoi satoja korkeataajuisia prosessin paineenvaihteluita sekä mekaanisia värähtelyitä paperinvalmistuksen tuotanto- ja jälkikäsittelylinjalla. Sensodec 6S:n tarjoaman reaaliaikaisen tiedon ja analyysin ansiosta, käyttöhenkilökunta pystyy ennustamaan ja suunnittelemaan tuotantolaitteiden huoltoseisokit oikeaan aikaan sekä oikeista syistä. [4]

Sensodec 6S järjestelmä koostuu joukosta anturipisteitä, joissa käytetään yleisesti paine- ja värähtelyantureita sekä magneettisia, induktiivisia ja optisia liipaisukytkimiä. Anturien ja kytkimien signaalit joko kootaan liitântäkoteloihin, joista ne keskitetysti ohjataan ristikytkentäkaappiin (Cabinet Installation) tai sitten signaalit ohjataan suoraan ala-asemille (Field Installation). Ala-asemilla (FSM-prosessorikortilla) suoritetaan signaalien AD-muunnokset sekä tarvittavat signaalinkäsittelyt. Serverille data kulkee väylää pitkin, jossa se on tehdasverkossa olevien päätteiden saatavilla. [5]

4.1 Värähtelynmittaus

Värähtelynmittaukset suoritetaan pääasiassa kiihtyvyyssantureilla ja nopeusantureilla. Kiihtyvyyssantureilla mitattu kiihtyvyys pystytään muuttamaan integroimalla nopeudeksi, mistä syystä nopeusantureiden käyttö on hyvin vähäistä. Kiihtyvyyssanturien etuina ovat myös laajempi taajuusvaste, laajempi dynaaminen alue sekä se ettei se sisällä liikkuvia osia.



Kuva 4. Sensodec 6S kunnon- ja käynninvalvontajärjestelmän rakenne. [5]

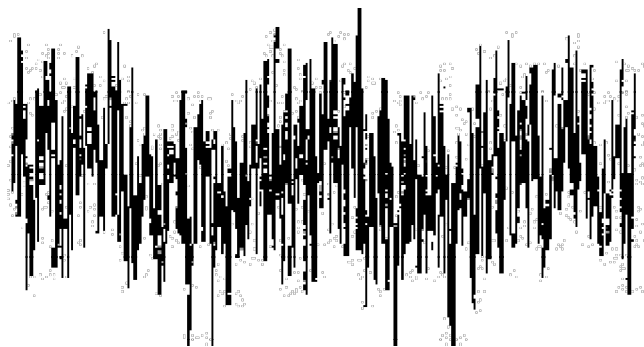
4.2 Tahdistettu aikakeskiarvoistus

Tahdistettu aikakeskiarvoistus (Synchronous Time Averaging – STA) on tekniikka, jolla mittauksen kohinatasoa pystytään vähentämään ja matalatasoiset signaalit pystytään erottamaan voimakkaista. Tekniikka on myös erittäin käyttökelpoinen ei-sinimuotoisien (kuten iskujen) vaihteluiden esittämiseen. Sensodec 6S käyttää tahdistettua aikakeskiarvoistusta selvittämään yksittäisten pyörivien koneiden ja komponenttien (tela, huopa, pumppu, viira, hammaspyörä, kytkin, jne.) vaikutuksen kokonaisuuteen. [5]

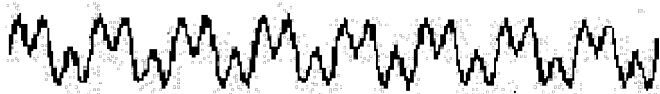
Tahdistettu aikakeskiarvoistus on analyysitekniikka, jolla saadaan selville liipaisukohteen vaikutus kokonaisvärähtelyyn. Näin saadaan näkyviin ainoastaan yksittäisen kohteen aiheuttama värähtely. Saadaksemme selville kuinka paljon pienempi tela (Kuva 6) vaikuttaa kokonaisvärähtelyssä, on meidän käytettävä tahdistettua aikakeskiarvoistusta. Tarkoituksena on suodattaa kaikkien muiden kohteiden aiheuttama värähtely pois. Analyysi aloitetaan keskiarvoistamalla mittauksia, jotka aloitetaan täsmälleen samasta kohdasta telan pyörähdystä. Pyörähdysten vaihetta tarkkaillaan, ja mittauksen käynnistäjänä toimii tahdistuspulssi.

Pienempään telaan tahdistuva värähtely on täsmälleen samassa kohdassa aikatasoa jokaisen mittauksen aikana. Muista komponenteista aiheutuvat värähtelyt tapahtuvat eri ajanhetkillä jokaisen mittausajanjakson aikana. Mittauksia suoritetaan yleensä kymmeniä tai satoja. Kun kaikki mittaukset on suoritettu ja laskettu yhteen, jaetaan tulos mittauksen lukumäärällä. Näin saadaan lopputulokseksi tahdistettu aikakeskiarvoistettu signaali.

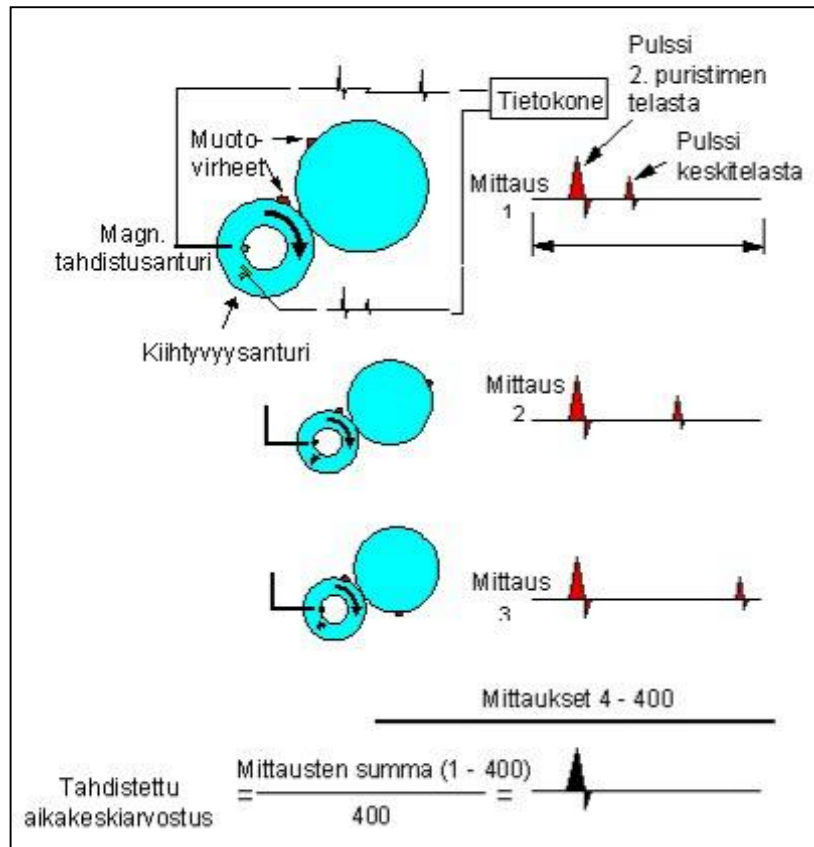
Ei keskiarvoistusta
(raakasignaali)



Telan pyörintään
tahdistettu
keskiarvoistettu
aikatasosignaali



Kuva 5. Tahdistetun aikakeskiarvoituksen vaikutus signaaliin. [5]



Kuva 6. Tahdistetun aikakeskiarvoistuksen periaate. [5]

Pienempään telaan tahdistamaton värähtely tahdistetussa aikakeskiarvostuksessa signaalissa lähestyy nollaa mittausten lukumääränfunktiona. Mitä suurempi on otettujen keskiarvojen määrä, sitä lähemmäksi nollaa tahdistamaton värähtely lähestyy. Tuloksena saadun signaalin signaali-kohina-suhde on parantunut kaavan 4.1 antaman tuloksen verran verrattuna yksittäiseen mittaukseen. [5]

$$SNR_m = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_m}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2 + \dots + N_m^2}} = \sqrt{m} \times SNR_i \quad (4.1)$$

missä

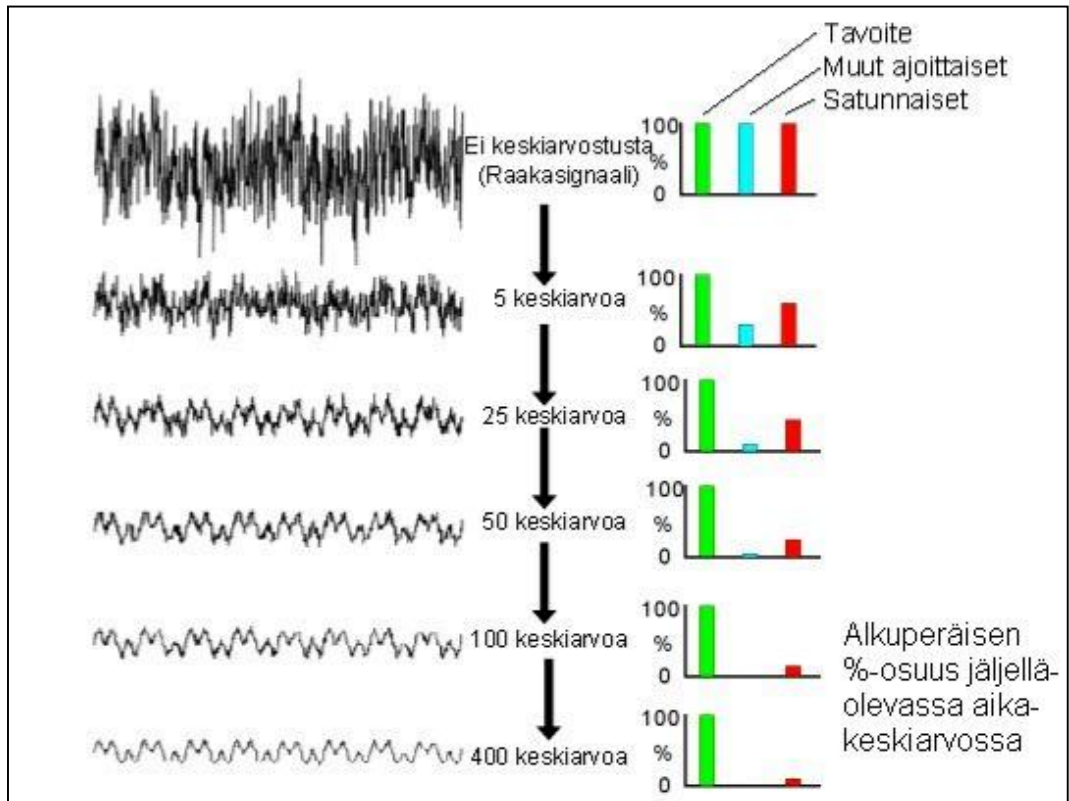
SNR_m on aikakeskiarvostetun signaalin signaali-kohina-suhde

S_x on x. mittauksen signaalin voimakkuus

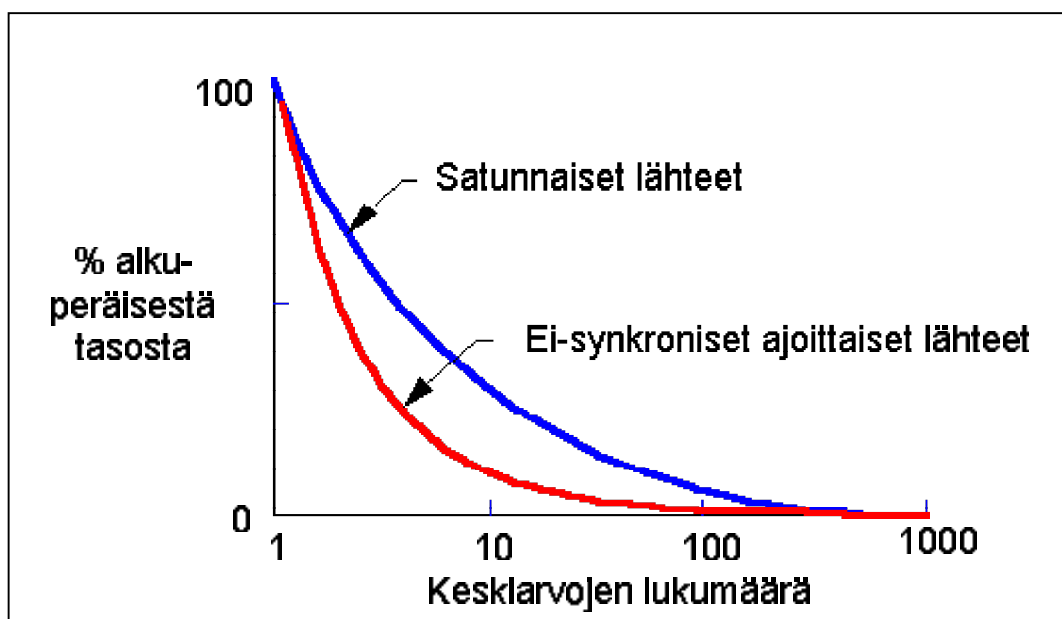
N_x on x. mittauksen kohinan voimakkuus

m on tehtyjen mittausten lukumäärä

Kuvassa 7 nähdään, mikä vaikutus keskiarvojen määrällä on synkroniseen, ei-synkroniseen sekä satunnaiseen signaalikomponenttiin. Kuvassa 8 sama asia on esitetty ei-synkronisten ja satunnaisten komponenttien kohdalta. Ei-synkronisten komponenttien vaimenevat $1/m$:llä ja satunnaiset komponentit pienenevät tekijällä $1/\sqrt{m}$.



Kuva 7. Keskiarvojen lukumäärän vaikutus ei-synkronisiin ja satunnaisiin lähteisiin. [5]



Kuva 8. Keskiarvojen lukumäärän vaikutus signaalin komponentteihin. [5]

4.3 Nykyinen hihnan kunnonvalvonta

Nykyisin hihnan kunnonvalvonta on toteutettu kalanterin kaavariin asennettujen värähtelyanturien avulla. Kaksi kiihtyvyyteen perustuvaa värähtelyanturia on asennettu kaavaripalkin molempiin päihin, josta ne mittaavat kaavarin mahdollisia liikkeitä. Normaali tilassa kaavari pysyy hyvin staattisena putsaten ja myötäillen hihnan pintaa. Kaavari on asennettu kohtaan, jossa hihna kaareutuu ja myötäilee hihnan ohjaustelaa. Asennuskohta on havainnollistettu kuvassa 9.

On havaittu, että särön kasvaessa hihnassa tietyn kynnyksrajan yli, särö aiheuttaa kaavarissa tärähdyksen. Tärähdyksen aiheuttaa telan kaarevalla pinnalla ”auenneen” särön kohtaaminen kaavarin terän kanssa. Tähän mennessä saadut havainnot säröjen näkymisestä kaavarin mittauksissa osoittavat, että käytetty mittaustapa paljastaa yleensä särön ennen kuin se on kasvanut kriittiseksi hihnan keston kannalta. Yhtenä tavoitteena diplomityössä on selvittää, voidaanko mittausmenetelmiä kehittämällä löytää keinoja särön havaitsemiseen vielä aikaisemmassa vaiheessa, jotta särön korjaamiseen tarvittavaa valmistautumisaikaa voitaisiin pidentää nykyisestä. Pienen särön korjaaminen hihnan paikallaan ollessa on myös helpompaa kuin suuren särön korjaaminen.

Nykyiseen hihnan kunnonvalvontaan kuuluu myös hihnan kierrostaajuuden määrittäminen, jotta tahdistettu aikakeskiarvoistus oli mahdollista. Kierrostaajuus saadaan selville kun tiedetään kullakin ajan hetkellä oleva ratanopeus, sekä teräshihnan pituus. Näistä saadaan kaavaa 4.3 käyttämällä kierrostaajuus selville.

$$f_k = \frac{1}{t_k} = \frac{v}{s_h} \quad (4.3)$$

missä

f_k	on teräshihnan kierrostaajuus
t_k	on teräshihnan yhteen kierrokseen kuluva aika
v	on ratanopeus
s_h	on teräshihnan pituus

Kaavalla laskettu taajuuden arvo on kuitenkin osoittautunut käytännössä liian epätarkaksi. Syynä tähän saattaa olla hihnan pituuden poikkeaminen laskuissa käytetystä, sillä valmistaja ilmoittaa pituuden sallituksi virheeksi +0/-30mm. Muutosta hihnan pituudessa aiheuttavat myös hihnaan kohdistuva lämpölaajeneminen. Hihnan pituus saadaan laskettua aineen lineaarisen lämpölaajenemiskertoimen avulla kaavalla,

$$L_t = L_0 + \alpha L_0 \Delta t \quad (4.4)$$

missä,

L_t	on hihnan lopullinen pituus
-------	-----------------------------

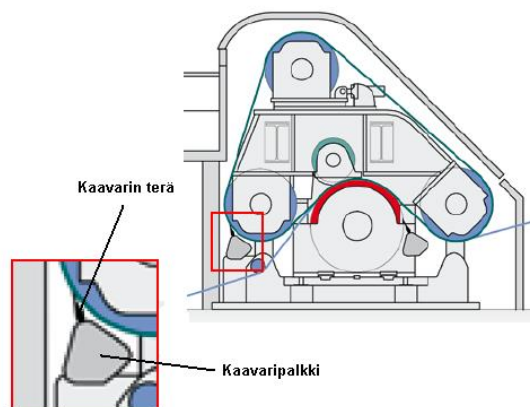
- L_0 on hihnan alkuperäinen pituus
 α on lämpölaajenemiskerroin hihnalle
 Δt on lämpötilan muutos asteina

Kaavasta nähdään, että pituuden muutos on

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta t \quad (4.5)$$

Hihnan valmistaja ilmoittaa lämpölaajenemiskertoimeksi $11,5 \cdot 10^{-6}/K$ lämpötila-alueella $20 - 200^\circ C$. Tällöin saadaan taulukon 2 osoittamat pituudet lämmitetyille hihnalle, kun hihnan pituus huoneenlämmössä ($20^\circ C$) on kappaleessa 4.3 annettu 11755 mm ([5]). Taulukosta 2 (s. 24) nähdään, että hihnan pituus voi vaihdella lämpötilan vaikutuksesta jopa 20 mm.

Kun otetaan huomioon sekä valmistustoleranssin että lämpötilan vaikutus hihnan pituuteen, nähdään että hihnan pituus saattaa heittää laskuissa käytetystä ”oikeasta” arvosta useita kymmeniä millijä. Tällöin laskemalla saadun taajuuden käyttäminen keskiarvoistamisessa ei johda toivottuun tulokseen, sillä se poikkeaa oikeasta kierrostaajuudesta liikaa.



Kuva 9. Kaavarin sijainti hihnakanterissa. [1]

Taulukko 2. Lämpölaajenemisesta johtuva hihnan pituuden muutos.

Hihnan lämpötila [°C]	Hihnan pituus [mm]	ΔL [mm]
20	11755,0	0
100	11765,8	10,8
110	11767,2	12,2
120	11768,5	13,5
130	11769,9	14,9
140	11771,2	16,2
150	11772,6	17,6
160	11773,9	18,9
170	11775,3	20,3

5. HIHNAN TAHDISTUS

Hihnan tahdistus on välttämätöntä, jotta vianvalvontasignaalin analysoinnissa voitaisiin hyödyntää keskiarvoistusta useamman mittausjakson voimin. Keskiarvoistaminen tehdään siitä syystä, jotta pienimmätkin jaksolliset muutokset vianvalvontasignaalin havaittaisiin kohinan alta. Käsittelimme tahdistetun keskiarvoistuksen (STA) teoriaa tarkemmin kappaleessa 5.2 *Tahdistettu keskiarvoistus*.

Hihnan mahdolliseen tahdistukseen on olemassa monta eri menetelmää. Tässä työssä tulemme käymään läpi kolme menetelmää, jotka mahdollisesti täyttävät vaatuksemme tahdistuksen osalta. Tutkittavat tekniikat ovat; autokorrelaatio, pyörrevirta-anturi sekä hihnaan tehdyn merkinnän lukeminen optisella anturilla. Tässä kappaleessa käymme läpi tekniikoiden taustalla olevan teorian.

Tahdistuksen mittausmenetelmiä valittaessa kiinnitettiin huomiota hihnan koskemattomuuteen. Tällä tavalla varmistuttaisiin siitä, että mittaus ei millään tavalla häiritsisi kalanterin toimintaa. Näin pidettäisiin myös huolta siitä, ettei hihna kärsisi mittauksen aikana vaurioita. Valintaa vaikutti myös menetelmän yksinkertaisuus sekä se, kuinka hyvin tekniikka oli käytettävissä valmiiden sovellusten, kuten anturien, muodossa.

5.1 Autokorrelaatio

Autokorrelaatio on digitaalinen signaalin analysointimenetelmä, joka kertoo kuinka paljon signaali eri viiveillä korreloi itsensä kanssa. Tarkemmin sanottuna, autokorrelaatio on signaalin ristikorrelaatio itsestään.

Autokorrelaatio on tehokas keino löytää toistuvia malleja signaalista. Tekniikan käyttökohteita ovat muun muassa periodisten signaalien löytäminen kohinan alta sekä signaalin perustaajuuden tunnistaminen esiintyvien harmonisten taajuuksien avulla. Autokorrelaatio on Fourier-muunnoksen ohella yksi käyttökelpoisimmista signaalien analysointimenetelmistä.

Kalanterin kaavarille asennetut värähtelyanturit lähettävät signaalia, joka perustuu kaavarin terän hihnan väliseen liikkeeseen. Autokorrelaation käyttäminen hihnan tahdistuksen selvittämiseen perustuu siihen olettamukseen, että tästä signaalista löytyisi periodisuutta, joka ilmaisisi hihnan kierrostaajuuden. Hihnan tasaisuuden voidaan olettaa aiheuttavan ongelmia, sillä se aiheuttaa sen, että suuria muutoksia mittaussignaaleissa ei ole.

5.1.1 Diskreettiaikaisten signaalien risti- ja autokorrelaatio

Ristikorrelaatiolla tarkoitetaan matemaattista operaatiota, jossa kahta äärellisen energian omaavaa signaalia $x(n)$ ja $y(n)$ verrataan toisiinsa, ja selvitetään minkä

verran ne muistuttavat toisiaan aikatasossa. Korrelaation arvo on sitä suurempi mitä paremmin signaalit vastaavat toisiaan. Kahden signaalin ristikorrelaatio määritellään kaavan 5.1 tai 5.2 mukaan, jossa r_{xy} on signaalien $x(n)$ ja $y(n)$ välinen ristikorrelaatio. [6]

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-l) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.1)$$

tai vastaavasti

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n+l)y(n) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.2)$$

missä

l on aikasiirtymä eli viive

Kaavoissa 5.1 ja 5.2 esiintyvä ristikorrelaation $r_{xy}(l)$ alaindeksi xy ilmaisee korreloinnissa käytetyt sekvenssit sekä sen mihin suuntaan toista niistä siirretään suhteessa toiseen. Kaavassa 5.1 sekvenssi $x(n)$ pysyy paikoillaan ja $y(n)$ siirtyy l :n osoittaman määrän kerrallaan oikealle positiivisilla l :n arvoilla ja vasemmalle l :n negatiivisilla arvoilla. Vastaavasti kaavassa 5.2 sekvenssi $y(n)$ pysyy paikoillaan ja $x(n)$ siirtyy l :n osoittaman määrän kerrallaan vasemmalle positiivisilla l :n arvoilla ja oikealle l :n negatiivisilla arvoilla. On sama siirretäänkö $x(n)$:ä vasemmalle $y(n)$:n suhteen, vai $y(n)$:ä oikealle $x(n)$:n suhteen. Näin ollen käyttämälle kumpaa tahansa kaavaa 5.1 tai 5.2, saadaan sama korrelaatiotulos. [6]

Jos sekvenssien paikkoja vaihdetaan kaavoissa 5.1 ja 5.2 sekä muutetaan ristikorrelaation alaindeksi muotoon yx , saadaan;

$$r_{yx}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n)x(n-l) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.3)$$

tai vastaavasti

$$r_{yx}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n+l)x(n) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.4)$$

Vertaamalla kaavoja 5.1 ja 5.3 sekä 5.2 ja 5.4 nähdään, että

$$r_{xy}(l) = r_{yx}(-l) \quad (5.5)$$

Tästä voidaan todeta, että $r_{yx}(l)$ on yksinkertaisesti $l = 0$ suhteen taitettu $r_{xy}(l)$.

Erikoistapausta, jossa $y(n) = x(n)$, ristikorrelaatiota kutsutaan $x(n)$:n autokorrelaatioksi. Autokorrelaatio määritellään seuraavasti,

$$r_{xx}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n-l) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.6)$$

tai vastaavasti

$$r_{xx}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n+l)x(n) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.7)$$

Autokorrelaatiolla siis tutkitaan kuinka hyvin signaali korreloi itsensä kanssa eri viiveen arvoilla. [6]

Kun käsitellään äärellisen pituuden omaavia sekvenssejä, voidaan risti- ja autokorrelaatio laskea äärellisen pituisina summina. Tällöin kaavat 5.1 ja 5.3 muuttuvat muotoon

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=i}^{N-|k|-1} x(n)y(n-l) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.8)$$

$$r_{xx}(l) = \sum_{n=i}^{N-|k|-1} x(n)x(n-l) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.9)$$

missä $i = l, k = 0$ kun $l \geq 0$ ja $i = 0, k = l$ kun $l < 0$.

5.1.2 Risti- ja autokorrelaation ominaisuuksia

Risti- ja autokorrelaatiolla on useita tärkeitä ominaisuuksia. Tässä esitetään tulokset, jotka on saatu viitteen [6] mukaan johtamalla. Jälleen oletetaan, että kyseessä olevat $x(n)$ ja $y(n)$ ovat äärellisen energian omaavia signaaleja.

$$r_{xx}(0) = E_x \quad (5.10)$$

$$r_{yy}(0) = E_y \quad (5.11)$$

Kaavoissa 5.10 ja 5.11 esitetään, että $r_{xx}(0)$ ja $r_{yy}(0)$ ovat niihin liittyvän signaalin energiat E_x ja E_y .

$$|r_{xy}(l)| \leq \sqrt{r_{xx}(0)r_{yy}(0)} = \sqrt{E_x E_y} \quad (5.12)$$

$$|r_{xx}(l)| \leq r_{xx}(0) = E_x \quad (5.13)$$

Korrelaatio saa maksimiarvonsa viiveen 0 kohdalla, jolloin signaali täsmää täydellisesti viivästetyn versionsa kanssa. Muilla viiveillä korrelaation tulos on yhtäsuuri tai pienempi, kuin viiveellä 0, mikä osoitetaan kaavalla 5.12. Autokorrelaation tapauksessa sama on osoitettu kaavalla 5.13.

$$\rho_{xx}(l) = \frac{r_{xx}(l)}{r_{xx}(0)} \quad (5.14)$$

$$\rho_{xy}(l) = \frac{r_{xy}(l)}{\sqrt{r_{xx}(0)r_{yy}(0)}} \quad (5.15)$$

Korrelaatioon osallistuvien signaalien skaalaus ei vaikuta korrelaatiotuloksen muotoon, vaan ainoataan amplitudeihin. Koska skaalaus ei ole merkitystä, yleinen käytäntö on, että korrelaatiotulos normalisoidaan -1 :stä 1 :seen. Näiden normalisointien määrittäminen on osoitettu kaavoissa 5.14 ja 5.15. Yksinkertaisuudessaan normalisoinnissa jokainen korrelaatiotuloksen piste jaetaan viiveellä 0 saadulla arvolla.

5.1.3 Jaksollisen sekvenssin korrelaatio

Edellisissä kappaleissa käsiteltiin risti- ja autokorrelaatio energia sekvensseille. Seuraavaksi käsitellään tehosiinaaleja ja niistä erityisesti jaksollisia signaaleja. Olkoon $x(n)$ ja $y(n)$ tehosiinaaleja. Näiden signaalien ristikorrelaatio $r_{xy}(l)$ saadaan,

$$r_{xy}(l) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^M x(n)y(n-l) \quad (5.16)$$

Erikoistapaukselle $y(n) = x(n)$, joka tarkoittaa autokorrelaatiota, saadaan

$$r_{xx}(l) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^M x(n)x(n-l) \quad (5.17)$$

Oletetaan, että sekvenssit $x(n)$ ja $y(n)$ ovat jaksollisia, ja omaavat jakson N . Tällöin kaavojen 5.16 ja 5.17 määrittelemät keskiarvot yli äärettömän pitkän aikavälin, ovat identtiset yhden jakson mittaisten keskiarvojen kanssa. Tällöin kaavat 5.16 ja 5.17 muuttuvat muotoon

$$r_{xy}(l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n-l) \quad (5.18)$$

ja

$$r_{xx}(l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n-l) \quad (5.19)$$

Tuloksesta nähdään, että $r_{xy}(l)$ ja $r_{xx}(l)$ ovat samalla tavalla jaksollisia kuin $x(n)$ ja $y(n)$. Jakson pituus on kaikilla N . [6]

Joissain tapauksissa korrelaatiota käytetään jaksollisuuden havaitsemiseen signaalista. Signaali saattaa olla hautautuneena kohinan alle niin, että sen havainnointi on vaikeaa tai jopa mahdotonta. Oletetaan, että tällainen signaali on $y(n)$.

$$y(n) = x(n) + w(n) \quad (5.20)$$

missä

$x(n)$ on jaksollinen signaali, jonka jakso on tuntematon N

$w(n)$ on satunnaista kohinaa

Oletetaan, että tutkimme M näytettä $y(n)$:ä. Tällöin oletamme myös, että $0 \leq n \leq M-1$, kun $M \gg N$. Tällöin $y(n)$:n autokorrelaatio on muotoa

$$r_{xx}(l) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} y(n)y(n-l) \quad (5.21)$$

Jos sijoitamme kaavasta 5.20 $y(n)$:n kaavaan 5.21, saadaan

$$\begin{aligned} r_{xx}(l) &= \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} [x(n) + w(n)][x(n-l) + w(n-l)] \\ &= \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} x(n)x(n-l) \\ &\quad + \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} [x(n)w(n-l) + w(n)x(n-l)] \\ &\quad + \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w(n)w(n-l) \\ &= r_{xx}(l) + r_{xw}(l) + r_{wx}(l) + r_{ww}(l) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Kaavan 5.22 oikean puolen ensimmäinen termi $r_{xx}(l)$ on $x(n)$:n autokorrelaatio. Koska $x(n)$ on jaksollinen N suhteen, on autokorrelaatiokin jaksollinen ja täten siinä esiintyy maksimeja, kun $l = 0, N, 2N$, jne. Maksimien amplitudi kuitenkin pienenee, kun viive l lähestyy M :ää. Tämä johtuu siitä, että M on äärellisen mittainen datajakso ja täten $x(n)x(n-l)$ alkaa tuottaa tulosta nolla suurilla l :n arvoilla. Tästä johtuen pitäisi välttää käyttämästä suuria viiveitä, kuten $l > M/2$.

Kaavassa 5.22 esiintyvät ristikorrelaatiot $r_{xw}(l)$ ja $r_{wx}(l)$ signaalin $x(n)$ ja kohinan $w(n)$ välillä saavat pienen arvon. Tämä siitä syystä, että $x(n)$ ja $w(n)$ voidaan olettaa olevan täysin riippumattomia toisistaan. Viimeisenä oleva termi $r_{ww}(l)$ on

kohinan autokorrelaatio. Tällä autokorrelaatiolla voidaan olettaa olevan piikki kohdassa $l = 0$. Tämän jälkeen $r_{vv}(l)$ kuitenkin laskee nopeasti kohti nollaa, johtuen kohinan $w(n)$ satunnaisesta luonteesta.

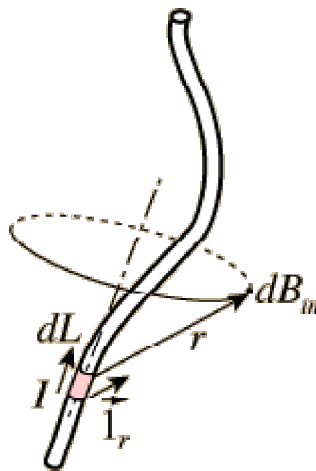
Edellisten huomioiden perusteella voidaan olettaa, että ainoastaan $r_{xx}(l)$ saa suuri amplitudisia maksimeja, kun $l > 0$. Tämä käytös mahdollistaa sen, että voimme havaita $r_{xx}(l)$:ä tutkimalla periodisen signaalin $x(n)$ sekä määrittellä sen jakson pituuden. [6]

5.2 Pyörrevirta

Pyörrevirrat ovat toimivaksi ja käyttökelpoiseksi osoitettu, ainetta rikkomaton testausmenetelmä (NDT). Menetelmällä on perustana vankka teoreettinen pohja, joka on yleisesti todistettu paikkansa pitäväksi. Pyörrevirta perustuu pyörrevirta-anturin tuottaman magneettikentän ja siihen tuodun johtavan materiaalin vuorovaikutukseen. [7]

Pyörrevirtamenetelmiä käytetään yleisesti monilla teollisuuden aloilla; tutkimuksessa, valmistuksessa ja tuotannossa, tehon kehityksessä sekä yllä- ja kunnossapitotoiminnassa. Menetelmiä käytetään erityisesti prosessinohjauksessa, laadunvalvonnassa sekä määräaikaiskunnon-tarkastuksissa. [7]

Pyörrevirta-anturin käyttö tahdistuksen määrittämiseen perustuu oletukseen, että pystymme sen avulla havaitsemaan hitsisauman aiheuttaman mikrorakenteellisen ja pinnan tasaisuuden muutoksen hihnassa. Hihnan sauman havainnoinnin avulla pystymme laskemaan hihnan kierrosajan, ja tätä kautta saamme hihnalle kierrostaajuuden.



Kuva 10. Johteessa kulkevan differentiaalisen virran synnyttämä magneettikenttä. [8]

5.2.1 Pyörrevirran sähkömagneettinen perusta

Biot-Savart-laki

Johteessa kulkeva sähkövirta aiheuttaa ympärilleen sähkömagneettisen kentän. Tämän virran ja sähkömagneettisen kentän yhteyttä toisiinsa kuvaa matemaattisesti Biot-Savart-laki, [7] [8]

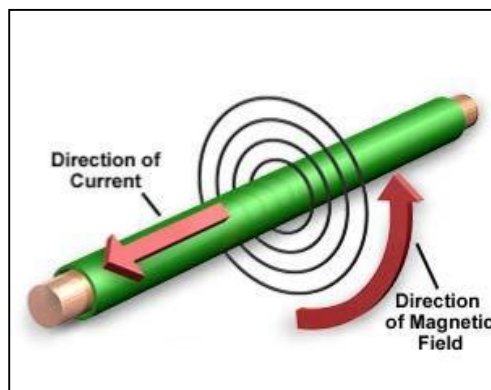
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^2} \quad (5.23)$$

missä

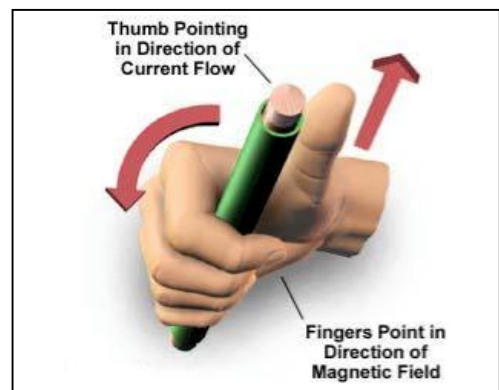
- I on johteessa kulkeva virta
- $d\vec{L}$ on differentiaalinen pituus johdetta, joka kuljettaa virtaa I
- μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
- r on virtaelementin ja kenttäpisteen etäisyys
- $\vec{r}$ on etäisyyden yksikkövektori
- $d\vec{B}$ on $I d\vec{L}$:n aiheuttama differentiaalinen magneettikenttä

Kuvassa 10 on esitetty kaavan 5.23 mukainen tilanne differentiaalisen virran aiheuttamasta magneettikentästä. Ristitulo osoittaa, että $\vec{B}$:n suunta on kohtisuorassa sekä johteessa kulkevaan virtaan, sekä etäisyyden yksikkövektoria vasten. Magneettikenttä muodostuu siis samankeskeisistä renkaista, jotka ovat kohtisuorassa virran kulkusuuntaan nähden (Kuva 11). Kentän voimakkuus on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. [7]

Magneettikentän orientaatio riippuu sähkövirran kulkusuunnasta johteessa. Syntyneen kentän suunnan määrittämiseen käytetään niin sanottua ”oikean käden”-sääntöä: oikean käden peukalon osoittaessa virran suuntaan, ojennetut sormet kääntyvät magneettikentän suuntaan (Kuva 12). [9] [10]



Kuva 11. Virran synnyttämän magneettikentän suunta.[9]



Kuva 12. Oikean käden sääntö. [9]

Magneettikentän aiheuttama induktiovirta

Kun magneettikenttään tuodaan johde, alkaa johteessa kulkea virta sillä oletuksella, että johde ei ole avoin piiri. Virran muodostumiselle johteeseen on ehtona se, että magneettikentän ja johteen välillä on liikettä toistensa suhteen. Tämä tarkoittaa sitä, että joko magneettikenttä itsessään on ajan suhteen muuttuva tai, että johde liikkuu tasaisen magneettikentän vaikutusalueella. [7] [10]

Johteeseen magneettikentän ansiosta indusoitunut virta on verrannollinen magneettivuohon Φ_B , joka läpäisee johtimen muodostaman silmukan,

$$\phi_B = \int_{\text{loop area}} \vec{B} \cdot \vec{n} dA \quad (5.24)$$

missä,

- $\vec{B}$ on silmukan läpi oleva magneettivuon tiheys
- $\vec{n}$ on silmukan normaalin suuntainen yksikkövektori
- A on johteen muodostaman silmukan ala

Faradayn induktiolain mukaan virtasilmukkaan syntyvä sähkömotorinen voima $\mathcal{E}$ riippuu silmukan läpäisevän magneettivuon muutoksesta. Jos johde on kierretty useammalle silmukalle (kela), on muodostuva sähkömotorinen voima verrannollinen kierrosten lukumäärään N . [7]

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (5.25)$$

Miinusmerkki kaavan 5.25 alussa kertoo, että sähkömotorinen voima synnyttää virran, jonka suunta on sellainen, että virran silmukalle synnyttämä magneettikenttä pyrkii vastustamaan alkuperäisen magneettikentän muutosta. Tämä toteama tunnetaan myös paremmin nimellä Lenzin laki.

Silmukan, johon virta I indusoituu, induktanssi on suoraan verrannollinen magneettikentän vuohon sekä kääntäen verrannollinen virtaan,

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (5.26)$$

Kaavan 5.26 määrittelemää induktanssia voidaan kutsua myös itseisinduktanssiksi, jos magneettikentän synnyttäjänä toimii ainoastaan virtaa kuljettava johdin. Yhdistämällä kaavat 5.25 ja 5.26 saadaan [10]

$$\mathcal{E} = -NL \frac{dI}{dt} \quad (5.27)$$

Pyörrevirta

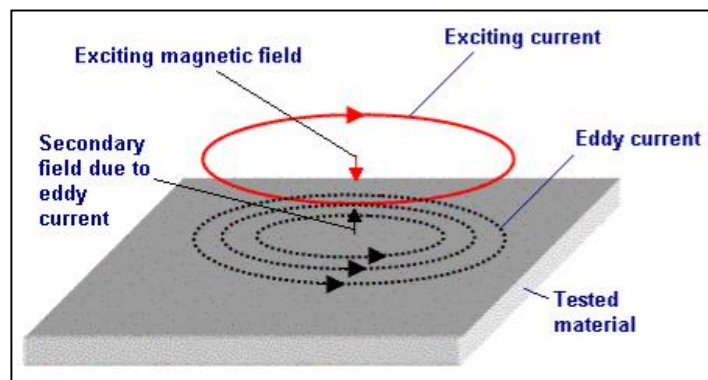
Magneettikentän indusoima virta tarvitsee syntyäkseen äärellisen impedanssin omaavan johteen. Johteeksi kelpaa johtimen ja johdinsilmukan lisäksi myös sähkövirtaa johtava pinta tai taso. Tällöin tasoon syntyneistä virtapyörteestä käytetään nimitystä pyörrevirta. Virta kulkee tällöin johteen pintaosassa ja sellaiseen suuntaan, että sen tuottama oma magneettikenttä on vastakkaisuuntainen ulkoiseen magneettikenttään nähden (Kuva 13). [7] [10]

Pyörrevirtatiheys jakaantuu johteessa pinnansuuntaisesti sekä materiaalin syvyyden suuntaisesti. Pinnansuuntaisesti pyörrevirtojen maksimi on suoraan herätemagneettikentän alapuolella, jossa magneettivuontiheys on suurimmillaan. Siirryttäessä kauemmas magneettikentän keskiakselilta pinnansuuntaisesti, pyörrevirrat heikkenevät nopeasti. [7]

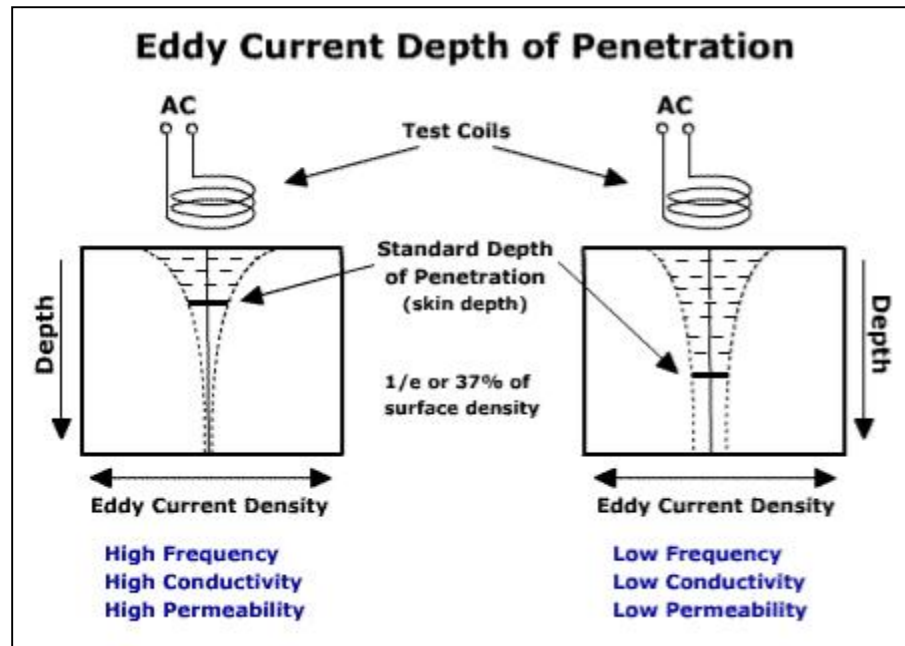
Pyörrevirtatiheyden muuttumista syvyyden suhteen voidaan selittää seuraavalla tavalla; kun herätemagneettikenttä indusoi pyörrevirran, vastustaa tämän virran aiheuttama toissijainen magneettikenttä alkuperäistä magneettikenttää. Tällöin voidaan ajatella toissijaisen kentän varjostavan ja peittävän ensisijaista kenttää tunkeutumasta syvemmälle johdemateriaaliin. Magneettivuon pienenessä, myös pyörrevirtatiheys pienenee etäisyyden kasvaessa johteen pinnasta. Tätä pyörrevirtatiheyden vaimenemista kuvaa termi tunkeutumisvyvyys (δ). Tunkeutumisvyvyys on etäisyys johteen pinnasta, jonka aikana virrantiheys vaimenee arvoon e^{-1} (36,8 %) alkuperäisestä, johteen pinnassa olevasta virrantiheydestä. Tunkeutumisvyvyys on riippuvainen johdemateriaalin ominaisuuksista; johtavuus (σ) ja magneettinen permeabiliteetti (μ). Myös ensisijaisen magneettikentän värähtelytaajuus (f) vaikuttaa tunkeutumisvyvyyteen. Tunkeutumisvyvydelle saadaan kaava,

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (5.28)$$

Kaavasta 5.28 havaitaan, että tunkeutumisvyvyys on kääntäen verrannollinen kaikkien tekijöiden neliöjuureen. Tästä syystä tunkeutumisvyvyys suurenee mitä matalampaa taajuutta magneettikentän aikaan saamiseen käytetään. Huonosti



Kuva 13. Virran indusoituminen johdepintaan. [11]



Kuva 14. Virran indusoituminen johteeseen syvyyden suhteen. [12]

johtavaan sekä matalan permeabiliteetin omaavaan johdemateriaaliin tunkeutumisyyvyys on suurempi. Tunkeutumisyyvyttä ja siihen vaikuttavia tekijöitä on esitetty kuvassa 14. [7]

Joskus materiaalille annetaan sähköisistä ominaisuuksista johtavuuden sijaan resistiivisyys ρ . Resistiivisyys on johtavuuden käänteisluku, jolloin tällä sijoituksella kaava 5.28 muuttuu muotoon

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (5.29)$$

Tutkittaessa pyörrevirtojen jakaantumista johteeseen, käytetään tunkeutumisyyvyden lisäksi efektiivistä tunkeutumisyyvyttä. Tämä syvyys on 3δ , ja ilmaisee syvyyden, jossa virrantiheys on laskenut noin 5 %. Efektiivinen tunkeutumisyyvyys ilmaisee myös sen paksuuden, joka kohteen on vähintään omattava, jotta paksuus ei vaikuttaisi mittaustuloksiin merkittävästi. Jos kohteen paksuus on vähemmän kuin 3δ , aiheuttaa se sen, että osa energiasta menee hukkaan. [7] [13]

Laskemalla tunkeutumisyyvyys sekä efektiivinen syvyys hihnakanterin hihnan tapauksessa, saadaan kuvan 15 mukaiset käyrät. Syvyydet on laskettu taajuuksivälille 200 – 10000 Hz. Hihnan materiaalin sähköiset ja magneettiset ominaisuudet on esitetty kappaleessa 4.1 *Hihna*, joita käyttämällä saadaan kaavaa 5.29 lyhennettyä muotoon

$$\delta \approx 20,5 \frac{1}{\sqrt{f}} \left[\frac{mm}{\sqrt{s}} \right] \quad (5.30)$$

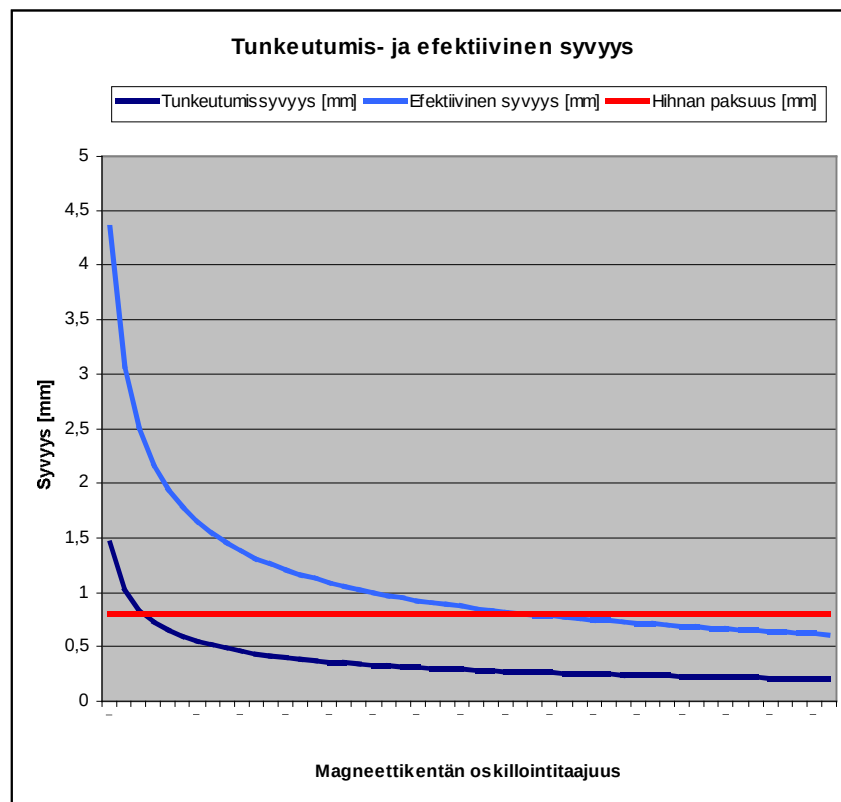
Kuvaan on merkitty hihnan paksuus 0,8 mm punaisella viivalla, joka leikkaa efektiivisen syvyyden käyrän taajuudella 5900 Hz. Tästä saadaan tieto, jonka mukaan magneettikentän taajuuden olisi oltava yli 5900 Hz, jotta mittaustulokset eivät olisi vääristyneitä.

5.2.2 Pyörrevirtatestaus

Mittausperiaate

Pyörrevirtamittaus perustuu anturissa olevan sähkömagneettisen kelan impedanssissa tapahtuviin muutoksiin, kun anturia liikutellaan johteen läheisyydessä. Impedanssin arvoon vaikuttaa pinnan läheisyyden lisäksi myös kohteen rakenne sekä materiaali.

Mittauksessa anturin kela viedään lähelle tutkittavan kohteen pintaa. Kun kelaan kytketään vaihtovirta, synnyttää se ympärilleen keskitetyn, ajassa muuttuvan magneettikentän. Tämän primaarimagneettikentän vaikutuksesta johdepintaan indusoituu pyörrevirta, joka puolestaan synnyttää sekundäärisen magneettikentän. Pyörrevirran tuottama magneettikenttä on suunnaltaan sellainen, että se vastustaa alkuperäistä herätemagneettikenttää. Mittaamalla kelan resistanssin ja induktiivisen reaktanssin muutoksen suhteessa vapaaseen tilaan, saadaan tietoa tutkittavasta pinnasta.



Kuva 15. Tunkeutumissyvyys sekä efektiivinen syvyys laskettuna hihnakalanterin hihnalle.



Kuva 16. Pyörrevirta-anturipiiri koostuu resistanssista R ja induktiivisesta reaktanssista X_L . [12]

Pyörrevirta-anturin impedanssi Z kertoo kuinka paljon piiri kokonaisuudessaan vastustaa vaihtovirtaa. Impedanssi koostuu normaalista resistanssista R ja induktiivisesta reaktanssista X_L (Kuva 16). Impedanssi ei ole yksinkertaisesti näiden tekijöiden summa, sillä resistanssilla ja reaktanssilla on olemassa vaihe-ero. Tästä syystä niiden maksimit esiintyvät eri aikoina, ja käyttöön on otettava vektorisuureet. [9]

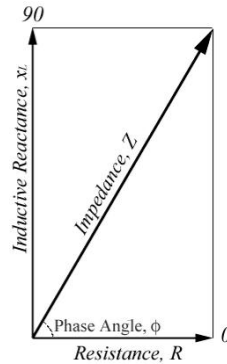
Pyörrevirta-anturipiirin kokonaisimpedanssi saadaan laskettua kaavalla,

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}. \quad (5.31)$$

Kaavan 5.31 antama tulos voidaan esittää myös graafisesti impedanssisitasossa, kuvan 17 tapaan. Kuvaajasta saadaan myös piirin vaihekulma selville, joka voidaan laskea kaavalla,

$$\tan \phi = \frac{X_L}{R}. \quad (5.32)$$

Impedanssitaso on hyödyllinen väline pyörrevirtatiedon esittämiseen. Pyörrevirtojen voimakkuus sekä kohdemateriaalin magneettinen permeabiliteetti aiheuttavat muutoksen pyörrevirtasignaalin impedanssisitasossa. Näitä muutoksia esittää kuva 18. Jos anturi viedään lähelle ei-magneettista, mutta johtavaa materiaalia (mm. Alumiini), aiheuttaa tämä resistanssikomponentin kasvun sekä induktiivisen reaktanssin laskun. Resistanssin kasvu johtuu siitä, että johteessa syntyvät pyörrevirratt kuluttavat kelan energiaa. Reaktanssin väheneminen taas johtuu siitä, että pyörrevirtojen aiheuttama magneettikenttä vastustaa alkuperäistä kenttää, ja täten kokonaisinduktanssin määräävä nettomagneettikenttä on pienempi. [12]

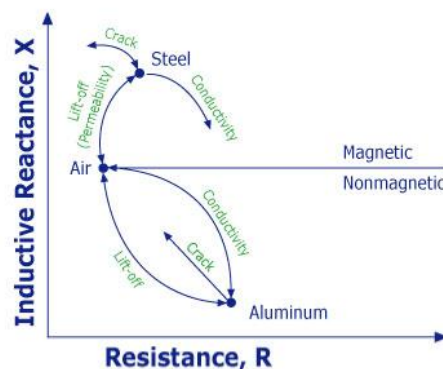


Kuva 17. Impedanssitaso [12]

Magneettisen johtavan materiaalin (mm. teräs) ollessa kysymyksessä, resistanssi kasvaa kuten edellä mainittiin ei-magneettisten materiaalien kohdalla. Induktiivinen reaktanssi sen sijaan kasvaa eikä vähene. Syynä tähän on magneettisen materiaalin kyky keskittää alkuperäistä magneettikenttää. Tästä johtuva magneettikentän voimistuminen on huomattavasti suurempaa, kuin pyörrevirtojen aiheuttama magneettikentän heikkeneminen. Tällöin netto kentänvoimakkuus on suurempi, ja sitä kautta myös pyörrevirta-anturipiirin kokonaisinduktanssi kasvaa. [12]

Kuten edellä on kuvattu, pyörrevirtojen voimakkuus vaikuttaa anturin kokonaisimpedanssiin. Sen lisäksi, että materiaalin sähköiset ominaisuudet vaikuttavat näiden virtojen suuruuteen, myös kohteen muut virran kulkuun vaikuttavat asiat aiheuttavat muutoksia virtaan. Ominaisuudet, kuten materiaalin epäjatkuvuuskohdat, vaikuttavat virtojen kulkuun, ja tätä kautta anturin mittaamaan kokonaisimpedanssiin. Tästä syystä voidaan olettaa, että kappaleessa 4.3 *Hihna* esitetty hitsisauman kaltainen mikrorakenteellinen muutos aiheuttaa pyörrevirtojen kulussa muutosta. Virtojen ”normaalin” etenemisen estyminen vaikuttaa pyörrevirtojen voimakkuuteen sekä syntyvien pyörteiden muotoon. [14]

Eddy Current Impedance Plane Responses



Kuva 18. Impedanssin käyttäytyminen teräksen ja alumiinin tapauksessa. [12]

Käyttökohteet

Pyörrevirtatekniikalla pystytään selvittämään testikohteen materiaalisia ominaisuuksia sekä tunnistamaan ja paikantamaan mahdolliset virheet ja epäjatkuvuuskohtat. Helpon käytettävyyden, nopeuden ja halvan hinnan johdosta tekniikkaa käytetään monissa erilaisissa tehtävissä. [7]

Pyörrevirta-antureita käytetään yleisesti muun muassa [7]:

1. Metallilevyjen, putkiseinien ja koneistusosien paksuuden mittaaminen koskettamattomasti
2. Päällysteen paksuuden mittaaminen päämateriaalin päältä, jos materiaalit omaavat huomattavasti erilaiset sähköiset tai magneettiset ominaisuudet
3. Materiaalien tunnistamiseen ja erotteluun koostumuksen ja rakenteen mukaan, jos nämä vaikuttavat sähköisiin ja magneettisiin ominaisuuksiin
4. Materiaalin epäjatkuvuuskohtien, kuten halkeaman, sauman, reiän tai kerrostuneisuuden havaitseminen
5. Lämpökäsittelyolosuhteiden identifiointi ja kontrollointi sekä palovahinkojen vaikutuksen arviointi metallirakenteeseen
6. Pintakarkaisun syvyyden määrittäminen
7. Piilevien metalliesineiden, kuten maahan kaivettujen putkien, miinojen ja malmiesiintymien paikallistaminen
8. Peitettyjen koneen osien toiminnan ajanotto tai paikannus
9. Symmetristen koneistettujen ja kiillotettujen metalliosien, kuten laakerien ja laakerikehien dimensioiden mittaaminen

Hyödyt ja haitat

Pyörrevirralla suoritettavalla tarkastusmenetelmällä on monta suotuisaa etua, jotka tekevät siitä varteenotettavan vaihtoehdon moniin tarkastustehtäviin. Suurin näistä eduista on se, että mittausanturi ei tarvitse mekaanista kontaktia kohteen kanssa. Tämä ominaisuus mahdollistaa automatisoidun, suurnopeuksisen ja reaaliaikaisen mittauksen. Taajuutta säätämällä pystytään vaikuttamaan tunkeutumissyvyyteen ja sitä kautta mittaussyvyyteen. Menetelmä on erittäin herkkä epäjatkuvuuksille, sijaitsivat ne sitten kohteen pinnassa tai lähellä pintaa. Pyörrevirta-anturit ovat useasti suhteellisen halpoja useimpiin sovelluksiin, sekä tarpeeksi kevyitä mukana kuljetettaviksi. [7] [10]

Monien etujen vastapainoksi, pyörrevirtamenetelmällä on joitakin varjopuolia. Suurin näistä rajoittavista tekijöistä on se, että kohdemateriaalin täytyy olla sähköä johtavaa ainetta. Lisäksi se, että kohteen moni sähköinen ja magneettinen ominaisuus vaikuttaa anturin vasteeseen, saattaa vaikeuttaa vasteen oikeaa tulkintaa. Taulukkoon 3 on kerätty pyörrevirtatestauksen hyödyt sekä haitat.[7] [10]

Taulukko 3. Pyörrevirtatestauksen hyödyt ja haitat. [7] [10]

Hyödyt	Haitat
Kohteeksi kelpaavat kaikki johteet	Kohteen täytyy olla johtavaa materiaalia
Ei tarvitse fyysistä kontaktia anturin ja kohteen välille	Ainostaan kohteen pinnassa sekä lähellä pintaa olevien epäjatkuvuuskohtien havaitseminen
Nopea mittaustapahtuma	Monelle parametrille herkkyys aiheuttaa tuloksien tulkinnan monimutkaistumista
Herkkä suurelle määrälle ominaisuuksia, jotka liittyvät kohteen sähkönjohtokykyyn, magneettiseen permeabiliteettiin ja geometriaan	Herkkä anturin ja kohteen välisen etäisyyden muutokselle
Anturien laaja toimintalämpötila-alue	Herkkä ainoastaan säröille, jotka ovat kohtisuorassa tutkintapintaa vastaan
Pieni, kevyt ja siirrettävä anturi	
Anturin suhteellisen edullinen hinta	
Kypsä ja toimivaksi yleisesti todettu teknologia	

Anturin ominaisuudet

Pyörrevirta-anturi käsittää yleensä neljä komponenttia; ferriittisydämellä varustetun kelan, oskillointipiirin, analysointipiirin sekä lähtöpiirin (Kuva 19). Kun anturiin kytketään jännite, alkaa kelassa kulkea oskilloiva virta. Virta aiheuttaa sähkömagneettisen kentän anturin aktiiviseen päähän. Kelan sisällä olevan ferriittisydämen tehtävä on suunnata ja muokata kenttää. Johtavan materiaalin tullessa kenttään, syntyy siihen pyörrevirtoja tässä kappaleessa esitetyllä tavalla. Pyörrevirrat aiheuttavat energiahäviötä oskillointipiirissä, joka aiheuttaa oskilloinnin pienenemistä. Analysointipiirissä oleva resonanssiipiiri huomaa tämän muutoksen. Tämän muutoksen analysointipiiri muuttaa ulostulojännitteeksi, joka syötetään ulostulopiiristä. Analysointipiirin tulos riippuu kohteen lisäksi anturin toimintatavasta (analoginen / liipaisu). [15]

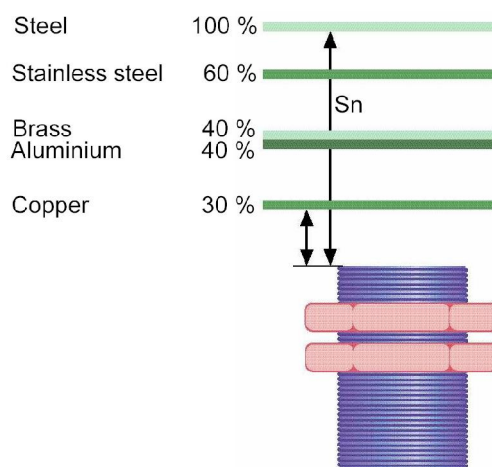
Anturien herkkyys ilmaistaan yksikössä V/mm. Tämä johtuu siitä, että antureita käytetään yleensä määrittämään kohteen etäisyyttä anturista, ja tällöin herkkyydellä ilmaistaan jännitteen muutos, jonka 1 mm muutos etäisyydessä aiheuttaa. Mitä suurempi jännitteen muutos on, sitä suurempi on herkkyys.



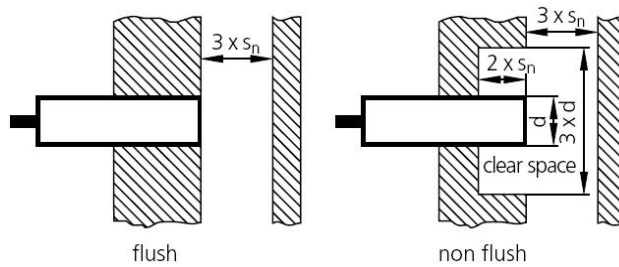
Kuva 19. Pyörrevirta-anturin komponentit. [15]

Anturien asennuksessa on otettava huomioon seuraavat asiat; asennusetäisyys kohteeseen, asennusympäristö sekä uppoasennuksen mahdollisuus. Anturin toimintaetäisyys ilmoitetaan yleensä teknisissä tiedoissa. Se voi vaihdella anturista riippuen muutamasta millimetrin kymmenesosasta aina useisiin kymmeniin millimetreihin. Annettu etäisyyden arvo on mitattu käyttämällä kohdetta, jonka materiaali on pehmeä terästä ja jonka paksuus on 1 mm. Jos mittauksissa käytettävä kohde on materiaaliltaan muuta, kuin pehmeä terästä, lyhenee käytettävä toimintaetäisyys. Kuvassa 20 on esitetty etäisyyden muutos ruostumattoman teräksen, messingin, alumiinin ja kuparin tapauksessa. [16]

Asennettaessa pyörrevirta-anturia on otettava huomioon, että liian lähellä anturia sijaitsevat metallirakenteet vaikuttavat mittaustulokseen. Tästä syystä antureille on annettu tarkat etäisyydet, joiden sisällä ei saa olla muita metallisia esineitä kuin itse kohde. Nämä varmuusetäisyydet ovat verrannollisia joko anturin toimintaetäisyyteen tai anturin halkaisijaan. Etäisyydet ilmoitetaan usein näiden mittojen moninkertoina (Kuva 21). Etäisyyksiin ja asennukseen vaikuttaa myös se onko anturi mahdollista asentaa uppoasennuksena. Tällöin anturin asennusta ei rajoita kuin suoraan edessä sijaitsevat metallikohteet sekä muiden anturien läsnäolo. [15]



Kuva 20. Kohdemateriaalin vaikutus toimintaetäisyyteen. [16]



Kuva 21. Anturin asennuksessa huomioonotettavat etäisyydet sekä uppoasennuksen (flush) että ei-uppoasennuksen (non flush) tapauksessa. [15]

Pyörrevirta-anturia asennettaessa ei-uppoasennuksena, määritellään varmuusetäisyydeksi anturin molemmille sivuille anturin halkaisijan verran etäisyyttä. Tästä voidaan olettaa, että pyörrevirtojen vaikutus kantaa tämän matkan verran anturin sivuille, ja että kohde joka tämän etäisyyden päässä sijaitsee, pystytään havaitsemaan.

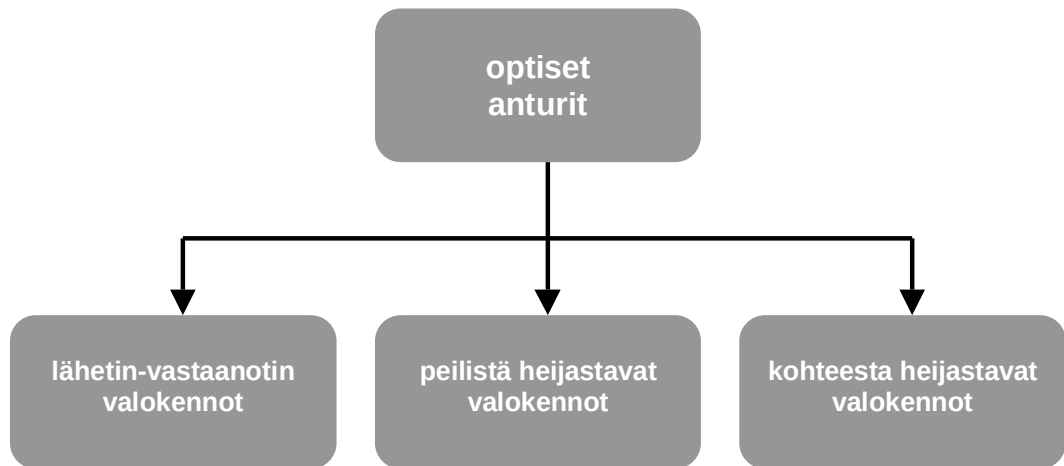
5.3 Hihnan merkkkaus mittauspisteellä

Hihnan merkkauksella tarkoitetaan toimenpidettä, jossa hihna pyritään merkkaamaan mittauspisteellä ja jota sitten luetaan hihnan pyöriessä optisella anturilla. Optisen anturin ulos antamasta liipaisupulssista saadaan hihnan tahdistus.

Järjestelmän toteutuksessa on kaksi osiota. Ensimmäinen on hihnan merkkauksen tekeminen niin, että se kestää vaativia olosuhteita hihnassa ja että se on luettavissa optisella anturilla. Toinen osa on optisen anturin valinta siten, että se pystyy havaitsemaan mittauspisteen vaadittavalla tarkkuudella hihnan pyöriessä.

5.3.1 Mittauspisteen lukeminen optisella anturilla

Optisia antureita käytetään koskemattomaan esineiden tunnistukseen, laskemiseen sekä asemointiin. Toiminta perustuu yksinkertaisesti valon lähettämiseen sekä sen



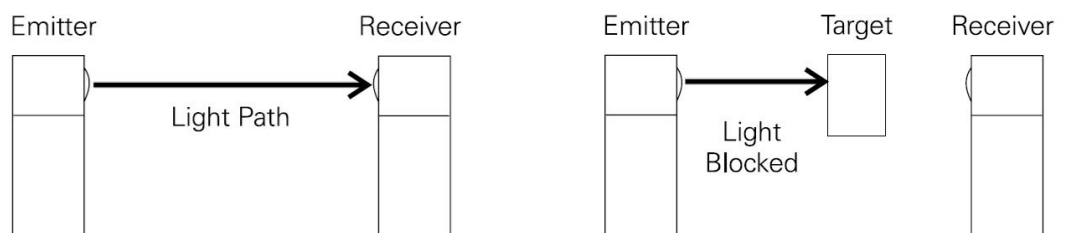
Kuva 22. Optisten anturien jaottelu. [17]

vastaanottamiseen. Optisessa anturissa olevalla valokennolla lähetetään valokeila, jota kohteena oleva esine häiritsee tai heijastaa. Tämän jälkeen, optisen anturin toimintaperiaatteesta riippuen, tuota häirittyä tai heijastunutta valoa arvioidaan. Tästä toimintaperiaatteesta johtuen, optinen anturi ei ole riippuvainen kohde-esineen materiaalista (puu, metalli, muovi, jne.). Jopa läpinäkyvien esineiden tunnistaminen on mahdollista siihen tarkoitukseen suunnitelluilla laitteilla. Pelkän tunnistamisen lisäksi myös kohteen väri sekä kontrasti ovat havainnoitavissa. [17]

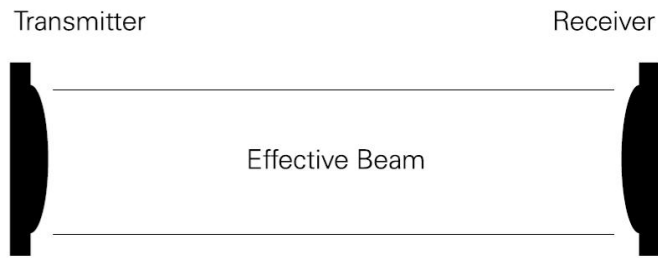
Optiset anturit jaetaan kolmeen ryhmään niiden toimintaperiaatteen mukaan. Tämä jako on esitetty kuvassa 22. Valittava tekniikka riippuu kohteesta ja sen ominaisuuksista. Jotkin kohteet ovat himmeitä, kun taas toiset ovat voimakkaasti heijastavia. Myös havainnointietäisyys on huomioitava ominaisuus tekniikkaa valittaessa. Toiset anturit toimivat paremmin pitkillä etäisyyksillä, kun taas toiset vaativat lyhyemmän etäisyyden kohteeseen. [17] [18]

Lähetin-vastaanotin valokennot

Järjestelmä koostuu nimensä mukaisesti kahdesta erillisestä komponentista; lähettimestä sekä vastaanottimesta, jotka ovat asennettu vastakkain toisiinsa nähden. Lähetin lähettää jatkuvaa valonsädettä, jonka vastaanotin havaitsee. Kun esine (kohde) asetetaan valonsäteen tielle niin, että se estää valon pääsyn vastaanottimelle,



Kuva 23. Lähetin-vastaanotin valokennon toiminta. [18]



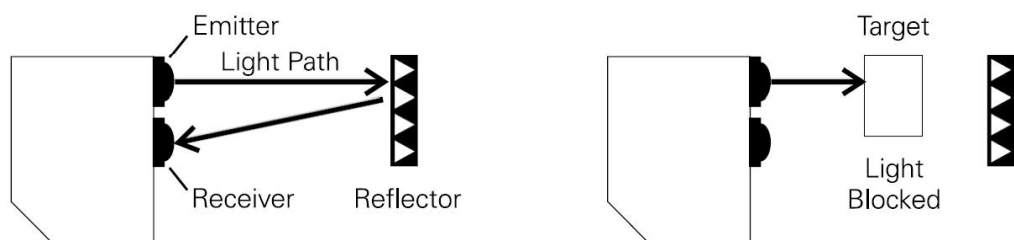
Kuva 24. Lähetin-vastaanotin valokennon efektiivinen valokeila. [18]

vaihtaa vastaanottimen ulostulo tilaa. Kun esine ei enää estä valon pääsyä vastaanottimelle, palaa ulostulo normaalitilaansa. Toiminta on esitetty kuvassa 23. [18]

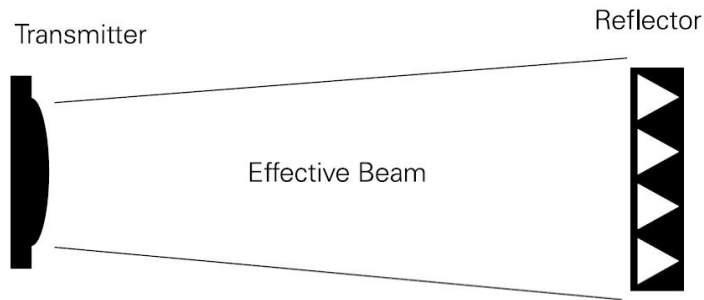
Vaikkakin lähetin-vastaanotin-järjestelmä on kaikista vaihtoehtoista luotettavin toiminnaltaan, se on silti vähiten suosittu ratkaisu. Järjestelmää varten täytyy hankkia, kaapeloida sekä asentaa kaksi erillistä osaa (lähetin ja vastaanotin), jonka takia asennustyöt vaikeutuvat sekä järjestelmän hinta nousee. Asennusta saattaa hankaloittaa myös osien vaatima tarkka asemointi toisiinsa nähden. Etuina ratkaisulla on pitkä toimintaikäisyys (useita kymmeniä metrejä) sekä se, että tunnistukseen ei vaikuta kohteen pinnan rakenne, väri eikä heijastuskyky. Anturin efektiivinen valokeila on lähettimen ja vastaanottimen linssin halkaisijan kokoinen. Jotta kohde havaittaisiin, on sen oltava kooltaan vähintään linssien halkaisijan suuruinen.[18] [19]

Peilistä heijastavat valokennot

Peilistä heijastavassa järjestelmässä lähetin ja vastaanotin ovat edellisestä poiketen samassa kotelossa. Valonsäde lähetetään lähetimestä kohti heijastinta, joka on asennettu anturia vastapäätä. Valonsäde heijastuu takaisin anturille, jossa vastaanotin lukee sen. Jos kohde katkaisee säteen, vaihtaa anturin ulostulo tilaansa. Ulostulo palautuu normaalitilaansa, kun kohde väistyy ja täten valonsäde pääsee vastaanottimelle. Anturin toiminta on esitetty kuvassa 25. [18]



Kuva 25. Peilistä heijastavan valokennon toimintaperiaate. [18]



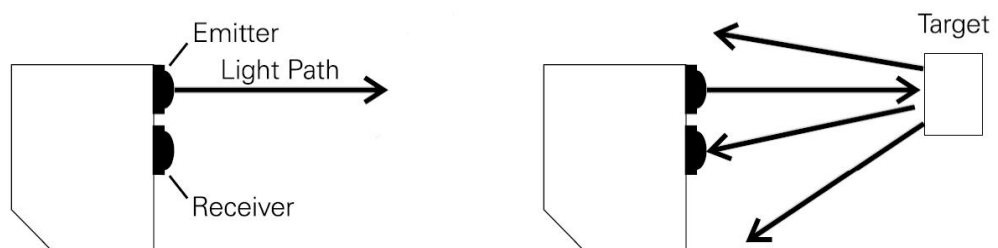
Kuva 26. Peilistä heijastavan valokennon efektiivinen valokeila. [18]

Vaikka toimintatapa onkin samankaltainen edellisen järjestelmän kanssa, peilistä heijastavalla valokennolla ei päästä vastaaviin toimintaetäisyyksiin. Toimintaetäisyyden lisäksi myös vaatimukset kohteen pinnalle ovat tiukemmat. Pinnan rakenne sekä väri eivät vaikuta tunnistamiseen, mutta tunnistettavan kohteen pinnan heijastuvuus vaikuttaa havaitsemiseen. Jos kohde on voimakkaasti valoa heijastavaa, saattaa se aiheuttaa sen, että järjestelmä ei huomaa säteen katkeamista. Etuna valokennolla on yhden kotelon käyttö. Kotelo sisältää sekä lähettimen, että vastaanottimen, joten ainoastaan yksi asema tarvitsee asentaa ja kaapeloida. Tämä saattaa tuottaa suuria säästöjä sekä ajassa että osissa.

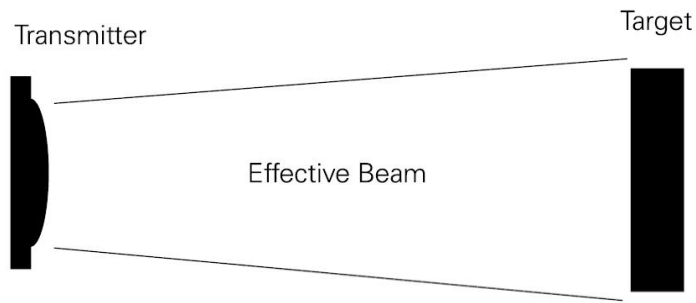
Anturin efektiivinen valokeila on kartiomainen, joka alkaa linssistä ja loppuu heijastimeen. Kohteen on oltava suurempi tai yhtäsuuri kuin heijastin, jotta se havaittaisiin luotettavasti. [17] [18] [19]

Kohteesta heijastavat valokennot

Kohteesta heijastavassa valokennossa lähetin ja vastaanotin ovat peilistä heijastavan valokennon tapaan samassa kotelossa. Järjestelmään ei kuitenkaan kuulu heijastajaa, vaan lähetetty valonsäde heijastuu havaittavasta kohteesta itsestään. Kun kohde saapuu havainnointialueelle, aiheuttaa se valon hajoamisen kaikkiin suuntiin. Osa tuosta heijastuneesta valosta saapuu takaisin anturin vastaanottimelle. Jos valon intensiteetti ylittää asetetun arvon, muuttuu anturin ulostulon tila. Kun hajavaloa ei enää saavu vastaanottimelle, muuttuu ulostulo normaalitilaansa. Valokeilan efektiivinen koko on kohteen koko, kun kohde on valokeilan kuviossa. [17] [18] [19]



Kuva 27. Kohteesta heijastavan valokennon toimintaperiaate. [18]



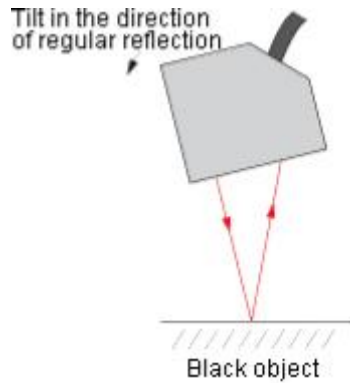
Kuva 28. Kohteesta heijastavan valokennon efektiivinen valokeila. [18]

Anturi on helppo asentaa sillä se käsittää ainoastaan yhden anturikotelon sekä sen vaatiman kaapeloinnin. Ylimääräistä heijastinta ei tarvitse asentaa. Koska kohde itsessään toimii heijastimena, on havaintoetäisyys huomattavasti lyhyempi kuin muissa optisissa antureissa. Havainnointietäisyys on joitain kymmeniä senttejä. [19]

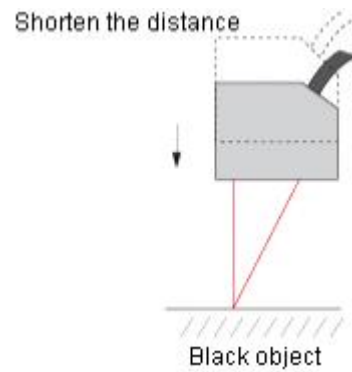
Anturin toiminta riippuu voimakkaasti kohteena toimivan esineen materiaalista sekä pinnan ominaisuuksista. Heijastamaton kohde, kuten mattamusta paperi, omaa huomattavasti lyhyemmän havainnointietäisyyden, kuin kiiltävä valkoinen paperi. Anturien toimintaetäisyys ilmoitetaan usein valkoisen mattapintaisen paperin suhteen, joten muita materiaaleja ja pintoja varten toimintaetäisyyttä on muutettava. [17] [19] Alla on lueteltu korjauskertoimia käytettävälle etäisyydelle joillekin materiaaleille. [18]

Matta valkoinen	1,00
Valkoinen paperi	0,80
Harmaa PVC	0,57
Painettu sanomalehti	0,60
Kevyesti värjätty puu	0,73
Korkki	0,65
Valkoinen muovi	0,70
Musta muovi	0,22
Neopreeni, musta	0,20
Autonrengas	0,15
Alumiini, käsittelemätön	2,00
Alumiini, musta, eloksoitu	1,50
Alumiini, matta	1,20
Ruostumaton teräs, kiillotettu	2,30

Havainnoitavan kohteen ollessa huonosti heijastavaa, kuten musta kohde, on anturille saapuva hajavallo vähäistä. Tällöin anturin asennusta on muutettava, jotta valon intensiteettiä saataisiin nostettua. Kuvassa 29 anturia kallistetaan niin, että mahdollinen peilimäinen heijastuminen vastaanottimelle olisi mahdollisimman suuri. Kuvassa 30 taas anturi on tuotu lähemmäs kohdetta, jotta valon määrä kasvaisi. Tällöin myös takaisin heijastuvan valon intensiteetti kasvaa.



Kuva 29. Anturin kallistus takaisin heijastuvan valon intensiteetin kasvattamiseksi. [20]



Kuva 30. Anturin ja kohteen etäisyyden lyhentäminen takaisin heijastuvan valon intensiteetin kasvattamiseksi. [20]

Toimintatavat

Kaikilla optisilla anturilla on kaksi toimintatapaa; ”Dark-On” (DO) ja ”Light-On” (LO). Toimintatapa ilmaisee ulostulon tilan, kun valosäde osuu vastaanottimeen. DO on tila, jossa vastaanottimen kuormaan johdetaan virta, kun valonsäteen kulku lähettimeltä vastaanottimelle on estetty. LO tilassa taas vastaanottimen kuormaan johdetaan virta, kun valosäde pääsee lähettimeltä vastaanottimelle. Toimintatavat DO ja LO on esitetty kuvissa 31 ja 32. Toimintatapa on otettava huomioon anturia valitessa, jotta sen lähettämä ulostulo olisi haluttu. Anturin toimintatapa saattaa olla myös säädettävissä, jolloin voidaan valita, kummassa tilassa anturilla tapahtuu liipaisu. [18]

Toimintatapojen vertailu

Edellä mainitut toimintatavat vaativat toimiakseen hyvin erilaiset mittauspisteet. Hihna ja sen ominaisuudet asettavat kuitenkin tietyt rajoitteet sille, millaisia mittauspisteitä hihnaan voidaan tehdä. Ensisijaisesti on ajateltava, ettei merkinnästä saa aiheutua haittaa hihnan toiminnalle.

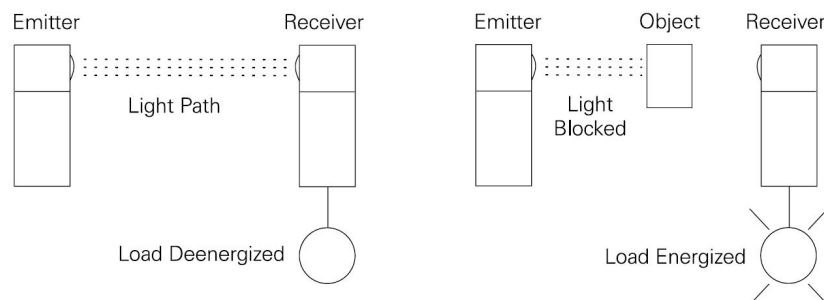
Jotta voitaisiin käyttää lähetin-vastaanotin valokennoa, tarvitsee hihnaan tehdä reikä tai lovi. Tällöin vastaanotin havaitsisi lähettimen valokeilan aina, kun reikä tai reunaan tehty lovi osuisi sen kohdalle. Tällainen hihnan muokkaaminen ei kuitenkaan ole suotavaa, sillä reikä tai lovi saattaisi toimia hiushalkeaman syntymiskohtana.

Peilistä heijastava valokenno tarvitsisi toimiakseen valoa heijastavan peilipinnan. Tämän peilin asentaminen hihnaan on tietysti mahdotonta, mutta hihna pinta itsessään on tasainen ja valoa heijastava. Tästä syystä voidaan olettaa, että peilistä heijastavaa valokennoa paremmin tilanteessa toimii kohteesta heijastava valokenno. Kohteesta heijastava valokenno tarvitsee ainoastaan mittauspisteen, joka eroaa

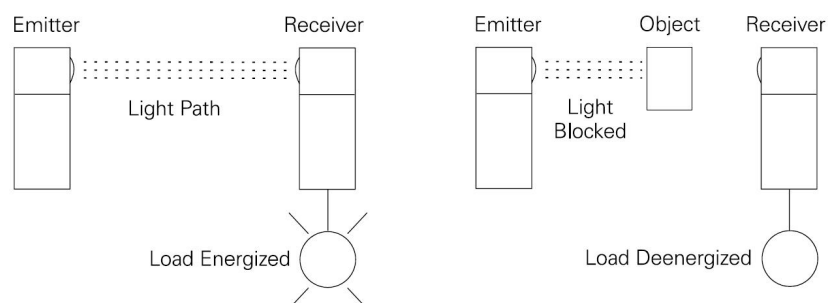
heijastavilta ominaisuuksilta hihnan pinnasta. Tällainen piste olisi esimerkiksi mattamusta alue hihnan pinnassa.

Taulukko 4. Toimintatavan ja kuorman tilan yhteys toisiinsa lähtetin-vastaanotin valokennolle (L-V), pelistä heijastaville sekä kohteesta heijastaville valokennoille. [18]

Toimintatila	Säteen reitti	Kuorman tila	
		L-V ja peilistä heijastavat	Kohteesta heijastavat
Light-On	Vapaa	Kytetty	Kytkemätön
	Suljettu	Kytkemätön	Kytetty
Dark-On	Vapaa	Kytkemätön	Kytetty
	Suljettu	Kytetty	Kytkemätön



Kuva 31. "Dark-On" toimintatavassa kuorma on kytetty, kun valosäteen kulku on estynyt. [18]



Kuva 32. "Light-On" toimintatavassa kuorma on kytetty, kun valosäteen kulku on esteetön. [18]

6. HIHNAN KUNNONVALVONTA

Hihnan kunnonvalvonnalla pyritään havaitsemaan teräshihnaan syntyneet hiushalkeamat sekä iskemät.

Tässä työssä etsitään menetelmää, jolla saadaan havaittua hihnassa olevat virheet luotettavasti. Tekniikoita voidaan olettaa olevan useita, mutta tässä työssä keskitymme kahteen eri vaihtoehtoon. Tutkittavat menetelmät ovat mikrofonilla tehtävä akustinen mittaus sekä pyörrevirta-anturilla tehtävä mittaus. Tässä kappaleessa esitetään teoria, joihin nämä mittaukset perustuvat.

Työssä tutkittavia tekniikoita valittaessa kiinnitettiin huomiota siihen, että mittausmenetelmä olisi sellainen, että se ei vaatisi kosketusta hihnaan. Tällöin voidaan varmistua, ettei mittaus itsessään aiheuta ongelmia hihnan kuntoon. Lisäksi menetelmältä vaadittiin yksinkertaista toteutusta, alhaisia kustannuksia sekä mahdollisimman vähän tarvittavia lisälaitteita.

6.1 Mikrofoni

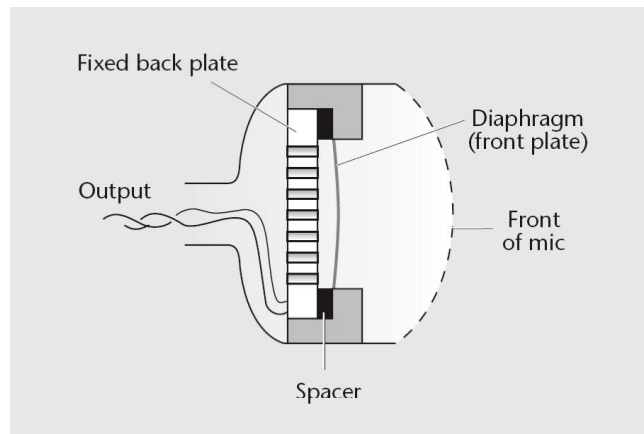
Mikrofoneilla toteutettu hihnan kunnonvalvonta perustuu ajatukseen, jossa pystytään havaitsemaan vian aiheuttama ääni sen osuessa kaavariin. Kappaleessa 4.3 *Nykyinen hihnan kunnonvalvonta* mainittiin kaavarin ja särön osumisesta toisiinsa särön ”auetessa” hihnan kaareutuessa. Tämän kontaktin tiedetään tuottavan ääntä, ja tarkoitus onkin mikrofoneja hyväksikäyttäen havaita tämä äänen transientti.

Mikrofoni on yksinkertaisuudessaan mittasuureen muuntaja, joka muuttaa akustisen energian sähköiseksi energiaksi. Akustinen energia on anturiin tuleva ääni (paine ja/tai hiukkassnopeus), joka on muunnokseen jälkeen sähköisenä signaalina, yleensä jännitteinä. [21]

6.1.1 Kondensaattori- ja elektreettimikrofoni

Kondensaattorimikrofonien mekaaninen toteutus on hyvin yksinkertainen. Mikrofoni käsittää nimensä mukaisesti kondensaattorin, jonka muodostaa jäykkä takaelektrodi sekä sen lähelle pingotettu ohut kalvo. Takaelektrodi pysyy koko ajan paikoillaan, kun taas kalvo liikkuu äänenpaineen vaikutuksesta. [21]

Perinteisissä kondensaattorimikrofoneissa takaelektrodin ja metallisen kalvon välille tuodaan esijännite suuren vastuksen kautta. Kun äänenpaine liikuttaa ohutta kalvoa, se saa aikaan kapasitanssin muutoksen elektrodien välille. Tämä muutos aiheuttaa lähtöjännitteen, joka vastaa kalvoon vaikuttavaa äänenpainetta. Kuvassa 34 on esitetty ulkoisesti polarisoidun kondensaattorimikrofonin toimintaperiaate. [21]



Kuva 33. Kondensaattorimikrofonin rakenne. [22]

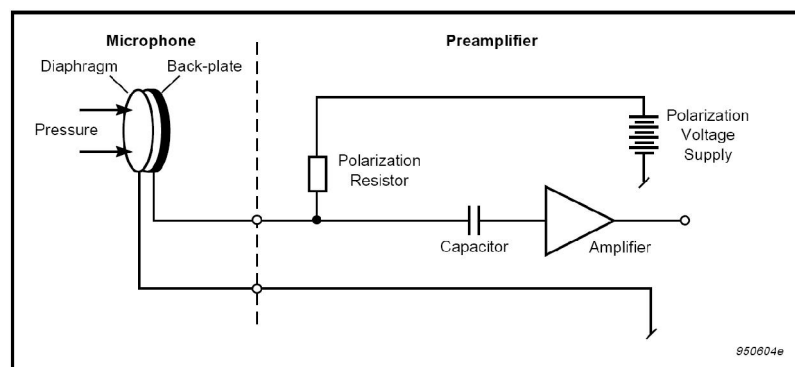
Kondensaattorilevyjen välinen kapasitanssi sekä varaus saadaan laskettua seuraavilla kaavoilla; [23]

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (6.1)$$

$$Q = EC \quad (6.2)$$

missä

- C on kondensaattorilevyjen välinen kapasitanssi
- ε on ilman dielektrisyysvakio $\approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
- A on kondensaattorilevyn pinta-ala
- d on kondensaattorilevyjen etäisyys
- Q on kondensaattorilevyjen välinen varaus
- E on kondensaattorin yli oleva jännite



Kuva 34. Kapasitiivisen anturin toimintaperiaate. [23]

Äänenpaineen aiheuttamaa levyjen etäisyyden muutosta merkitään Δd :llä ja sen aiheuttamaa jännitteen muutosta ΔE :llä. Nämä sijoittamalla, sekä yhdistämällä kaavat 6.1 ja 6.2, saadaan, [23]

$$EC = Q_0 \quad (6.3)$$

$$(E + \Delta E) \frac{-A}{d + \Delta d} = E \frac{-A}{d} \quad (6.4)$$

Kaavasta 6.4 saadaan ratkaistua jännitteen muutos,

$$\Delta E = E \frac{\Delta d}{d} \quad (6.5)$$

Kaavasta 6.5 nähdään, että jännitteen muutos on suoraan verrannollinen etäisyyden muutokseen. Etäisyyden muutos on negatiivinen positiiviselle paineelle. Täten positiivinen paine aiheuttaa negatiivisen ulostulo jännitteen ja päinvastoin. [23]

Mikrofonin sähköisen tarkastelun lisäksi voidaan tutkia sen mekaanista käyttäytymistä. Mekaaninen tarkastelu on käyty läpi yksityiskohtaisemmin viitteessä [21], jossa käydään syvemmin läpi mekaanisen sijaiskytkennän määrittely mikrofoneille. Alla on esitetty tämän määrittelyn pääasiat.

Mikrofonin kalvon nopeus voidaan laskea kaavalla

$$u = \frac{F}{Z_m} = \frac{pA}{Z_m} \quad (6.6)$$

missä

F	on kalvoon vaikuttava voima
Z_m	on kalvon mekaaninen impedanssi
p	on kalvoon kohdistuva paine
A	on kalvon pinta-ala

Paine p vaikuttaa mikrofonin kalvoon koko sen pinta-alan A alueella. Tämä aiheuttaa voiman, joka liikuttaa kalvoa sen tasapainoasemasta. Voiman aiheuttamaa poikkeutusta vastustaa kalvolle ominainen mekaaninen impedanssi Z_m , jonka arvo riippuu kalvon rakenteesta ja materiaalista.

Tämän lisäksi voidaan määritellä kalvon poikkeama Δd sinimuotoiselle värähtelylle, joka esiintyy kaavassa 6.5,

$$\Delta d = \frac{u}{j\omega} \quad (6.7)$$

Kaavat 6.6 ja 6.7 yhdistämällä sekä pilkkomalla kalvon mekaaninen impedanssi resistanssiksi, induktanssiksi ja kapasitanssiksi, saadaan

$$\Delta d = \frac{pA}{j \omega Z_m} = \frac{pA}{j \omega \left(R_m + j \omega L_m + \frac{1}{j \omega C_m} \right)} \quad (6.8)$$

Liikuttaessa taajuuksilla, jotka ovat paljon alhaisempia kuin kalvon resonanssi taajuus (normaalisti 15 – 170 kHz luokkaa), kalvon mekaaninen impedanssi määräytyy lähinnä mekaanisesta kapasitanssista. Tällöin kaava 6.8 yksinkertaistuu muotoon

$$\Delta d \approx \frac{pA}{\frac{1}{C_m}} = pAC_m \quad (6.9)$$

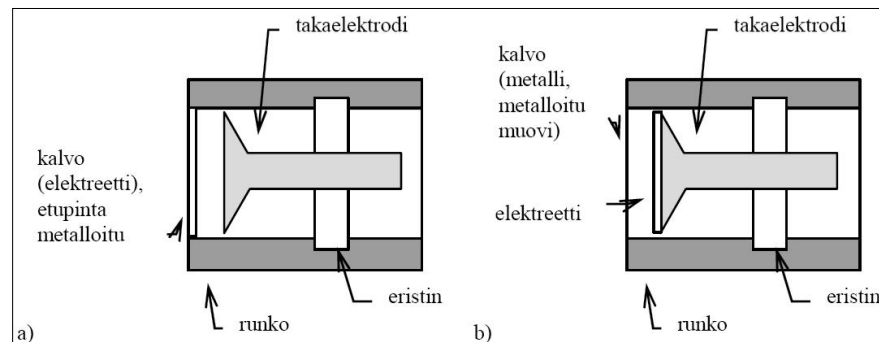
Saatu tulos voidaan liittää kaavan 6.5 kanssa, jolloin saadaan

$$\Delta E = E \frac{AC_m}{d} p \quad (6.10)$$

Tuloksesta nähdään, että mikrofonin lähtöjännite on

- suoraan verrannollinen polarisaatiojännitteeseen
- suoraan verrannollinen kalvon pinta-alaan
- suoraan verrannollinen kalvon mekaaniseen kapasitanssiin
- suoraan verrannollinen ilmanpaineeseen, joka kalvoon kohdistuu
- kääntäen verrannollinen mikrofonin kondensaattorilevyjen etäisyyteen

Kondensaattorimikrofonit ovat yleensä hyvin kalliita valmistaa. Tämä johtuu mikrofonissa käytettävistä materiaaleista sekä tarkoista valmistustoleransseista. Mikrofonit ovat kuitenkin laadukkaita, joten niiden käyttö ammattikäytössä sekä laboratorioissa on yleistä. Kondensaattorimikrofoni tarvitsee, kuten edellä on



Kuva 35. Elektreettimikrofonin kaksi eri rakennetta: a) polarisoitu kalvo, b) elektreetillä päällystetty takelektrodi. [21]

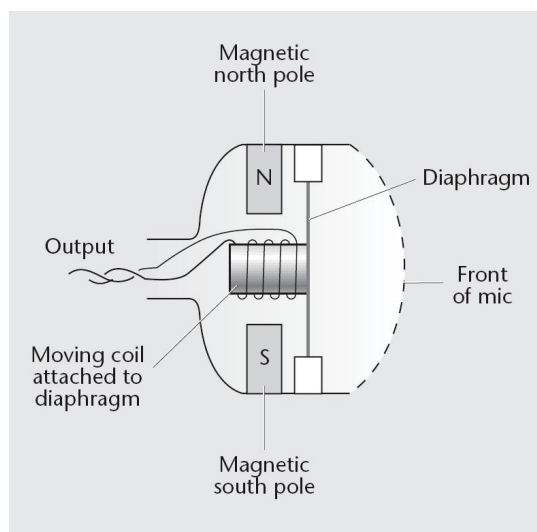
mainittu, toimiakseen joko sisäisen patterin tai ulkoisen virtalähteen, mikä voidaan katsoa olevan menetelmän haittapuoli.[21] [24]

Perinteisen kondensaattorimikrofonin muunnelmä on elektreettimikrofoni. Erona on se, että elektreettimikrofonissa käytetään pysyvän sähkövarauksen omaavaa muovikalvoa. Tällöin ei tarvita ulkoista esijännitelähdettä. Elektreettimikrofoneissa käytetään kahta erilaista rakenneratkaisua, riippuen siitä kumpi kondensaattorilevyistä toteutetaan elektreetillä. Halvemmissa ratkaisuissa käytetään polarisoitua kalvoa, kun taas vaativampaan käyttöön tarkoitetuissa mikrofoneissa käytetään metallikalvoa. Jos mikrofonissa käytetään metallikalvoa, tällöin takelektrodi on valmistettu metalloidusta muovikalvosta. Kuvassa 35 on esitetty molemmat vaihtoehdot. [21]

Elektreettimikrofonin etuja ovat alhaiset valmistuskustannukset sekä kohtuullinen äänenlaatu. Mikrofonin ei myöskään tarvitse ulkoista jännitelähdettä kondensaattorin polarisoimiseen. Tavallisen kondensaattorimikrofonin tapaan elektreettimikrofoni tarvitsee esivahvistimen. Vahvistin rakennetaan yleensä mikrofonikapselin sisään, jolloin mikrofonin käyttö helpottuu. [24]

6.1.2 Dynaaminen Mikrofonin

Dynaamisen mikrofonin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Mikrofonin koostuu värähtimenä toimivasta kalvosta ja siihen kiinnitetystä puhekelasta, joka on sijoitettu kestopäällyksen tuottamassa magneettikentässä (Kuva 36). Kun äänenpaine liikuttaa kalvoa, saa se samalla aikaan kelan liikkeen magneettikentässä. Tällöin johteeseen indusoituu virta sähkömagneettisen induktion toimesta. Sähkömagneettista induktiota on käsitelty aiemmin kappaleessa 5.2 *Pyörrevirta*, jossa käydään ilmiön taustalla oleva teoria. [21]



Kuva 36. Dynaamisen mikrofonin rakenne. [22]

Dynaamisen mikrofonin puhekelaan indusoituva jännite saadaan kaavalla

$$e = Blu \quad (6.11)$$

missä,

- B on kestopagneetin synnyttämä magneettikenttä
- l on magneettikentän alueella olevan johtimen osan efektiivinen pituus
- u on mikrofonin kalvon nopeus

Selvittääksemme kuinka paine, sekä mikrofonin mekaaniset ominaisuudet vaikuttavat lähtöjännitteeseen, tarkastelemme aluksi mikrofonin mekaanisen piirin toimintaa. Mekaanisen sijaiskytkennän määrittelemisestä mikrofonille on tarkempi selitys ja kuvaus viitteessä [21]. Tässä esitetään ainoastaan pääasiat sekä niistä johdetut tulokset. Dynaamista muunninta kuormittava sähköinen impedanssi kytkeytyy mekaanisella puolella muodossa

$$Z_{me} = \frac{Bl}{Z_e} = \frac{Bl}{Z_c + Z_l} \quad (6.12)$$

missä,

- Z_e on piirin sähköinen kokonaisimpedanssi
- Z_c on puhekelan impedanssi
- Z_l on kuormitusimpedanssi

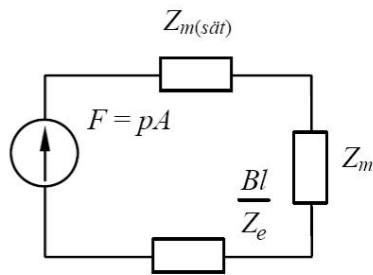
Tämän kuorman aiheuttaman mekaanisen impedanssin lisäksi mikrofonin kalvo aiheuttaa oman mekaanisen impedanssin Z_m sekä säteilyimpedanssin $Z_{m(sät)}$. Kuvassa 37 on esitetty dynaamisen mikrofonin mekaaninen sijaiskytkentä. Kuvassa esiintyvä voima F on kalvoa liikuttava voima, jonka synnyttää kalvoon pinta-alaan A osuva äänenpaine p .

Mikrofonin kalvon nopeutta laskettaessa riittää, että otamme huomioon ainoastaan kalvon mekaanisen impedanssin. Tämä johtuu siitä, että kalvon säteilyimpedanssi on paljon pienempi verrattuna mekaaniseen impedanssiin. Tämä yksinkertaistus huomioon ottamalla saadaan kuvan 38 esittämä sähköinen sijaiskytkentä dynaamiselle mikrofonille. Tästä piiristä saadaan kelan virta, joka on

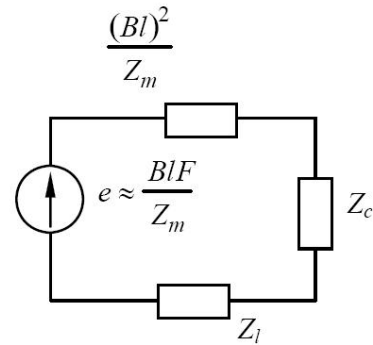
$$i \approx \frac{BlF}{Z_m \left(Z_c + Z_l + \frac{(Bl)^2}{Z_m} \right)} \approx \frac{BlF}{Z_m Z_e} \approx \frac{BlA}{Z_m Z_e} p \quad (6.13)$$

Mikrofonin antama jännite kuormaan Z_l on

$$E \approx Z_l i \approx \frac{Z_l}{Z_c + Z_l} \frac{BlA}{Z_m} p \quad (6.14)$$



Kuva 37. Mikrofonin mekaaninen sijaiskytkentä. [21]



Kuva 38. Mikrofonin sähköinen sijaiskytkentä. [21]

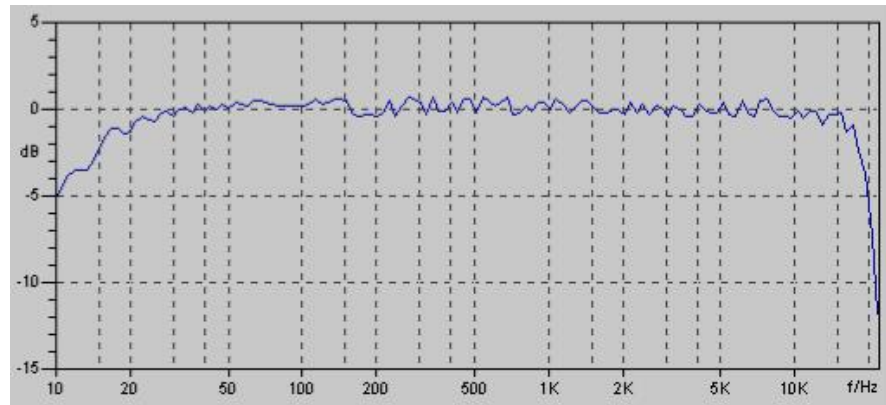
Tuloksesta nähdään, että mikrofonin lähtöjännite on

- suoraan verrannollinen sähkömagneettiseen kytkentäkertoimeen Bl
- suoraan verrannollinen kalvon pinta-alaan
- suoraan verrannollinen ilmanpaineeseen, joka kalvoon kohdistuu
- kääntäen verrannollinen mikrofonin kalvon mekaaniseen impedanssiin

Dynaaminen mikrofoni on monipuolinen ja yleiskäyttöinen mikrofoni. Sen yksinkertainen rakenne sekä toimintaperiaate tekevät siitä vankkarakenteisen sekä kovaan käyttöön sopivan mikrofonin. Tästä syystä myös mikrofonin valmistuskustannukset ovat alhaiset. Dynaaminen mikrofoni ei elektreettimikrofonin tapaan tarvitse ulkoista virtalähdettä tai pattereita. Mikrofonin yksinkertaisesta rakenteesta kertoo myös se, että kondensaattorimikrofonista poiketen, dynaaminen mikrofoni ei sisällä omaa sisäistä vahvistinta. [24]

Taajuusvaste ei ole dynaamisella mikrofoniolla yhtä tasainen kuin kondensaattorimikrofoneilla. Sen sijaan ammattikäyttöön tarkoitettujen dynaamisten mikrofonien taajuusvaste on usein räätälöity käyttötarkoituksen mukaan vastaamaan mahdollisimman hyvin käyttäjän vaatimuksia. Taajuusalueen leveys on laaja, mutta ei yllä kondensaattorimikrofonien leveyksiin. [24]

Dynaaminen mikrofoni pystyy kondensaattorimikrofonia paremmin käsittelemään korkeita äänenvoimakkuuksia. Tämä johtuu mikrofonien rakenteellisista eroista, ja eritoten mikfonikalvon rakenteesta ja jäykkyydestä. Dynaamisen mikrofonin kalvon ja siihen kiinnitetyn kelan suurempi massa kuitenkin aiheuttaa sen, että mikrofonin kalvo ei pysty liikkumaan parhaalla mahdollisella tavalla todella nopeiden äänen transienttien mukana. [24] [25]



Kuva 39. Esivahvistimen taajuusvaste. [27]

6.1.3 Esivahvistin

Mikrofonin tuottama matalatasoinen, sähköinen signaali on vahvistettava esivahvistimella mahdollista jatkovahvistusta tai käsittelyä varten. Esivahvistimella myös muunnetaan mikrofonin korkea impedanssi matalammaksi. Tällöin mahdollistetaan pitkien kaapelien käyttö sekä kytkentä matala impedanssiin instrumentteihin. Tästä johtuukin se vaatimus, että esivahvistin on sijoitettava mahdollisimman lähelle mikrofonia. Matala impedanssi varmistaa myös sen, että ulkoinen sähkömagneettinen häiriö ei kytkeydy niin helposti järjestelmään. [26]

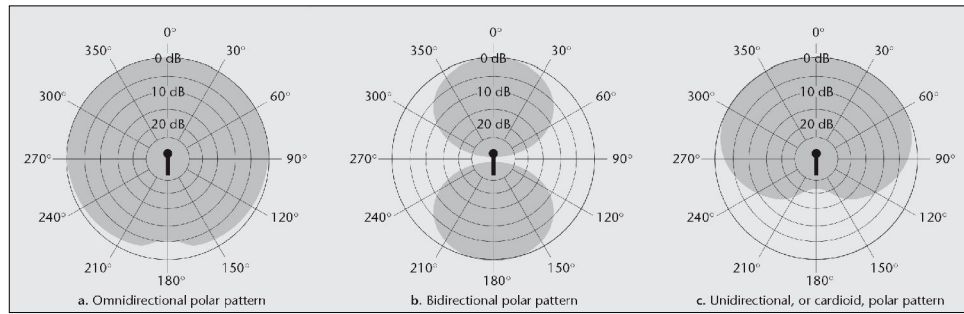
Esivahvistin rakennettiin varta vasten mittauksia varten. Vahvistimen mallina toimi Tomi Engdahlin suunnittelema ja rakentama yksinkertainen mikrofonin esivahvistin. Yksinkertaisesta rakenteestaan huolimatta esivahvistin on ominaisuuksiltaan riittävä työn kannalta. Esivahvistin on tarkoitettu käytettäväksi sekä dynaamisten että elektreettimikrofonien kanssa, jolloin testeissä voidaan käyttää samaa vahvistinta kaikille mikrofoneille. Vahvistimen taajuusvaste on 20 Hz – 20 kHz $\pm$ 1dB ja vahvistusta sillä on 35 dB. Vahvistimen taajuusvaste on esitetty kuvassa 39. Virtalähteenä vahvistin käyttää 9 V patteria, joten vahvistin ei tarvitse verkkovirtaa. Tällöin vahvistin on helppo sijoittaa haluttuun paikkaan mittauksien ajaksi. [27]

6.1.4 Suuntaominaisuudet

Mikrofonien suuntaominaisuuksista kertoo suuntaherkkyys. Se kertoo mikrofonin herkyyden eri suunnista tuleville äänille. Jotkin mikrofonit ovat herkkiä kaikkialta tuleville äänille, kun taas toiset vastaanottavat ääniä ainoastaan tietyistä suunnista.

Mikrofonin suuntaavuutta kuvataan yleensä graafisesti suuntakuviolla. Mikrofonit jaetaan karkeasti kolmeen pääkategoriaan suuntakuvionsa perusteella: pallo, kahdeksikko ja hertta. Graafisesta esityksestä pystytään määrittelemään herkkyys tietyistä suunnista saapuvalle äänelle (Kuva 40). [22]

Edellä esitetyt suuntakuviot ovat ideaalisia. Käytännössä suuntakuvion muoto ja suuntaherkkyys riippuu vastaanotettavan äänen taajuudesta. Koska korkeilla



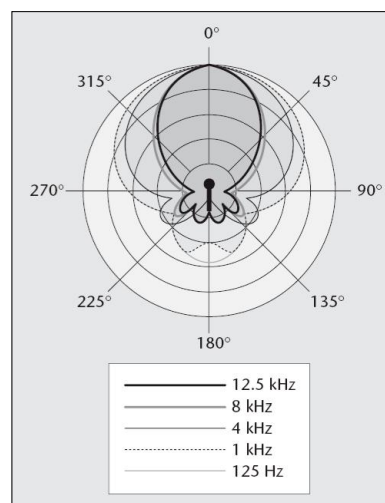
Kuva 40. Mikrofonin suuntakuviot a) pallo, b) kahdeksikko, c) hertta. [22]

taajuuksilla aallonpituus on lyhyt ja matalilla taajuuksilla pitkä, tästä syystä mitä suurempi taajuus on sitä suuntaavammaksi mikrofoni tulee. Vastaavasti matalilla taajuuksilla mikrofonin suuntaavuus heikkenee. Kuvassa 40 esitetään taajuuden vaikutus suuntakuviioon ja mikrofonin suuntaavuuteen. [22]

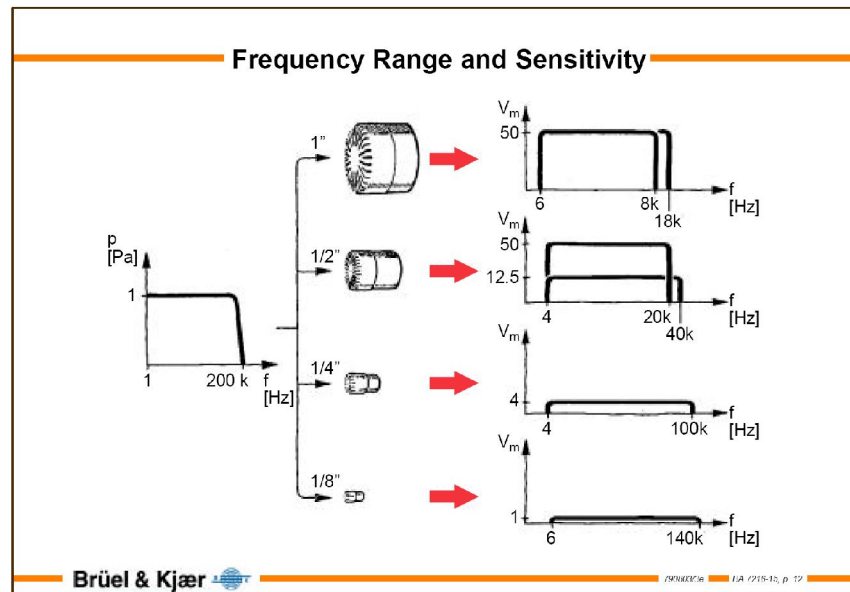
6.1.5 Taajuusvaste

Taajuusvaste on mikrofonin herkkyyden graafinen esitys taajuuden suhteen. Vaste kertoo kuinka hyvin mikrofoni pystyy kullakin taajuudella olevan komponentin akustisen energian muuttamaan sähköiseksi signaaliksi. Graafisesta esityksestä pystytään näkemään mm. kuinka tasainen vaste on sekä taajuusalueen ylä- sekä alarajataajuuDET. [28]

Taajuusvaste saattaa olla ilmaistuna myös huomattavasti rajoitetummin. Mikrofonille saatetaan antaa taajuusvaste muodossa ”20 Hz – 20 kHz ± 3 dB”, jolloin itse asiassa on puhe taajuusalueesta eikä niinkään taajuusvasteesta. Taajuusvasteen tarkasta



Kuva 41. Taajuuden vaikutus mikrofonin suuntaherkkyyteen. [22]



Kuva 42. Kondensaattorimikrofonin halkaisijan vaikutus taajuuskaistaan.[26]

käyttäytymisestä taajuuden suhteen ei tällöin ole tarkkaa tietoa. Tiedetään ainoastaan, että vaste on tasainen mainitulla taajuusalueella ± 3 dB marginaalilla. Tämä tarkoittaa sitä, että taso ei poikkea 3 dB enempää kumpaankaan suuntaan. [22] [28]

Kondensaattorimikrofonien taajuusvaste on yleisesti hyvin tasainen ja ulottuu pitkälle sekä matalille että korkeilla taajuuksilla. Rajataajuudet liikkuvat alataajuuden muutamasta kymmenestä hertsistä ylärajataajuuden useisiin kymmeniin kilohertzeihin. Elektreettimikrofonit eivät aivan yllä samoihin kaistanleveyksiin kuin laadukkaat kondensaattorimikrofonit. Myös mikrofonin halkaisija ja fyysinen koko vaikuttaa taajuusvasteen muotoon. Mikrofoneilla joilla on pienempi halkaisija, on yleensä leveämpi taajuuskaista, joka ulottuu pidemmälle korkeilla taajuuksilla. Suuren halkaisijan omaavilla mikrofoneilla taajuuskaista on huomattavasti kapeampi. [28] [29]

Dynaamisilla mikrofoneilla taajuusvaste ei ole yleensä yhtä tasainen kuin kondensaattorimikrofoneilla. Sen sijaan niiden vaste on usein räätälöity vastaamaan mahdollisimman hyvin käyttötarkoitusta. Tällöin jotkut taajuusalueet saattavat olla tarkoituksellisesti painotettuja. [24]

6.1.6 Herkkyys

Herkkyys ilmaisee, kuinka hyvin mikrofoni muuttaa akustista painetta jännitteeksi. Tämä jännitepaineherkkyys kertoo siis mikrofonin kohdalla vaikuttavan äänenpaineen ja mikrofonin antaman jännitteen suhteen. Herkkyyttä merkitään symbolilla M ja siitä yleisimmin käytetyt yksiköt ovat V/Pa ja mV/Pa. Joissain tapauksissa herkkyys saatetaan ilmoittaa desibeleissä, joka lasketaan yksikössä V/Pa ilmoitetusta arvosta kaavalla

$$M_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{M}{V/Pa} \right) \quad (6.15)$$

Käytännössä on tunnettava mikrofonin herkkyys taajuuden funktiona. Jos kuitenkin mikrofonin taajuusvastetta ei ole tiedossa, käytetään herkkyyden kuvaamiseen yksittäistä lukuarvoa. Tämä arvo mitataan, jos muuta ei mainita, yleensä 1 kHz taajuudella. Taulukossa 5 on esitetty eri mikrofonityyppien yleisiä herkkyyden arvoja. [21] [22]

Taulukko 5. Mikrofonien yleisiä herkkyyksiä. [22]

Mikrofonityyppi	Herkkyys [dBV]
Pienet dynaamiset	-85
Suuret dynaamiset	-75
Kondensaattori	-65

6.2 Pyörrevirta-anturi

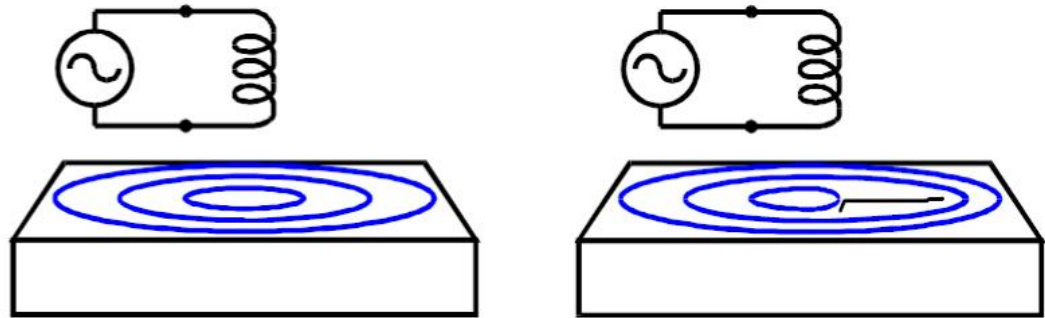
Pyörrevirta-anturin käyttäminen hihnan kunnonvalvonnassa perustuu teoriaan, jonka mukaan hihnassa olevat epäjatkuvuuskohdat (halkeamat) sekä pinnan epätasaisuudet (iskemät) aiheuttavat muutoksen anturin toiminnassa. Halkeamat estävät hihnaan syntyvien pyörrevirtojen normaalin etenemisen, kun taas epätasaisuudet muuttavat anturin ja kohteen etäisyyttä toisistaan.

Pyörrevirta-anturin taustalla olevaa teoriaa on käyty läpi jo kappaleessa 5.2 *Pyörrevirta-anturi*. Tässä kappaleessa käydään tarkemmin hihnassa mahdollisesti esiintyvien vikojen havainnointiin liittyviä seikkoja sekä mahdollisia ongelmia.

Kuten tahdistuksen mittauksessa pyörrevirta-anturilla, kunnonvalvonnassakin pyritään siihen, että toteutus on mahdollisimman yksinkertainen ja kustannustehokas. Nämä kriteerit saavutetaan käyttämällä saatavilla olevia kaupallisia antureita, jotka soveltuvat vaadittuun käyttöön.

Halkeama

Johteen pinnassa oleva halkeama vaikuttaa pyörrevirtojen kulkuun johteessa, sillä virrat kulkevat aina sitä reittiä, jonka sähköinen resistanssi on pienin. Kun pyörrevirrat kohtaavat pinnassa olevan halkeaman, joka on syvä mutta pituudeltaan lyhyt, virtaavat ne halkeaman päiden ympäri. Jos taas halkeama on matala mutta pitkä verrattuna anturin halkaisijaan, kulkevat virrat halkeaman alitse. Molemmissa



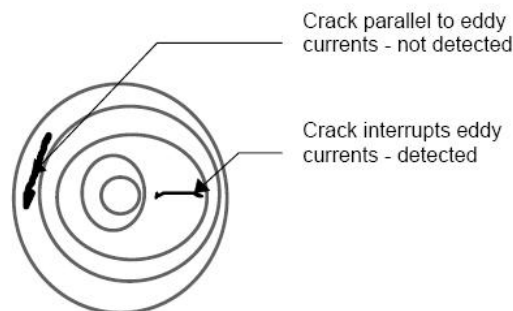
Kuva 43. Pyörrevirtojen muodostuminen ehjässä pinnassa (vasemmalla) sekä pinnassa jossa on halkeama (oikealla). Virrat kiertävät halkeaman sen reunojen ympäri. [31]

tapauksissa halkeama suurentaa virtojen kohtaamaan resistanssiin, ja tätä kautta anturin kelan impedanssia. Tämä muutos havaitaan anturissa, ja näin halkeama tulee paikallistettua. [30]

Halkeaman orientaatio kohteen pinnassa vaikuttaa halkeaman havaitsemiseen. Halkeamat, jotka katkaisevat parhaiten ympyrämuotoisten pyörrevirtojen kulun, kasvattavat virtojen kokema resistanssia kaikista eniten. Virtojen ympyrämuotoisten ratojen tangentin suuntaiset halkeamat taas puolestaan saattavat jäädä helpommin huomaamatta, sillä niiden vaikutus virtojen kulkuun on selvästi pienempi (Kuva 44). Halkeaman havainnointia voidaan parantaa liikuttamalla joko anturia tai kohdetta, jolloin halkeaman ja pyörrevirtojen suunta toisiinsa nähden muuttuu. Tällöin varmistutaan, että kaiken suuntaiset halkeamat havaitaan. [31]

Kokemuksen perusteella tiedetään, että hihnaan syntyvät halkeamat ovat säännöllisesti hihnan kulkusuuntaan nähden poikittaissuuntaisia. Halkeamat leviävät ja kasvavat synnyttyään poikittaissuunnassa pitkittäissuuntaisen jännityksen ansiosta. Syvyysuunnassa halkeamat ovat ulottuneet läpi koko hihnan paksuuden, joka on noin 0,8 mm.

Pyörrevirta-anturi muodostaa aktiiviseen päähänsä suunnatun magneettikentän. Muodostuva magneettikenttä on muodoltaan rengasmainen ja se on halkaisijaltaan noin kolme kertaa anturin halkaisijan kokoinen. Tästä voidaan päätellä, että anturin



Kuva 44. Halkeaman orientaation vaikutus pyörrevirtojen kulkuun. [31]

havainnointialueen halkaisija on noin kolminkertainen anturin halkaisijaan nähden. Jotta halkeama havaittaisiin, on sen sijaittava tällä havainnointialueella. Lisäksi, kuten aikaisemmin jo mainittiin, on halkeaman oltava suuri verrattuna anturin halkaisijaan. Tästä johtuen pienten halkeamien havaitsemiseen on käytettävä suhteellisen pienen halkaisijan omaavaa anturia. [32]

Iskemä

Kuten halkeamankin tapauksessa, iskemän kohdalla pyörrevirtojen eteneminen poikkeaa normaalitilasta. Sen lisäksi, että kohteen epätasaisuudet saavat virrat kulkemaan normaalisti poiketen, vaikuttaa myös kohteen ja anturin etäisyys mittaustulokseen. Kuten kaavasta 5.23 käy ilmi, etäisyyden pienentyessä magneettikentän voimakkuus kasvaa. Magneettikentän voimakkuuden kasvu taas saa aikaan pyörrevirtojen voimakkuuden kasvun (kaava 5.24).

Pyörrevirtojen voimakkuuden muutosta anturin ja kohteen etäisyyden suhteen käytetään yleisesti hyväksi induktiivisten lähestymisantureiden yhteydessä. Niillä määritetään erilaisissa järjestelmissä kohteen etäisyyttä anturiin tai yksinkertaisesti todetaan onko kohde paikoillaan.

7. KOKEELLINEN OSA

7.1 Koejärjestelyt

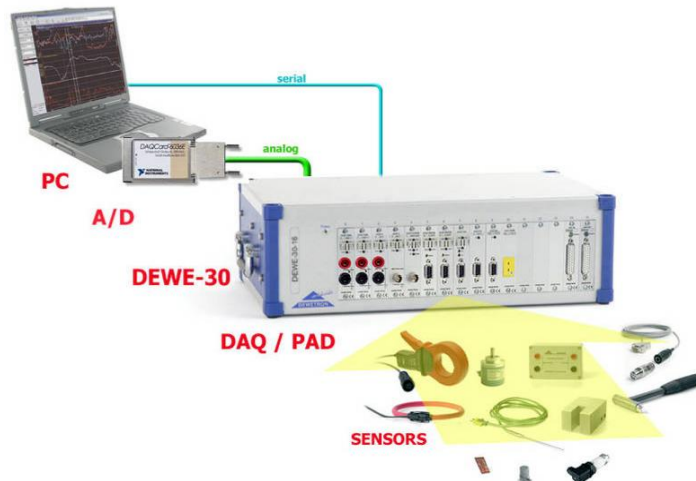
Hihnan tahdistukseen ja kunnonvalvontaan liittyvät laboratoriotestit suoritettiin Metso Paper Oy:n Järvenpään yksikössä sijaitsevalla testilaitteella (Kuva 45). Testilaitte on varta vasten suunniteltu maksimissaan noin 50 cm leveiden hihnojen pyörittämiseen suurilla nopeuksilla. Laitte käsittää kaksi, noin 2 m päähän toisistaan asennettua pehmeää telaa, joiden välille 5 m pitkä teräshihna on asennettu. Hihnan kireyttä pystytään säätämään telojen etäisyyttä muuttamalla. Laitteen käyntinopeutta pystytään hallitsemaan portaattomalla nopeudensäätimellä. Testilaitte sekä muu testilaitteisto oli pystytetty tehdashalliin rakennettuun, ylhäältä avoimeen huoneeseen.

Teräshihna, jota testeissä käytettiin, oli 1,2 mm paksua. Tämä eroaa tuotantokäytössä olevien hihnakanterien 0,8 mm paksusta hihnasta 0,4 mm. Tämä aiheuttaa muun muassa sen, että testeissä käytetty paksumpi hihna on jäykempää. Sähköisiltä sekä magneettisilta ominaisuuksiltaan testihihna vastasi tuotantokäytössä olevia hihnoja.

Mittalaitteena testeissä käytettiin Dewetronin [36] valmistamaa Dewe-Rack dataloggeria. Mittalaitteessa on 16 analogista sisääntuloa, joihin anturit pystytään kytkemään BNC-liittimin. Kanavien sisääntulon jännitealue on säädettävissä välillä 10 mV – 50 V ja alipäästösuodatusta sisään tulevalle signaalille voidaan valita mittalaitteessa olevilla säädöillä välillä 10 Hz – 10 kHz. Dewetronin analoginen ulostulo (± 5 V) on liitetty tietokoneen tiedonkeruukorttiin, jossa suoritetaan signaalin A/D-muunnos. Tämän jälkeen signaali on digitaalisesti muokattavissa ja analysoitavissa tietokoneella siihen soveltuvalle ohjelmistolla. Mittausjärjestelmän yleinen rakenne on esitetty kuvassa 46.



Kuva 45. Laboratoriotestien testilaitte.



Kuva 46. Mittausjärjestelmän yleinen rakenne anturilta tietokoneelle. [33]

Signaalin tallennus sekä reaaliaikainen analysointi tehtiin Dewetronin valmistamalla DASYLab tiedonkeruusysteemien kehitysokalulla. Signaali tallennettiin tietokoneen muistiin muokkaamattomana, jonka jälkeen tarkempi analysointi ja signaalinkäsittely suoritettiin Matlab ohjelmistolla.

7.2 Tahdistuksen mittaus

Tahdistuksen mittauksessa keskityttiin hihnassa olevan mittauskohteen aiheuttaman muutoksen havainnoimiseen antureilla. Mittauspisteen aiheuttaman muutoksen erottuminen kohinasta sekä sen toistuvuuden tarkkuus signaalissa olivat asiat, joita testeillä tutkittiin. Muutoksen erottumista kohinasta tutkitaan määrittelemällä signaali-kohina-suhde eri teräshihnan nopeuksilla. Muutoksen toistuvuutta signaalissa taas tutkitaan pulssien välistä aikaa mittaamalla.

7.2.1 Pyörrevirta-anturi

Pyörrevirta-anturin käyttö perustuu oletukseen, että pystymme sen avulla havaitsemaan hihnassa olevan hitsaussauman. Hihnan sauman tarkan havainnoinnin avulla pystymme laskemaan hihnan kierrosajan, ja tätä kautta saamme selville tarkan kierrostaajuuden tahdistukselle. Testilaitteella pyöritettävässä hihnassa näitä hitsisaumoja on vain yksi.

Hitsaussauma

Hitsaussauma on metallihihnassa mikrorakenteellinen epäjatkuvuuskohta sekä mahdollinen poikkeama sen paksuudessa ja tasaisuudessa. Sauman aiheuttama

rakennemuutos ei ole terävä rajapinta, vaan pitkällä matkalla sijaitseva muutos hihnan normaali rakenteeseen verrattuna. Tällöin voidaan olettaa, että muutos ei ole hyvin suuri verrattuna esimerkiksi halkeaman aiheuttamaan muutokseen. Myös signaalissa mahdollisesti näkyvän ”piikin” jyrkkyys saattaa olla loivempi. Sauma on pitkittäissuunnassa leveydeltään noin 6 mm ja kulkee viistosti läpi koko hihnan.

Anturit

Testiin valittiin kaksi erilaiset ominaisuudet omaavaa pyörrevirta-anturia; IA5034 ja IF6031 (kuva 47) (Ifm Electronic [18]). Molemmat anturit ovat induktiivisia lähestymiskytkimiä, joiden pääasiallinen käyttötarkoitus on metalliesineiden ja pintojen etäisyyden määrittäminen. Valitut anturit eroavat toisistaan merkittävästi herkkyytensä, havainnointialueen kokonsa sekä toimintaetäisyytensä suhteen. Antureista IA5034 on selvästi kookkaampi, joka tarkoittaa suurempaa toimintaetäisyyttä sekä havainnointialuetta. Toisaalta suurempi koko tarkoittaa myös sitä, että IA5034 on anturi kaksikosta epäherkempi. IF6031 on 2,77 kertaa herkempi, mutta häviää IA5034:lle sekä havainnointialueen sekä toimintaetäisyyden suuruudessa. Taulukossa 6 (s.65) on lueteltu anturien tärkeimmät ominaisuudet vertailun vuoksi.



Kuva 47. Pyörrevirta-anturit IA5034 (vasemmalla) ja IF6031 (oikealla).

Taulukko 6. Testeissä käytettävien antureiden tärkeimmät ominaisuudet.

Ominaisuus	IA5034	IF6031
Analogialähtö [V]	0...6	0...10
Toimintaetäisyys [mm]	2...10	0,4...4
Herkkyys [V/mm]	1	2,77
Halkaisija [mm]	20	10

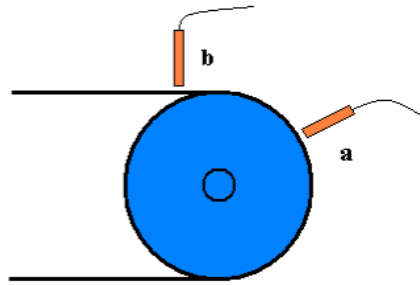
Anturien liittäminen mittauslaitteistoon

Anturin IA5034 kanssa käytettiin varta vasten anturin kanssa käytettäväksi suunniteltua elektroniikkayksikköä, jolla signaalin vahvistaminen sekä ulostulon balansointi ovat mahdollisia. Laitteen on suunnitellut ja toteuttanut Metso Paper Oy:n työntekijä, insinööri Keijo Lahtinen. Laitteen sisääntuloon syötetään anturin antama signaalin, jonka jälkeen laitteella pystytään portaattomasti muuttamaan signaalin DC-tasoa. Mittauksissa laitteen ulostulo balansoitiin niin, että anturin ollessa kohteen pinnasta noin 5,6 mm päässä, oli ulostulon jännitteen arvo 0 V. Laitteen balansoitu ulostulo kytkettiin tämän jälkeen Dewetronin sisääntuloon BNC-kaapelilla.

IF6031:n kanssa ei ollut käytettävissä vastaavanlaista DC-tason säätäjää. Sen rakentamista ei myöskään nähty tarpeelliseksi, joten testeissä tyydyttiin mittamaan anturin suoraan antamaa ulostulon jännite. Alasvetovastuksena käytettiin 2 k Ω vastusta, joka kytkettiin suoraan anturin ulostulon ja maapotentiaalin väliin. Valmistajan antaman ohjeen mukaan minimi kuormitusresistanssi on 2 k Ω .

Anturien asennus

Anturit asennettiin laitteessa kohtaan, jossa metallihihna myötäilee ja on tiukasti kiinni telan pinnassa (kuva 48. a-kohta). Tällä asennuskohdalla varmistutaan siitä, että hihnan mahdollinen värähtely ei aiheuta ylimääräistä kohinaa mittauksessa. Asennusetaisyydeksi hihnan pinnasta valittiin anturin toimintaetäisyyden puoliväli, jotta ulostulo olisi mahdollisimman pitkään lineaarinen molempiin muutossuuntiin. Anturi asennettiin omaan telineeseensä, joka seisoi maassa ilman kosketusta testilaitteeseen.



Kuva 48. Anturien asennus testilaitteeseen;
a) telan kaarelle ja b) suoralle osuudelle.

Mittaus

Anturin kytkemisen ja paikalleen asettamisen jälkeen, sen asennuspaikkaa ei enää muutettu. Tämän jälkeen testilaitte kytkettiin päälle, jolloin hihna lähti pyörimään asetetulla nopeudella. Nopeutta säädettiin kierrettävällä lineaarisella säätimellä johon oli merkattu nopeusasteikko nolasta ylöspäin. Testeissä molemmille anturille tehtiin mittaukset neljällä eri nopeudella, jotta nähtäisiin miten metallihihnan pyörimisnopeus vaikuttaa signaaliin, sekä siihen miten hitsausauma havaitaan hihnasta. Testissä käytettiin säätimen nopeuden arvoja 2, 4, 6, 8.

Oikean nopeuden asettamisen jälkeen, aloitettiin signaalin tallennus mittalaitteeseen kytketyllä tietokoneella. Signaalin mittausdataa kerättiin ja tallennettiin tietokoneeseen asennetulla DASYLab ohjelmalla noin 20 sekunnin mittainen jakso. Mittaustieto tallennettiin täysin muokkaamattomana ja suodattamattomana raakasignaalinä. Tietokoneen asennetun tiedonkeruukortin A/D-muuntimen näytteenottotaajuus asetettiin ohjelmassa 20 kHz:iin. Data tallennettiin tietokoneen muistiin ASCII-muodossa, jotta se olisi jatkossa helposti käytettävissä muilla ohjelmistoilla.

7.2.2 Optinen anturi

Optisella anturilla oli tarkoitus havaita suurella nopeudella liikkuvasta heijastavasta metallipinnasta tumma mittauspiste. Mittauspiste oli tehty metallihihnaan siten, että se aiheuttaisi mahdollisimman suuren kontrastieron hihnan heijastavan metallipinnan kanssa.

Mittauspiste

Mittauspiste tehtiin hihnan ulkopintaan värjäämällä 10 mm x 30 mm kokoinen alue mustalla värillä. Värjäämiseen käytettiin mustaa kesto-merkkäusväriä, jolla kohdealueen pinta saatiin täysin tasaisen mattamustaksi. Alue sijoitettiin hihnan reuna-alueelle siten, että hihnan kulkusuuntaan nähden sen pituus on 10 mm. 30 mm leveydellä varmistettiin ainoastaan se, että merkki osuu anturin valokennon kohdalle.



Kuva 49. Kohteesta heijastava valokenno OJ5100.

Anturi

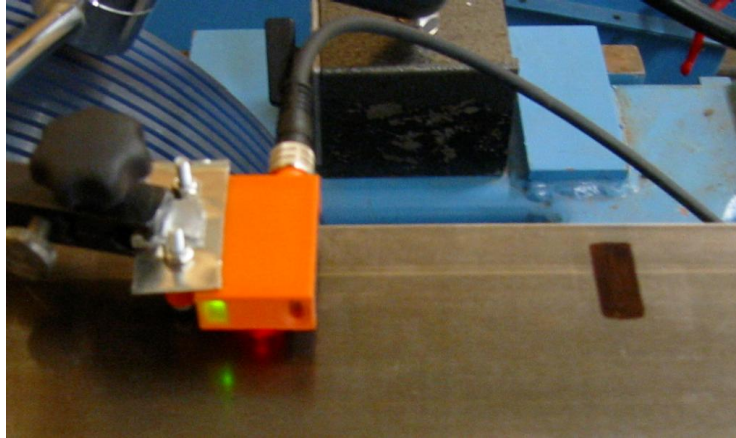
Optisena anturina testeissä toimi Fmi Electronicsin OJ5100 kohteesta heijastava valokenno (kuva 49). Kohteesta heijastava valokenno valittiin, koska sen katsottiin parhaiten soveltuvan testin tarkoitukseen. Valokenno on suunniteltu erottamaan kontrastieroja, joita kohteessa esiintyy. Valokennon ulostulossa on PNP-transistori, joka tuottaa digitaalisen ulostulon (0 – 10 V). Anturin lähtö on ohjelmoitavissa, joten sille pystytään määrittelemään milloin liipaisu halutaan tapahtuvan. Tämä ohjelmointi aloitetaan siirtymällä anturin normaalitoimintatilasta ohjelmointitilaan anturin kytkintä painamalla. Tämän jälkeen valokennon havaitsemisalueelle, säteen eteen viedään haluttu, liipaisun aiheuttava, kohde. Tilanne tallennetaan anturin ”muistiin” kytkintä painamalla. Seuraavaksi kohde otetaan pois anturin havainnointialueelta. ”Normaalitila” tallennetaan anturin muistiin jälleen kytkintä painamalla. Tämän jälkeen ohjelmointi on suoritettu ja anturilla on tieto kontrastierosta, joka vallitsee kohteen ja sen taustan välillä. Tätä tietoa valokenno käyttää ulostulonsa määrittämiseen.

Valokennon liittäminen mittauslaitteistoon

Valokennon kytkeminen muuhun mittalaitteistoon tapahtuu kolmella johtimella; positiivinen käyttöjännite 10 – 30 V, maa sekä anturin ulostulo. Ulostulo kytkettiin maahan 150 Ω suuruisella alavetovastuksella, jotta valmistajan ohje 200 mA:n maksimi kuormitettavuudesta täyttyisi. Ulostulo jännite mitattiin tämän vastuksen yli mittapäillä, jotka liitettiin Dewetronin loggerin sisääntuloon BNC-kaapelilla.

Valokennon asennus ja ohjelmointi

Anturi asennettiin paikoilleen siten, että hihnan pyöriessä, mustaksi maalattu merkkapiste kulkee valokennon havainnointialueen ohitse. Anturi asennettiin testilaitteessa sellaiseen kohtaan hihnan yläpuolelle, jossa hihna kulkee suorassa eikä taipuneena telan kaarelle (kuva 50). Etäisyydeksi anturin ja hihnan välille asetettiin 6 mm, jolloin hihnan mahdollinen huojunta ei aiheuta kosketusta hihnan ja anturin



Kuva 50. Mittauspiste hihnassa sekä OJ5100 asennus.

välille. Näin lähelle hihnan pintaa asennettuna varmistuttiin myös siitä, että valokennon havaintoalue ei ole pinta-alaltaan liian suuri, vaan mahdollisimman tarkka ja fokusoitunut.

Anturin fyysisen asennuksen jälkeen, se ohjelmoitiin aikaisemmin mainitulla tavalla. Ensin hihnasta pyöritettiin anturin eteen kohta, jossa mittauspiste sijaitsi. Tämän jälkeen mittauspiste siirrettiin hihnaa pyörittämällä pois anturin edestä niin, että valokennon edessä oli pelkkää tyhjää, kirkasta metallipintaa.

Mittaus

Mittaus suoritettiin testilaitteen nopeuksilla 2, 4, 6 ja 8, kuten pyörrevirta-anturienkin kohdalla. Testilaitte kytkettiin päälle, jonka jälkeen valokennon antama signaali tallennettiin mittalaitteen ja tietokoneessa olevan tiedonkeruukortin avulla tietokoneen muistiin. Tieto tallennettiin kuten aikaisemminkin DASYLab ohjelmalla ASCII-muodossa, jotta se olisi myöhemmin helposti käytettävissä muilla ohjelmilla.

7.2.3 Autokorrelaatio

Pyörrevirta-anturin ja valokennon testeistä poiketen, autokorrelaation testit suoritettiin tuotantolaitteesta saadulle datalle, eikä testilaitetta siis käytetty lainkaan. Laskemalla autokorrelaatio tuotantolaitteen kaavarilla sijaitsevien värähtelyanturien signaalille, pyritään selvittämään hihnan kierrosaika. Hihnan pinnan pienet epätasaisuudet sekä hihnan paksuuserot aiheuttavat kaavarissa liikettä, joka taas näkyy värähtelyanturien signaalissa muutoksina. Muutokset ovat säännöllisiä ja esiintyvät ajan suhteen jaksollisesti hihnan pyöriessä vakionopeudella.

Signaalin tallennus

Värähtelyantureina toimivien kiihtyvyysantureiden signaalia tallennettiin käynnissä olevalta tuotantolaitteelta 10 sekunnin mittainen jakso näytteenottotaajuudella 19608 Hz. Signaalin taajuusalue oli 0 – 1000 Hz, joka oli rajoitettu mittalaitteiston toimesta. Signaali tallennettiin tekstitiedostoon, jossa signaalin lukuarvot olivat helposti saatavilla Matlab ohjelmistolla. Signaalien tallentamisen yhteydessä selvitettiin myös tuotantolaitteen laskennallinen kierrostaajuus, joka saatiin selville mittalaitteiston tallentamista tiedoista. Tätä arvoa voitiin käyttää referenssiarvona, sekä arvona, jonka läheisyydestä autokorrelaation määrittelemää taajuutta voitiin lähteä etsimään.

Autokorrelaation tekeminen

Tekstitiedostossa sijaitsevat signaalin arvot luettiin Matlab ohjelmalla vektoriksi, jonka jälkeen signaali oli käsiteltävissä ja muokattavissa vapaasti. Autokorrelaation tekemiseen signaalille käytettiin Matlabin valmista funktiota `xcorr()`, joka laskee sille parametreina annettujen vektorien ristikorrelaation. Jos syötettyjä signaaleita on ainoastaan yksi, laskee Matlab autokorrelaation kyseiselle vektorille. Tämän lisäksi funktiolle `xcorr()` annettiin parametreina käsky normalisoida autokorrelaatiotulos, jolloin saatiin kaavaa 5.14 vastaava tulos.

7.3 Vian havainnointi hihnasta

Testattaessa vian havainnointia, mitattiin hihnassa olevien vikojen aiheuttamaa muutosta anturisignaalisissa. Muutoksen voimakkuutta ja erottumista kohinan alta tutkittiin määrittelemällä signaali-kohina-suhde piikille, jonka vika anturin signaalisissa aiheutti. Kuten tahdistuksenkin yhteydessä, testit suoritettiin eri hihnan pyörimisnopeuksilla. Vikoina hihnassa olivat hiushalkeama sekä iskemä.

Hiushalkeama

Hihnasta oli tarkoitus havaita hihnan kulkusuuntaan nähden poikittaissuuntainen hiushalkeama. Hiushalkeaman pituus oli 30 mm ja ulottui koko hihnan paksuuden läpi. Hihnan ollessa suorana, halkeama oli vaikeasti paljaalla silmällä nähtävissä, sekä täysin tunnistamattomissa sormenpäällä hihnan pintaa kokeiltaessa. Kun hihna pyöritettiin sellaiseen asentoon, jossa halkeama oli telan kaarella, tuli halkeama paremmin esiin. Halkeama ”avautui”, jolloin se oli havaittavissa silmällä sekä tunnettavissa sormella. Halkeama ”sulkeutui” jälleen, kun hihna pyöritettiin sellaiseen asentoon, jossa se oli telojen välisellä, suoralla alueella. Halkeama sijaitsi hihnan keskialueella.

Iskemä

Hihnaan tehtiin myös iskemä, jonka tunnistamista testattiin eri antureilla. Iskemä tehtiin hihnan pintaan ennalta suunniteltuun kohtaan, jolloin sen paikka pystyttiin merkkamaan tarkasti. Iskemä oli juuri ja juuri tunnettavissa hihnan pinnasta, ja sen korkeudeksi mitattiin heittokellolla 0,32 mm. Mittaus heittokellolla suoritettiin testilaitteen ollessa pysähdyksissä ja hihnan ollessa paikoillaan.

7.3.1 Pyörrevirta-anturi

Pyörrevirta-anturilla pyritään havaitsemaan hihnassa olevien vikojen aiheuttama muutos pyörrevirtojen syntymisessä ja kulussa. Hiushalkeaman tapauksessa pyörrevirtoihin vaikuttaa terävä epäjatkuvuuskohta johteessa, kun taas iskemän tapauksessa virtojen syntyyn vaikuttaa anturin ja kohteen etäisyyden muutos.

Anturit ja niiden liittäminen mittauslaitteistoon

Antureina testeissä toimi samat induktiiviset lähestymiskytkimet IA5034 ja IF6031, joita käytettiin myös tahdistuksen mittauksen yhteydessä. Anturit myös liitettiin muuhun mittauslaitteistoon samalla tavoin, kuin tahdistuksen mittauksia tehdessä. Pyörrevirta-anturit, sekä niiden liittäminen esiteltiin tarkemmin luvussa 7.2 *Tahdistuksen mittaus*.

Anturien asennus

Hiushalkeamaan liittyvät mittaukset suoritettiin kahdesta eri hihnan asennosta; telan kaarelta kohdasta, jossa hihana myötäilee telan pintaa (kuva 48. a-kohta), sekä kohdasta, jossa hihna on vapaasti suorana telojen välissä (kuva 48. b-kohta). Näin saadaan selville, miten halkeaman ”avautuminen” vaikuttaa havainnointiin ja mittauksien tulokseen. Hihnan ollessa suorana, halkeama on koko pituudeltaan puristunut umpeen. Sivuttaissuunnassa hihnan kulkusuuntaan nähden anturi asennettiin suoraan halkeaman yläpuolelle, noin toimintaetäisyyden puolivälin päähän hihnan pinnasta. Anturi asennettiin myös siten, että se oli kohtisuorassa hihnan pintaan nähden.

Iskemää mitattaessa anturi asennettiin laitteen päähän telan kaarelle. Kuten halkeamankin mittauksissa, etäisyydeksi anturin ja hihnan pinnan välille asetettiin anturin toimintaetäisyyden puoliväli. Sivuttaissuunnassa hihnan kulkusuuntaan nähden mittaukset suoritettiin kahdesta eri paikasta. Ensimmäinen mittaus suoritettiin suoraan iskemän pitkittäissuuntaisen kulkureitin yläpuolelta. Toinen mittaus suoritettiin siirtämällä anturia pois iskemän yläpuolelta sivuun noin anturin halkaisijan verran. IF6031:n tapauksessa sivuttaissiirto oli 15 mm ja IA5034:n tapauksessa 20 mm. Anturi asennettiin kohtisuoraan hihnan pintaan nähden, kuten hiushalkeamankin mittauksissa.

Mittaus

Mittaukset suoritettiin molemmille antureille, yksi anturi kerrallaan. Hiushalkeama mitattiin ensin telan kaarelta, jonka jälkeen anturi asennettiin hihnan suoralle osuudelle, jossa mittaus toistettiin. Halkeaman mittauksen jälkeen suoritettiin iskemän mittaus suoraan sen yläpuolelta sekä sivuttaispoikkeutuksen kanssa. Hihnan pyörimisnopeuksien ja signaalin tallennuksen suhteen mittaus toistettiin tahdistuksen mittauksen tapaan (Luku 7.2 *Tahdistuksen mittaus*).

7.3.2 Mikrofoni

Mikrofoneilla tehtävissä testeissä pyritään mittaamaan vian aiheuttama ääni sen osuessa pellin pintaa myötäilevään kaavariin. Pyörivässä hihnassa oleva halkeama tai iskemä aiheuttaa kaavariin osuessa terän hypähtämisen tai tökkäämisen, joka synnyttää mitattavan äänen.

Anturit

Testeihin valittiin kaksi eri mikrofoni tekniikkaan perustuvaa mikrofonia; dynaaminen mikrofoni sekä elektreettimikrofoni. Mikrofonikapselit (kuva 51) hankittiin elektroniikkakomponentteja myyvistä Partco Oy:stä sekä Radioduo Oy. Kapselit eroavat toisistaan toteutustekniikkansa lisäksi myös ominaisuuksiltaan. Dynaamisen mikrofoni kapselin taajuusalue on huomattavasti kapeampi kuin elektreettimikrofoni kapselin. Myöskään dynaamisen mikrofoniin herkkyys ei yllä samoihin lukuihin kuin elektreettimikrofoniin. Mikrofonikapselien tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 7 (s. 72).

Mikrofonikapseleiden napoihin juotettiin koaksiaalikaapelin johtimet. Kaapelin toiseen päähän liitettiin juottamalla BNC-liittimet. Rungoksi rakennetuille mikrofoneille valittiin sopivan halkaisijan omaavaa metalliputki, jonka toiseen



Kuva 51. Vasemmalla mikrofonikapselit; dynaaminen (ylhäällä) ja elektreetti (alla). Oikealla rakennetut mikrofonit; dynaaminen (ylhäällä) ja elektreetti (alla).

päähän kiinnitettiin mikrofoni kapseli ja toiseen BNC-liitin (kuva 51). BNC-liittimet valittiin, koska ne soveltuvat hyvin käytettäväksi ohuiden koaksiaalikaapeleiden kanssa. Myös niiden helppo liitettävyyden mittalaitteiden kanssa vaikutti päätökseen.

Esivahvistin

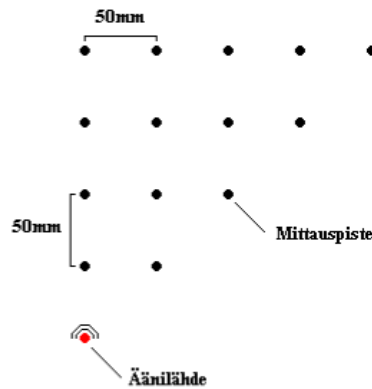
Esivahvistin rakennettiin viitteessä [27] esitetyn mallin mukaisesti. Vahvistimessa oleviin mikrofonisääntuloihin liitettiin BNC-liittimet liitäntöjen tekemisen helpottamiseksi. Myös vahvistimen ulostuloon laitettiin BNC-liitin, jotta vahvistimen liittäminen mittalaitteeseen olisi mahdollisimman helppoa ja nopeaa. Vahvistin asennettiin muovikoteloon niin, että liittimet pystyttiin asentamaan kotelon runkoon pinta-asennuksena. Virtalähteenä vahvistimelle toimi 9V patteri, joka sijoitettiin muovikotelon sisään.

Anturin ja vahvistimen liittäminen mittauslaitteistoon

Mikrofonit liitettiin koaksiaalikaapelilla esivahvistimeen. Kaapelina käytettiin mahdollisimman lyhyttä, noin 45 cm pituista kaapelia, jotta mahdolliset kytkeytyvät häiriöt saataisiin mahdollisimman pieniksi. Vahvistin liitettiin mittauslaitteeseen myös koaksiaalikaapelilla, mutta nyt pystyttiin käyttämään pitempää kaapelia. Vahvistimessa oli eri sisääntulot riippuen siitä oliko kyseessä dynaaminen mikrofoni vai elektreettimikrofoni. Ulostuloja vahvistimesta oli vain yksi, joten se pystyttiin liittämään koko testien ajaksi mittalaitteeseen BNC-kaapelilla.

Taulukko 7. Dynaamisen ja elektreettimikrofonin tärkeimmät ominaisuudet.

Ominaisuus	Dynaaminen	Elektreetti
Impedanssi [Ω]	200	2000
Taajuusalue [Hz]	100-10000	20-20000 ($\pm 2\text{dB}$)
Herkkyys [mV/Pa(1kHz)]	1	6 ($\pm 4\text{dB}$)
Mitat $\varnothing \times K$ [mm]	23 x 11,5	6 x 5,8



Kuva 52. Mikrofonin mittauspisteet äänilähteeseen nähden.

Anturin ja kaavarin asennus

Kaavari asennettiin testilaitteen toiseen päähän, jossa hihna myötäilee telaa siten, että se tuli tiukasti hihnan pintaan kiinni. Kaavari asennettiin sellaiseen kulmaan hihnan pintaan nähden, että se vastasi mahdollisimman tarkasti tuotantolaitteessa olevaa kaavarin asemaa. Sivuttaissuunnassa kaavari asennettiin niin, että tutkittava vika hihnassa (halkeama tai iskemä) kulki varmasti kaavari kohdalla.

Mikrofoni asetettiin aluksi eri etäisyyksien päähän hihnassa olevan vian ja kaavarin kosketuskohdasta. Ensimmäisenä etäisyytenä käytettiin 50 mm, jonka jälkeen etäisyyttä kasvatettiin 50 mm välein. Kun mittauksia oli tehty tarpeeksi monella etäisyyden arvolla, alettiin mikrofonia siirtää sivuttaissuunnassa vian ja kaavariin kosketuskohdasta nähden. Myös sivuttaissuunnassa tehdyt siirrot tehtiin 50 mm välein. Mittauspisteiden paikat on esitetty kuvassa 52. Sivuttaissuunnassa tehdystä siirrosta huolimatta mikrofoni oli asennettu siten, että se osoitti kohtisuorasti hihnaa kohden, eikä suoraan äänilähdettä kohti.

Mittaus

Muista testeistä poiketen, testeissä käytettiin testilaitteen pyörimisnopeuksia 2 ja 4, jolla tehtiin kaikki mikrofoneihin liittyvät mittaukset. Kaavari asennettiin aluksi halkeaman pyörimisreitille, jossa mittaukset tehtiin edellä mainitulla tavalla eri paikoista. Tämän jälkeen kaavari siirrettiin iskemän kohdalle ja mittaukset toistettiin. Mittaukset suoritettiin molemmille mikrofoneille samalla tavalla, yksi mikrofoni kerrallaan. Mittauslaitteina toimivat, kuten edellisissäkin mittauksissa, Dewetronin loggeri sekä tietokoneeseen asennettu DASyLab ohjelmisto.

7.4 Tuotantolaitteen tahdistus

Laboratoriotestien tulosten perusteella päätettiin pyörrevirta-anturia testata tuotantokoneessa tahdistuksen mittaamiseen. Pyörrevirta-anturiin päädyttiin siitä syystä, että sen toteuttaminen tuntui yksinkertaisimmalta lyhyellä aikavälillä. Lisäksi

toimiessaan se olisi suoraan liitettävissä nykyiseen kunnonvalvonta järjestelmään. Anturin asennus ei tarvinnut muuta, kuin telineen suunnittelun ja asennuksen, sekä johtimien vetämisen sähkökaapille. Hihnalle ei tarvinnut tehdä mitään ylimääräisiä toimenpiteitä. Tuotantokoneen ominaisuuksia on esitelty kappaleessa 3. *Hihnakalanteri.*

Tuotantokoneessa oli joitain eroavaisuuksia laboratoriossa olevaan testilaitteeseen hihnaan sekä mittaukseen liittyvissä asioissa. Ensinnäkin koneessa oleva metallihihna oli ohuempaa, noin 0,8 mm paksua (testilaitte: 1,2 mm). Muilta ominaisuuksiltaan hihna vastasi testilaitteessa käytettyä hihnaa. Toiseksi mittausolosuhteet tuotantokoneella olivat vaikeammat verrattuna laboratorio-olosuhteisiin. Korkeampi lämpötila sekä ilman suhteellinen kosteus tuotantokoneella vaativat anturilta parempaa suojausta. Anturi oli kuitenkin alkujaan valittu kestämiään vaativia olosuhteita.

Anturiksi valittiin laboratoriotesteissä käytetyistä pyörrevirta-antureista herkempi ja halkaisijaltaan pienempi. Ainoana erona oli se, että anturiksi valittiin IF6031:n sijaan saman valmistajan IF6030. Antureilla ei ole muuta ero kuin se, että testikoneella käytetyn IF6031:n analogialähtö on jännite, kun taas tuotantokoneella käytetyllä anturilla IF6030 analogialähtö on virta. Vaihto suoritettiin siitä syystä, että virtalähdöllä varustettu anturi on helpommin liitettävissä jo olemassa olevaan Sensodec 6S järjestelmään. IF6030:n herkkyys on 4,44 mA/mm.

Hitsausauma

Testilaitteen hihnasta poiketen, tuotantokoneen hihnan hitsisaumojen lukumäärä on 8. Näistä saumoista 7 on erillisten hihnan palojen yhdistämiseen toisiinsa, ja 8., viimeinen ”pääsauma”, on hihnan päättymättömäksi tekevä. Hitsaustekniikaltaan saumat ovat samanlaiset ja samoin vaatimuksin tehdyt kuin testilaitteen hihnassa.

Anturin asennus

Anturi asennettiin kuten testilaitteessakin kohtaan, jossa hihna myötäilee telaa. Tällä sijoituksella varmistutaan siitä, että hihna pysyy koko ajan samalla etäisyydellä anturista eikä lähde värähtelemään. Anturin etäisyydeksi hihnan pinnasta asetettiin noin 2,5 mm, joka on noin puolessa välissä anturin toimintaetäisyyttä. Anturi itsessään asennettiin varta vasten suunniteltuun kannattimeen, mikä asennettiin tukevasti tuotantokoneen aluslaattaan.

Anturin käyttöjännite, maa ja ulostulosignaali vedettiin anturin asennuspaikalta alaseamalle 3-napaisella kaapelilla noin 10 metrin matka. Käyttöjännite otettiin alaseamalla olevalta jännitelähteeltä, jonka syöttöjännitteen arvo oli +24VDC.

Mittaus

Pyörrevirta-anturin signaalia tutkittiin ala-asemalta käsin. Jotta anturin ulostulo olisi helpommin mitattavissa, muunnettiin virtatieto jännitetiedoksi. Tämä tehtiin kytkemällä ulostulo vastuksen kautta maahan ja mittaamalla tämän vastuksen yli oleva jännite. Vastuksen arvoksi valittiin $500\ \Omega$, jolloin analoginen virtalähtö välillä $4 - 20\ \text{mA}$ muuttui analogiseksi jännitelähdöksi, jonka väli oli $2 - 10\ \text{V}$.

Signaalijännite kytkettiin BNC-kaapelilla Dewetronin loggerin sisääntuloon ja tallennettiin DASyLab ohjelmalla tietokoneen muistiin.

8. TULOKSET

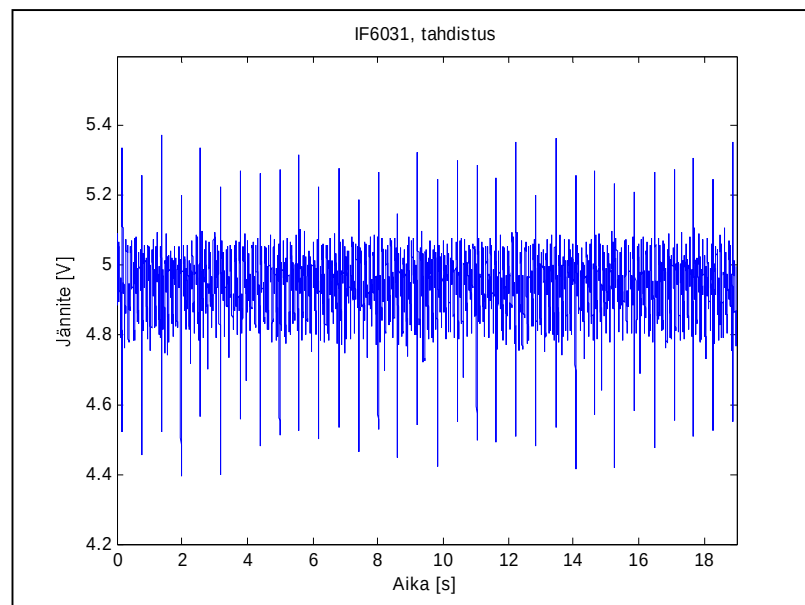
Tulokset on saatu Matlab ohjelmistoa käyttämällä. Ohjelmisto käytettiin DASYLab:llä tallennetun signaalin esittämiseen sekä muokkaamiseen, koska Matlab omaa tarkemmin määriteltävissä olevat signaalinkäsittelytyökalut.

8.1 Tahdistus

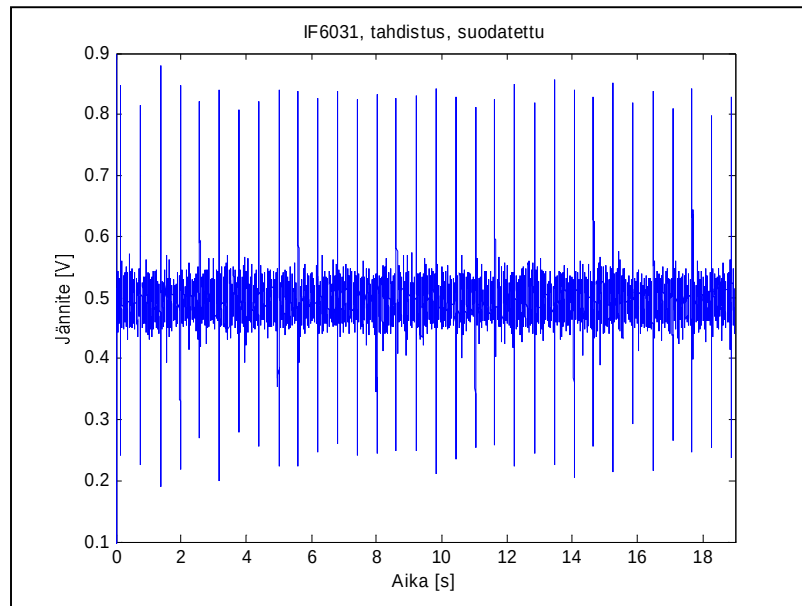
8.1.1 Signaalin piikkien esiintymistaajuuden keskihajonta

Kuvassa 53 näkyy esimerkki pyörrevirta-anturi IF6031:llä saadusta signaalista. Mittaus on tehty testilaitteen nopeudella 2, ja signaalista pystytään selvästi erottamaan hitsaussauman aiheuttamat muutokset. Piikkien esiintymisajat selvitettiin signaalista, jonka jälkeen pystyttiin määrittelemään aika, joka kuluu kahden peräkkäisen piikin välillä. Kun aikaväli saatiin selville, pystyttiin tästä ajasta laskemaan piikeille esiintymistaajuus ottamalla ajan käänteisluku. Taajuuksille, joita laskettiin 19 sekunnin aikana tululleille piikeille, laskettiin keskiarvo, jota pidettiin esiintymistaajuuden lopputuloksena. Taajuudelle määriteltiin myös keskihajonta tulosjoukosta, jotta saataisiin selville taajuuden toistuvuuden virhe. Taajuuden virheen suuruus on tärkeä tekijä onnistuneen keskiarvoistamisen kannalta. Jotta keskiarvoistaminen onnistuisi halutusti, on virheen oltava mahdollisimman pieni.

Signaaleja tutkiessa lähemmin huomataan, että niissä tapahtuu matalataajuisia huojuntaa. Myös spektriä tutkimalla huomataan matalilla taajuuksilla sijaitsevia voimakkaita komponentteja. Signaalien matalataajuisien komponenttien sekä kohinan suodattamiseen käytettiin 6-asteen Chebyshev II-tyypin yli- tai kaistanpäästösuodinta (taulukko 8, s. 77). Kuvassa 54 on esitetty edellä esitetyn



Kuva 53. Pyörrevirta-anturi IF6031:llä saatu tahdistuksen signaali.



Kuva 54. IF6031:llä saadun signaalin suodatus.

signaalin suodatettu tulos. Suodattimen estokaistan rajataajuus oli 100 Hz. Suodatetussa signaalissa huomataan kohinan selvää vähentymistä.

Taajuuden keskiarvon ja keskihajonnan määrittelyn lisäksi pulssien esiintymistaajuudesta laskettiin hihnan nopeus kullakin eri testilaitteen nopeussäädöllä. Nopeudelle saatiin arvo käyttämällä kaavaa 4.3, jossa kierrostaajuutena käytettiin mittauksissa saatua taajuuden keskiarvoa ja hihnan pituutena kappaleessa 8.1 Koejärjestelyt mainittua 5 metrin pituutta. Testilaitteen nopeuden säädöille 2, 4, 6 ja 8 saatiin taulukon 9 osoittamat nopeudet kaikilla antureilla. Taulukkoon on laskettu nopeudelle myös arvo yksikössä m/min, sillä sen käyttö on vakiintunut paperiteollisuudessa ilmaisemaan radan nopeutta. Tuloksista nähdään, että nopeudensäädin on lineaarinen.

Taulukko 8. Käytettyjen suotimien rajataajuudet.

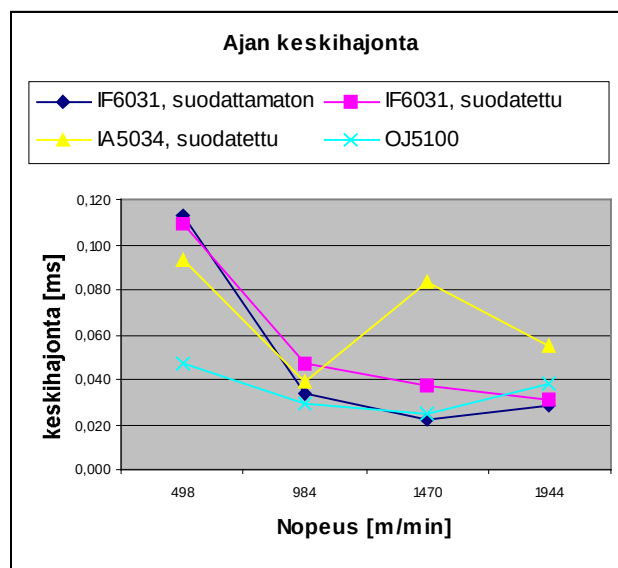
Nopeus	IF6031 kanssa käytetyn ylipäästösuoitimen rajataajuus [Hz]	IA5034 kanssa käytetyn kaistanpäästösuoitimen rajataajuudet [Hz]
2	100	100-800
4	200	200-1700
6	300	250-2200
8	350	350-2400

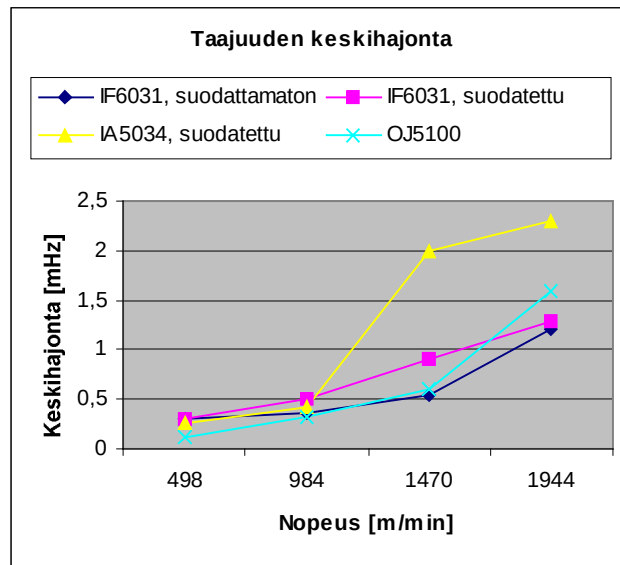
Taulukko 9. Testilaitteen hihnan pyöritysnopeudet.

Testilaitteen nopeussäätö	Nopeus [m/s]	Nopeus [m/min]
2	8,3	498
4	16,4	984
6	24,5	1470
8	32,4	1944

Pyörrevirta-antureille sauman aiheuttaman piikin katsottiin esiintyvän ajallisesti siinä kohdassa, jossa se saavuttaa maksiminsa. Optisella anturilla piikin ajankohdaksi taas määriteltiin digitaalisen pulssin keskikohta. Muuten taajuus ja sen keskihajonta määriteltiin samoin pyörrevirta-antureille ja optiselle anturille.

Tuloksista kuvassa 56 huomataan, että taajuuden keskihajonta vaihtelee alle 0,5 mHz:stä vajaaseen 2,5 mHz anturista ja hihnan nopeudesta riippuen. Yleisesti nähdään, että nopeuden kasvu suurentaa keskihajontaa kaikkien anturien kohdalla. Nopeuden kasvaessa sauman vaikutusaika anturilla lyhenee, jolloin anturin hitaudesta johtuvan mahdollisen virheen suhteellinen koko kasvaa. Kasvu ei näytä olevan lineaarista vaan ennemminkin eksponentiaalista. Kuitenkin vasta nopeudella 1944 m/min keskihajonnan arvo nousee yleisesti yli 1 mHz, lukuun ottamatta IA5034, jolla tämä raja ylittyy jo nopeudella 1470 M/min.

**Kuva 55.** Ajan keskihajonnan tulokset eri antureilla.



Kuva 56. Taajuuden keskihajonnan tulokset eri antureilla.

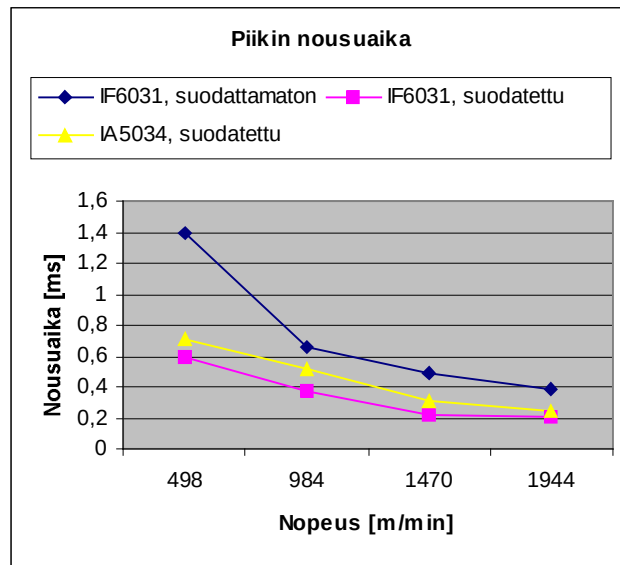
Pyörrevirta-antureista IF6031:n osalta on esitetty sekä suodattamattoman, että suodatetun signaalin tulokset. Toisen pyörrevirta-anturin, IA5034, osalta on kuvassa esitetty vain suodatetun signaalin tulokset, sillä raakasignaalista piikkien määrittäminen oli mahdotonta. Kohina estää pulssien näkymisen, joten kierrosaikaa ja -taajuutta ei pystytty määrittelemään kuten suodatetun signaalin kohdalla.

Alhaisilla nopeuksilla (nopeudet 498 ja 984 m/min) kaikkien anturien antama taajuuden keskihajonta on samaa luokkaa, eikä eroa niiden välillä ole merkitsevästi. Tarkimmaksi näillä alhaisilla nopeuksilla osoittautui optinen anturi OJ5100. Pyörrevirta-antureista yllättäen herkkyydeltään pienempi, IA5034 antoi tarkemman tuloksen, kuin IF6031. Nopeuden noustessa anturien tuloksiin alkoi syntyä selvempiä eroja. Pyörrevirta-antureista IF6031 selviytyi parhaiten nopeuden nostosta, ja antoi tarkimman tuloksen suurilla nopeuksilla. Nopeudella 1944 m/min keskihajonnan arvo oli noin puolet IA5034 vastaavasta. Optinen valokenno antoi tarkimman tuloksen nopeuteen 1470 m/min asti, jonka jälkeen nopeuden kasvaessa arvoon 1944 m/min, osoittautui pyörrevirta-anturi IF6031 parhaaksi.

Suodatuksen vaikutus keskihajontaan pystytään näkemään anturin IF6031 kohdalta. Suodatus näyttää lisäävän keskihajontaa, mutta sen nousu suhteessa nopeuden kasvuun ei ole yhtä jyrkkää. Nousu näyttää ennemminkin lineaariselta, kuin eksponentiaaliselta.

8.1.2 Signaalin piikkien nousuaika

Piikkien nousuaika määriteltiin niin, että määriteltiin aika, jossa pulssi nousee 10 %:n arvostaan 90 %:n arvoon. Nousuaika mitattiin monen piikin kohdalta, jonka jälkeen saaduista ajoista otettiin keskiarvo. Mittaus suoritettiin ainoastaan pyörrevirta-antureille, sillä niiden antama ulostulo on analoginen, kun taas optisella, jolle mittausta ei tehty, antaa ulos digitaalista pulssijonoa. Pyörrevirta-anturien osalta



Kuva 57. Piikkien nousuajat eri antureilla.

mittaus tehtiin IF6031:n suodattamattomalle sekä suodatetulle signaalille sekä IA5034 suodatetulle signaalille. IA5034:n suodattamattomasta signaalista piikkien erottaminen oli mahdotonta.

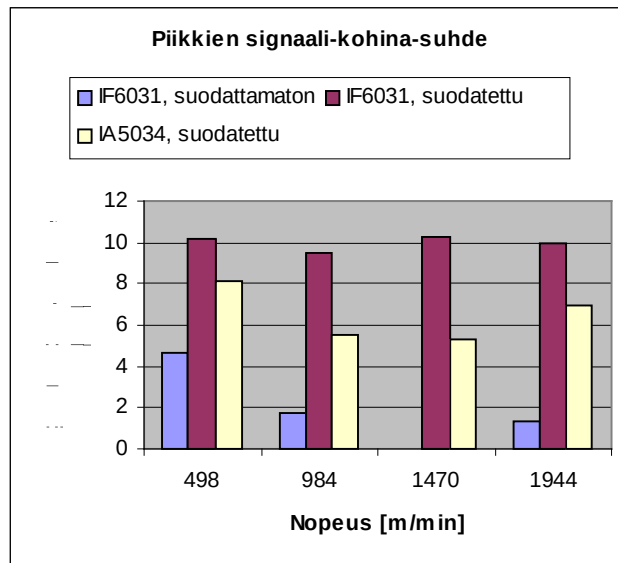
Saadut tulokset nousuaikojan osalta on esitetty kuvassa 57. Kuvasta nähdään, että piikin nousuaika vaihtelee välillä 0,2 – 1,4 ms. Hihnan nopeuden nostamisen huomataan oletetusti lyhentävän piikin nousuaikaa. Nousuaika näyttää lyhenevän nopeuden negatiiviseen potenssiin, jolloin nousuaika lyhenee nopeasti nopeuden kasvun alkuvaiheessa. Korkeilla nopeuksilla nousuajan lyhenemisestä tulee maltillisempaa.

Signaalin suodattaminen vaikuttaa piikin nousuaikaan selvästi. Nousuaika on selvästi lyhyempi suodatetulle signaalille, kuin suodattamattomalle. Hitailla nopeuksilla absoluuttinen ero millisekunneissa on suurempi kuin korkeilla nopeuksilla, mutta suhteellinen piikin nousuajan lyheneminen pysyy noin 40 – 60 prosentin suuruisena.

8.1.3 Signaalin piikkien signaali-kohina-suhde

Piikkien signaali-kohina-suhteen määrittelyä varten signaalista laskettiin esiintyvien piikkien huippuarvojen keskiarvo. Tämän lisäksi määriteltiin koko signaalin keskiarvo, jotta saataisiin selville signaalin nollataso. Nämä arvot laskettiin käyttämällä Matlab-ohjelmaa. Signaalissa esiintyvä kohina sen sijaan määriteltiin kuvista, koska sen määrittely näin oli paljon helpompaa. Näistä arvoista laskettiin signaali-kohina-suhde. Eri antureilla saaduista signaaleista määritellyt signaali-kohina-suhteet on esitetty kuvassa 58.

IF6031:n raakasignaalista laskettu signaali-kohina-suhde näyttää heikentyvän arvosta 4,6 dB arvoon 1,4 dB hihnan nopeuden kasvaessa. Nopeudella 1470 m/min saadaan



Kuva 58. Piikkien signaali-kohina-suhteet eri antureille.

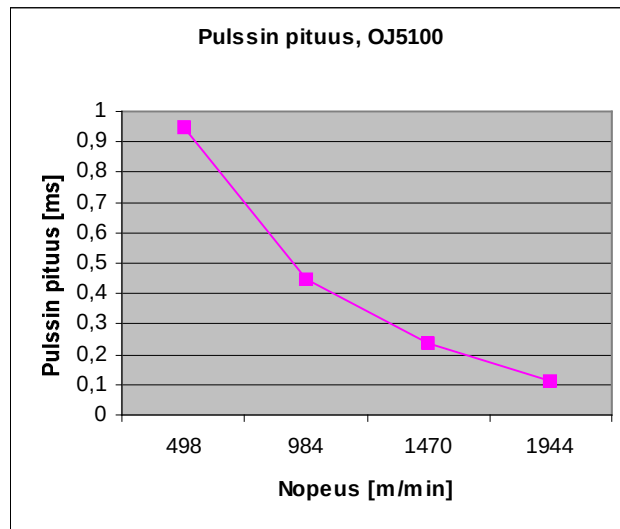
muihin tuloksiin nähden outo poikkeama; signaali-kohina-suhde tippuu alle nollan. Tämä saattaa johtua kyseisellä nopeudella tapahtuvasta laitteiston kasvaneesta tärinästä, jonka aiheuttaa hihnan liikkeestä ja värähtelystä aiheutuva resonointi laitteen teloissa ja rungossa.

Signaali-kohina-suhteen havaitaan paranevan oletetusti signaalin suodattamisen ansiosta. Anturilla IF6031 havaitaan signaali-kohina-suhteen nousevan noin 10 dB:in, jolloin arvo nousee nopeudesta riippuen 5,4 – 8,6 dB. Signaali-kohina-suhde näyttää pysyvän tällä noin 10 dB:n tasolla nopeuden nostamisesta huolimatta. Nopeuden nostaminen ei siis näytä vaikuttavan signaali-kohina-suhteeseen suodatetun signaalin osalta samalla tavoin, kuin suodattamattoman signaalin tapauksessa. Anturin IA5034 osalta signaali-kohina-suhde pysyy matalampana, noin 6 dB:ssä. Pienemmästä arvostaan huolimatta signaali-kohina-suhde pysyy IF6031:n tapaan melko tasaisena koko nopeusalueella. Signaali-kohina-suhteen matalampaa tasoa voidaan selittää anturin huonommalla herkkyydellä.

8.1.4 Pulssin pituus

Optisen anturin OJ5100 ulostulo on digitaalinen pulssijono. Pulssit erottuivat selvästi nollatasosta, sillä niiden arvo on 10 V. Anturin ulostulon pulssijonosta määriteltiin kierrostaajuuden virheen lisäksi pulssin pituus. Pulssin pituus määriteltiin aikaväliksi, jona pulssi on 90 % tai enemmän maksimi-arvostaan. Koska mittauksissa anturin pulssien maksimi-arvo oli edellä mainittuun tapaan 10V, oli pulssinpituus aika, jona pulssin arvo oli 9 V tai enemmän.

Pulssin pituus vaihtelee noin 1 ms ja 0,1 ms välillä koko mitatulla nopeusalueella. Kuten kuvasta 59 nähdään, pulssin pituus kasvaa eksponentiaalisesti nopeuden laskiessa. Tämä pulssin pituuden kasvu hitailla nopeuksilla on tietysti odotettavaa,

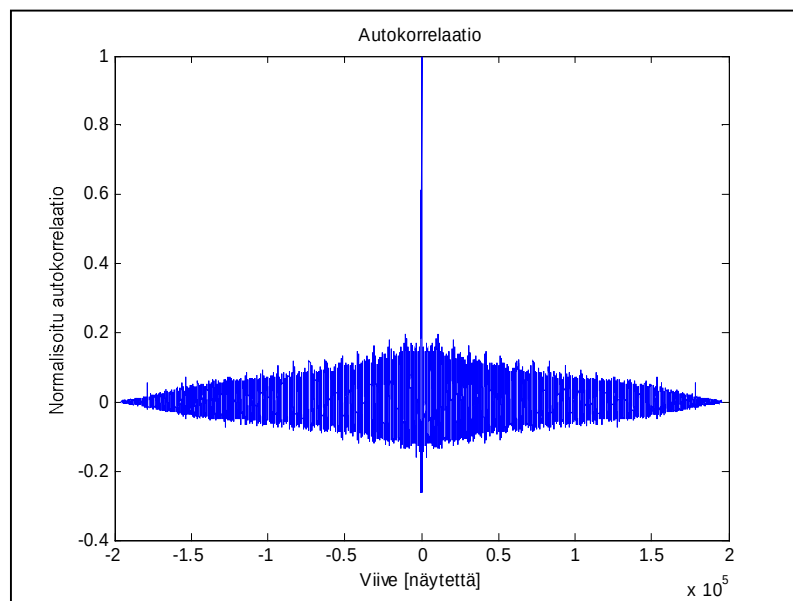


Kuva 59. Optisen anturin OJ5100 pulssin pituus.

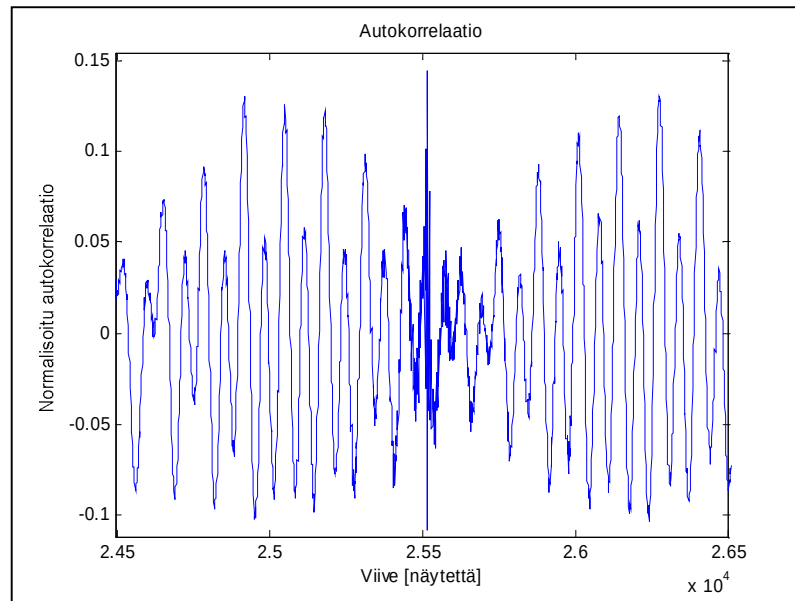
sillä hihnaan tehdyn mittauspisteen vaikutusaika optisella anturilla on pidempi nopeuden laskiessa.

8.1.5 Autokorrelaatio

Matlabilla lasketusta autokorrelaatiotuloksesta on esimerkki kuvassa 60. Esimerkin tapauksessa laskennallinen kierrostaajuus oli 0,77 Hz. Autokorrelaatiossa oli havaittavissa useita jaksollisesti esiintyviä maksimeja, ja noin 1000 (noin 20 Hz) ja 10000 (noin 2 Hz) näytteen välein esiintyi vahvimmat. Kun autokorrelaatiotulosta tarkasteltiin lähemmin viive alueella, jolla voitiin olettaa esiintyvän kierrostaajuuden



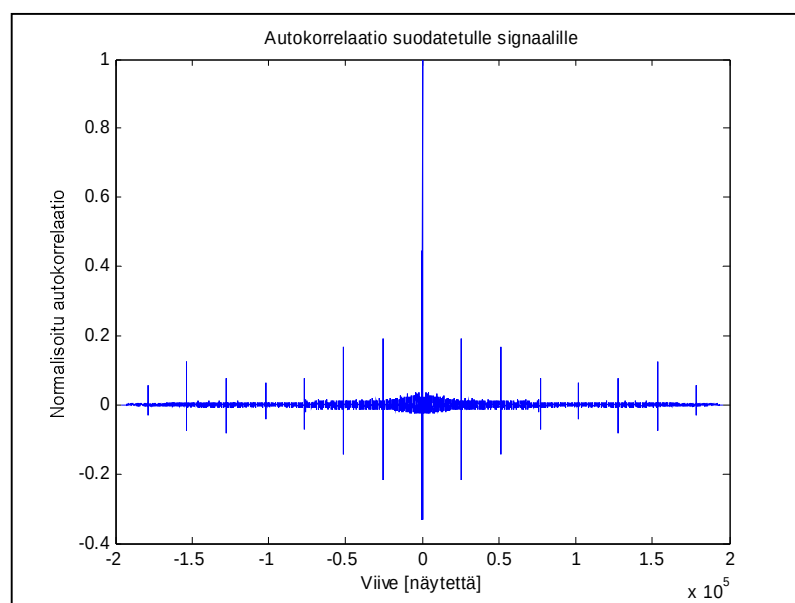
Kuva 60. Kaavarin värähtelyanturin ulostulo signaalin autokorrelaatio.



Kuva 61. Autokorrelaatio laskennallisen kierrostaajuuden määrämisen viivearvon läheisyydessä.

aiheuttama maksimi (noin 25500 näytteen viive), löydettiin kuvan 61 esittämä piikki. Viiveellä 25515 näytti esiintyvän selvästi erottuva muutos muuten tasaisesti vaihtelevassa autokorrelaatiotuloksessa. Tämä muutos näytti toistuvan aina noin 25515 näytteen välein, ja mitä pidemmälle viiveessä mentiin, sitä paremmin piikki erottui ”kohinan” alta.

Signaalia päätettiin suodattaa, jotta oletetun kierrostaajuuden aiheuttamat piikit saataisiin paremmin esiin. Signaalia suodatettiin ylipäästösuodattimella, jonka rajataajuus oli 400 Hz. Tämän jälkeen autokorrelaatio laskettiin uudelleen. Tuloksena



Kuva 62. Suodatetun värähtelysignaalin autokorrelaatio.

oli kuva 62 esittämä autokorrelaatiotulos. Kuvasta nähdään selvästi erottuvat korkeat ja jyrkät piikit, jotka näyttävät esiintyvän tasavälein. Lähempi tutkiminen paljasti, että piikit esiintyivät täsmälleen samoilla viiveen arvoilla kuin suodattamattoman signaalin tapauksessa. Viiveen arvot, joilla piikit esiintyvät on esitetty taulukossa 10. Taulukossa on myös laskettuna kahden peräkkäisen piikin etäisyys näytteinä. Taulukon tuloksista nähdään, että piikit esiintyvät jaksollisesti muutaman näytteen tarkkuudella. Piikkien välin keskiarvoksi saatiin 25516,17 näytettä. Tämä muutettuna taajuudeksi vastaa 0,7685 Hz:ä.

Autokorrelaatio laskettiin viidelle eri signaalille, jotka oli tallennettu eri aikoina. Kaikki olivat 10 sekuntia pitkiä sekä niiden mittauskalustolla lasketut pyörimistaajuudet olivat toisistaan poikkeavia. Taulukkoon 11 on kerätty näiden signaalien pyörimistaajuudet. Autokorrelaatiolla saatu taajuus on laskettu viiveestä, joka on piikkien etäisyyksien keskiarvo.

Taulukon 11 (s.85) tuloksista nähdään, että virhe lasketun ja autokorrelaatiolla saadun pyörimistaajuuden välillä on noin 0,5 – 3 mHz. Pyörimistaajuuden suuruudella ei näytä olevan vaikutusta virheen suuruuteen.

Taulukko 10. Autokorrelaatiosta löydettyjen piikkien viiveet.

	Piikin paikka [viive]	Piikin etäisyys edelliseen [viive]
1. piikki	25515	
2. piikki	51031	25516
3. piikki	76550	25519
4. piikki	102065	25515
5. piikki	127581	25516
6. piikki	153096	25515
7. piikki	178612	25516

Taulukko 11. Eri signaalien laskennalliset sekä autokorrelaatiolla saadut pyörimistaajuuudet.

	Laskettu [Hz]	Autokorrelaatio [Hz]	Δf [mHz]
1. Signaali	0,66	0,658839	1,16
2. Signaali	0,46	0,457138	2,86
3. Signaali	0,77	0,768448	1,55
4. Signaali	0,75	0,750549	-0,55
5. Signaali	0,65	0,648957	1,04

8.2 Hiushalkeaman havainnointi

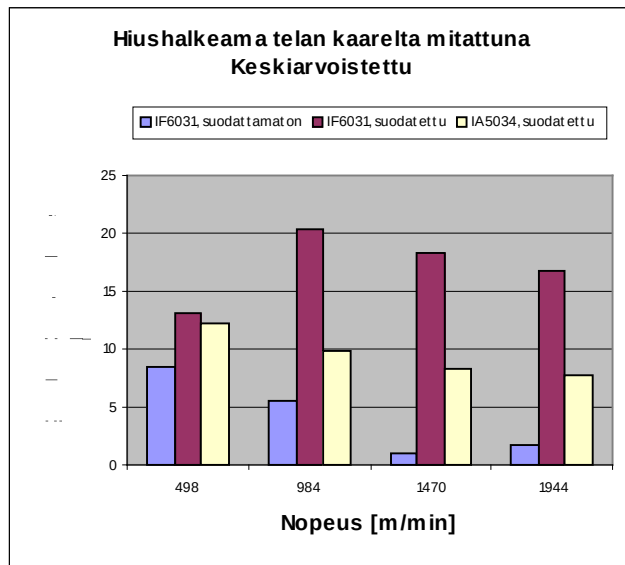
8.2.1 Pyörrevirta-anturit

Pyörrevirta-antureilla tehdyissä mittauksissa laskettiin halkeaman signaalissa aiheuttaman muutoksen signaali-kohina-suhde. Halkeaman aiheuttamien piikkien maksimiavot mitattiin 19 sekunnin ajalta ja niistä otettiin keskiarvo. Lisäksi mitattiin koko signaalin keskiarvo, kuten tahdistuksen mittauksessakin, jotta saatiin selville signaalin nollataso. Kohina määriteltiin jälleen kuvasta mittaamalla.

Pyörrevirta-anturi telan kaarella

Anturin IF6031 signaalista laskettu hiushalkeaman signaali-kohina-suhde oli varsin heikko, kuten kuvasta 63 voidaan nähdä. Halkeaman aiheuttama muutos signaalissa on niin pieni, että se jää varsin helposti kohinan alle, ja tätä kautta havaitsematta. Piikit olivat havaittavissa ainoastaan alhaisilla nopeuksilla 498 m/min ja 984 m/min. Suuremmilla nopeuksilla hiushalkeaman aiheuttamat muutokset eivät enää olleet havaittavissa kohinan alta. Pyörrevirta-antureista huonomman herkkyyden omaavan IA5034:n signaalista halkeaman aiheuttamaa muutosta ei ollut mahdollista havaita millään mittauksissa käytetyllä nopeudella.

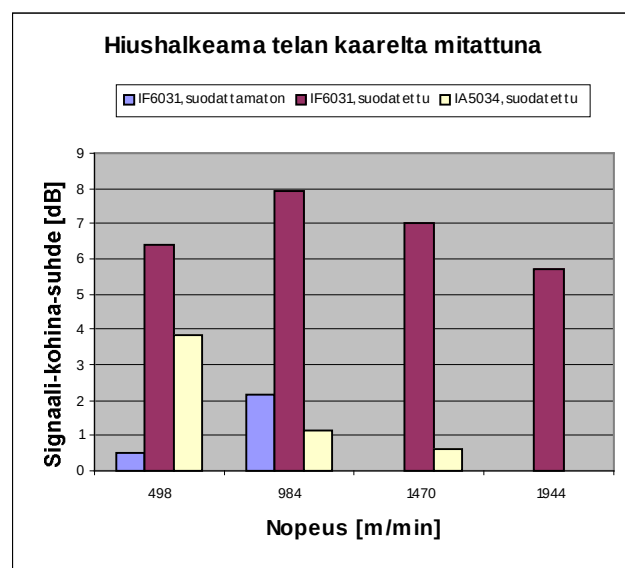
Suodatus osoittautui jälleen hyödylliseksi menetelmäksi piikkien löytämiseksi kohinan alta. IF6031:n tapauksessa signaali-kohina-suhde saatiin nousemaan 5 – 8 dB luokkaan nopeudesta riippuen (kuva 63). Nopeuden suhteen signaali-kohina-suhde saa maksiminsa nopeudella 984 m/min, jonka jälkeen nopeuden kasvaessa taso lähtee laskemaan. IA5034:n suodatetusta signaalista piikit saatiin näkyviin kohinan alta, vaikkakin varsin vaatimattomasti. Parhaimmillaankin signaali-kohina-suhde jää alle 4 dB:n. Nopeuden kasvu näyttää vaikuttavan IA5034 tapauksessa signaali-



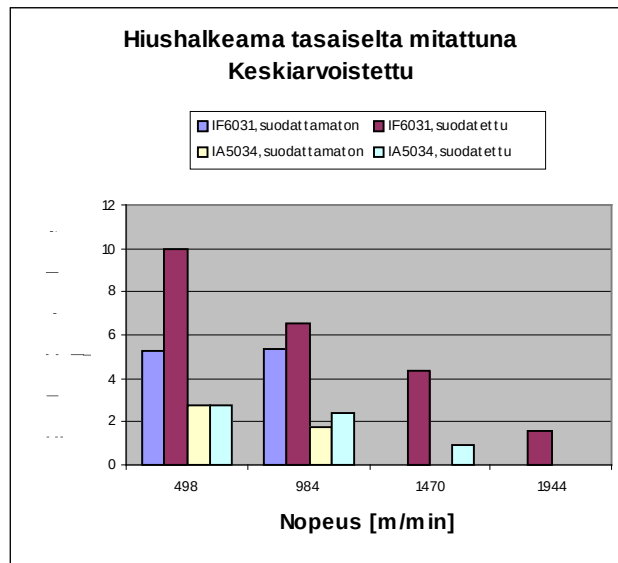
Kuva 64. Signaali-kohina-suhteet halkeaman aiheuttamalle muutokselle pyörrevirta-antureilla mitattuna telan kaarelta.

kohina-suhteeseen, sillä nopeudella 1470 m/min suhde tippui jo alle 1 dB ja nopeudella 1944 m/min tulosta ei saatu ollenkaan.

Hiushalkeaman signaalissa aiheuttaman muutoksen havaitsemisen helpottamiseksi mittaustiedolle tehtiin 30 kierroksen tahdistettu aikakeskiarvoistus. Keskiarvoistuksen tulokselle tehtiin samat mittaukset, kuin edellä mainituille keskiarvoistamattomille signaaleille. Kuvassa 64 nähdään keskiarvoistuksen vaikutus signaali-kohina-suhteisiin. IF6031:n suodattamattomasta signaalista pystytään keskiarvoistuksen ansiosta havaitsemaan halkeaman aiheuttama piikki jokaisella



Kuva 63. Signaali-kohina-suhteet halkeaman aiheuttamalle muutokselle pyörrevirta-antureilla.



Kuva 65. Signaali-kohina-suhteet halkeaman aiheuttamalle muutokselle pyörrevirta-antureilla tasaisella osuudella mitattuna.

käytetyllä nopeudella, joskin kahdella suurimmalla nopeudella taso laskee alle 2 dB:n. Alhaisilla nopeuksilla (498 ja 984 m/min) nähdään selvää signaali-kohina-suhteen paranemista verrattuna keskiarvoistamattomiin tuloksiin.

IF6031:n suodatetun signaalin keskiarvoistaminen nostaa signaali-kohina-suhdetta nopeudesta riippuen 6,7 – 12,5 dB:ä. Nopeudesta 984 m/min lähtien taso lähtee laskuun, kuten keskiarvoistamattomallakin signaalilla. Nopeuksilla 984 – 1944 m/min keskiarvoistamisesta aiheutuva tason nousu on hyvin tasaista; 11 – 12,5 dB verrattuna keskiarvoistamattomaan. Pyörrevirta-anturin IA5034 kohdalla huomataan myös signaali-kohina-suhteen paraneminen. Tason nousu on koko nopeusalueella 7,7 – 8,7 dB:n luokkaa. Nopeuden nousemisen suhteen tapahtuva tason heikkeneminen on samankaltaista kuin keskiarvoistamattomalla signaalilla.

Pyörrevirta-anturi hihnan tasaisella osuudella

Hiushalkeaman aiheuttamaa muutosta ei pystytty havaitsemaan kummankaan anturin suodattamattomasta tai suodatetusta signaalista hihnan suoralta osalta mitatessa. Halkeaman aiheuttama muutos oli niin olematon, että se jäi täysin kohinan alle peittoon. Mittaustiedolle tehtiin kuitenkin edellisen kappaleen tapaan 30 kierroksen tahdistettu aikakeskiarvoistus, jotta halkeaman aiheuttamat piikit olisi mitattavissa. Kuvassa 65 on esitetty keskiarvoistuksen tuloksena saadusta signaalista mitatut signaali-kohina-suhteet.

Suodattamattomille signaaleille tehdyistä keskiarvoistuksista saatiin tuloksia vain kahdelle alhaisimmalle nopeudelle. Näitä korkeammilla nopeuksilla ei 30 kierroksen keskiarvoistamisestakaan näyttänyt olevan hyötyä. Antureista herkempi IF6031

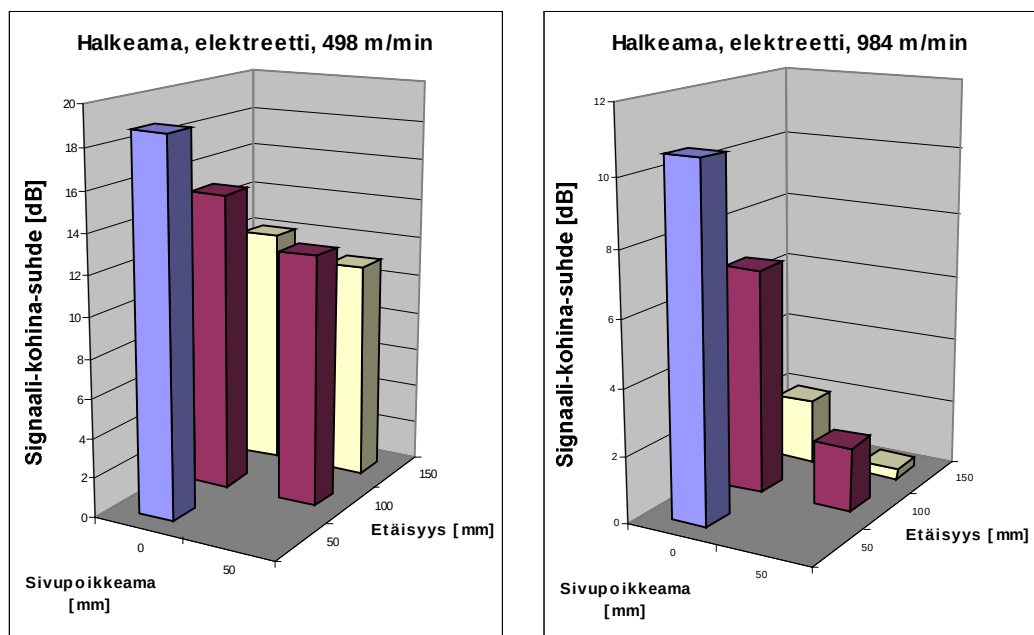
saavutti paremman signaali-kohina-suhteen, kuin IA5034. IF6031:llä päästiin vähän yli 5 dB tulokseen, kun taas IA5034:lla jäätettiin alle 3 dB:n.

Suodatetuista signaaleista tehdyt mittaukset osoittavat, että piikit ovat suodatuksin ansiosta havaittavissa myös korkeammilla nopeuksilla. Signaali-kohina-suhde kuitenkin laskee voimakkaasti nopeuden kasvaessa molemmilla antureilla. IA5034 kohdalla huomataan, että nopeuden 1470 m/min jälkeen ei mittaustuloksia enää saatu. IF6031:llä halkeaman piikit olivat mitattavissa kaikkialla käytetyillä nopeuksilla aina 1944 m/min asti, vaikkakin signaali-kohina-suhde laskee nopeudella 498 m/min saadusta noin 10 dB:stä alle 2 dB:n. IA5034:llä saadut tasot jäävät kaikki alle 3 dB:n.

8.2.2 Mikrofoni

Mikrofoneilla tehdyissä mittauksissa laskettiin halkeaman aiheuttaman piikin signaali-kohina-suhde. Mittaustiedosta laskettiin halkeaman aiheuttamien piikkien maksimien keskiarvo 19 sekunnin ajalta sekä koko signaalin nollataso. Kohina määriteltiin jälleen kuvasta. Ennen signaali-kohina-suhteiden mittausten suorittamista, signaaleja täytyi suodattaa, jotta piikit tulisivat näkyviin kohinan alta. Suotimena käytettiin 6.-asteen Chebyshev II-tyypin kaistanpäästösuodinta, jonka rajataajuuksiksi asetettiin 1500 ja 2200 Hz:ä.

Nopeudella 498 m/min saadut tulokset elektreettimikrofonille ja dynaamiselle mikrofoniin on esitetty kuvissa 66 ja 67. Kuvista nähdään selvästi kohteen ja mikrofoniin etäisyyden sekä sivupoikkeaman vaikutukset signaali-kohina-suhteisiin. Elektreettimikrofonilla 50 mm päässä kohteesta tehty mittaus saavuttaa hiukan

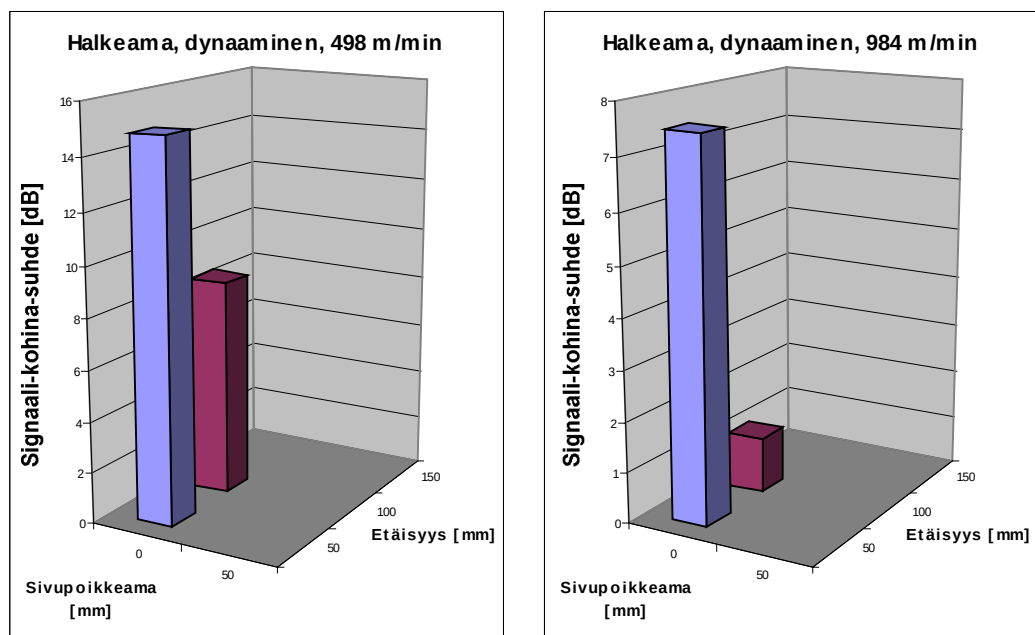


Kuva 66. Hiushalkeaman aiheuttaman äänen mittaus elektreettimikrofonilla.

vajaan 19 dB:n tason. Tästä arvosta taso pienenee tasaisesti etäisyyden kohteesta kasvaessa. Viimeinen etäisyys, jolla mittaustuloksia saatiin, oli 150 mm. Tällöin signaali-kohina-suhteen taso oli laskenut noin 12 dB:in. Sivuttaissuunnassa tehdyn 50 mm poikkeutuksen havaittiin vaikuttavan signaali-kohina-suhteen tasoon alentavasti noin 2 – 3 dB:n verran verrattuna poikkeuttamattomaan. Sivuun tehdyn poikkeutuksen ollessa 100 mm tai enemmän, eivät halkeaman aiheuttamat piikit olleet enää nähtävissä.

Dynaamisella mikrofonilla saaduista tuloksista pystytään näkemään, että se on huomattavasti epäherkempi sekä suuntaavampi kuin elektreettimikrofoni. Dynaamisella mikrofonilla ei yllätä 50 mm päässä kuin vajaan 15 dB:n tasoon. Etäisyyden kasvaessa 100 mm:iin, signaali-kohina-suhde on tippunut jo 8,5 dB. Tätä suuremmilla kohteen ja mikrofonin etäisyyksillä ei tuloksia enää saatu. Myös mikrofonin siirtäminen sivuttaissuunnassa aiheuttaa sen, että piikit katoavat mittauksen ulottumattomiin.

Hihnan pyörimisnopeuden kasvaessa arvoon 984 m/min, saadaan myös kuvien 66 - 67 esittämät tulokset. Tuloksista nähdään välittömästi, että nopeuden kasvattaminen aiheuttaa signaali-kohina-suhteiden selvää huononemista. Tämä selittyy suurimmaksi osaksi mittauksissa nähtävistä kohinatasojen selvästä noususta. Kohinan taso noin 2 - 3 kertaistuu nopeuden noustessa, joka selittyy testilaitteen käyntinopeuden nostosta aiheutuvasta taustamelun kasvusta. Tästä kohinan kasvusta johtuen, elektreettimikrofonin tasot laskevat kauttaaltaan 8 – 10 dB:ä, kun taas dynaamisella mikrofonilla tasojen lasku on luokkaa 7 – 7,5 dB:ä. Käytetyn kaistanpäästösuotimen rajataajuuksien muuttaminen ei auttanut asiaan. Voidaan siis olettaa, että tausta melu kasvaa leveällä taajuuskaistalla, mukaan lukien taajuuudet, joilla halkeaman aiheuttama ääni sijaitsee.



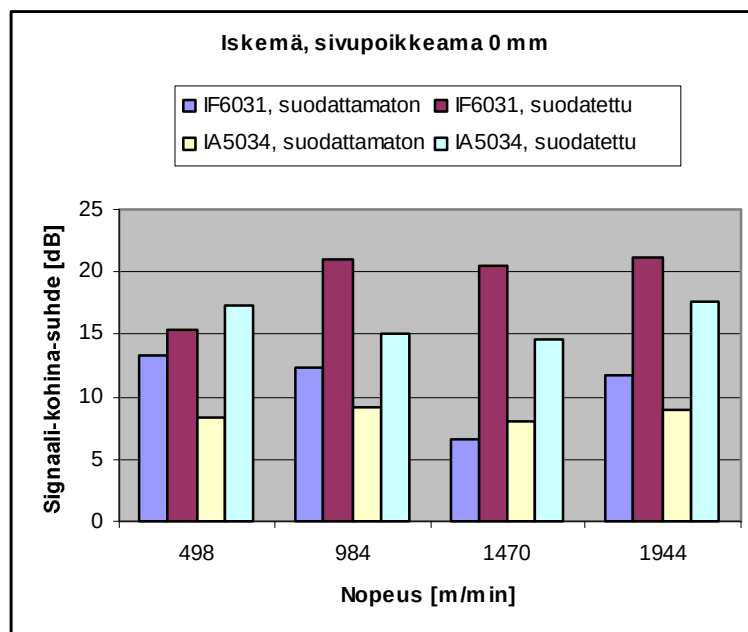
Kuva 67. Hiushalkeaman aiheuttaman äänen mittaus dynaamisella mikrofonilla.

8.3 Iskemän havainnointi

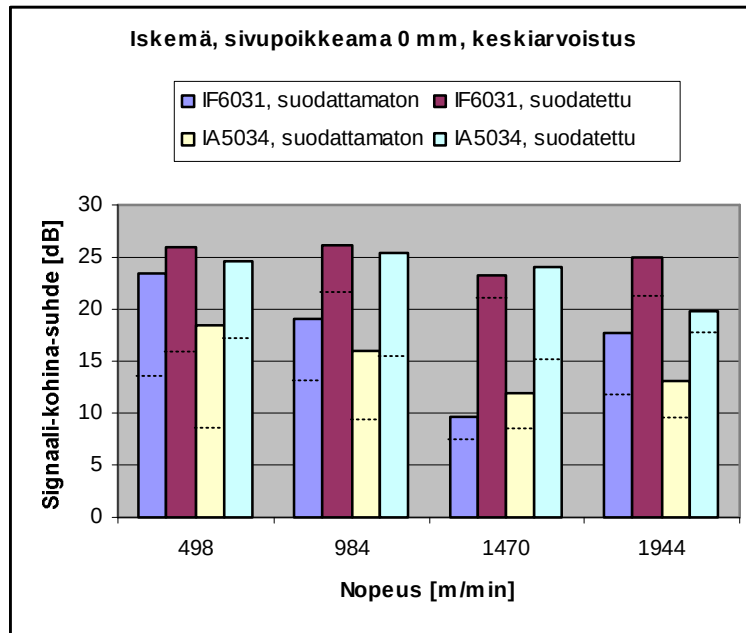
8.3.1 Pyörrevirta-anturit

Iskemän havainnointia antureilla tutkittiin laskemalla iskemän aiheuttaman muutoksen signaali-kohina-suhde. Iskemän aiheuttamista piikeistä laskettiin keskiarvo, jolloin saatiin laskuissa käytetty signaalin arvo. Kuvassa 68 on esitetty iskemän aiheuttaman muutoksen signaali-kohina-suhteet, kun anturi on hihnan pyörimissuuntaan nähden sivuttaissuunnassa asennettu iskemän kohdalle. Yleisesti nähdään, että iskemä on varsin helposti havaittavissa, sillä sen aiheuttaman muutoksen tasot ovat yli 6 dB luokkaa molemmilla antureilla kaikilla hihnan pyörimisnopeuksilla.

Suodattamattomien signaalien kohdalla huomataan, että herkempi IF6031 havaitsee paremmin hihnassa olevan iskemän. Sen tasot sijoittuvat välille 11,7 – 13,4 dB kaikilla nopeuksilla paitsi nopeudella 1470 m/min, jolla taso jää alle 7 dB:in. Tällä nopeudella jostain syystä signaali-kohina-suhde laskee noin puoleen muiden nopeuksien tasosta. Sama ilmiö huomattiin myös aikaisemmin mitattaessa tahdistussignaalin piikkejä, jolloin epäiltiin laitteen voimistunutta värähtelyä tällä nopeudella. Anturilla IA5034 tasot liikkuvat välillä 7,9 – 9,2, eikä selvää trendiä nopeuden suhteen ole havaittavissa.



Kuva 68. Iskemän aiheuttaman muutoksen mittaaminen pyörrevirta-antureilla.



Kuva 69. Signaali-kohina-suhteet mitattuna signaalille tehdystä 30 kierroksen keskiarvoistuksesta. Katkoviivalla on merkattu tasot, jotka saatiin ilman keskiarvoistusta.

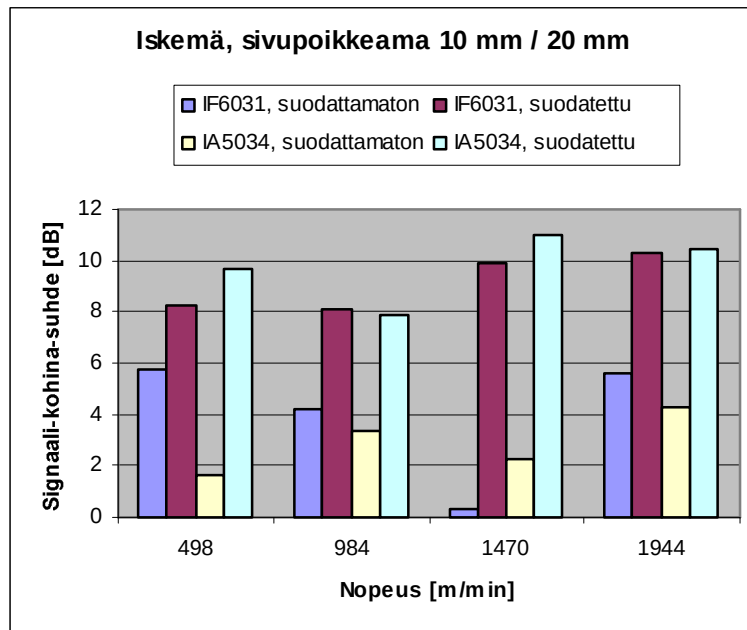
Signaalin suodattaminen parantaa IF6031:llä saatuja signaali-kohina-suhteita niin, että kaikilla muilla paitsi nopeudella 498 m/min (15,4 dB) päästään yli 20 dB:n. Korkeilla nopeuksilla taso näyttää pysyvän tasaisena, eikä laske nopeuden noustessa. IA5034 säilyttää myös tasonsa, eikä nopeuden nousu näytä aiheuttavan tason tippumista. Signaali-kohina-suhteet vaihtelevat välillä 14,6 – 17,6 dB:ä.

Kuten hiushalkeaman havaitsemisen yhteydessäkin, tehtiin iskemän mittauksissa 30 kierroksen tahdistettu aikakeskiarvoistus. Kuvassa 69 on keskiarvoistetuista signaaleista saadut signaali-kohina-suhteet. Kuvaan on merkattu vertailun vuoksi ilman keskiarvoistusta saadut tasot katkoviivalla. Tasot nousevat keskiarvoistuksen ansiosta molempien anturien, sekä kaikkien nopeuksien kohdalla. Korkeimmillaan päästään yli 25 dB:n arvoihin, ja kaikki tasot ovat noin 10 dB:stä ylöspäin.

Seuraavaksi anturia siirrettiin sivuttaissuunnassa sen halkaisijan verran, pois iskemän yläpuolelta. Saadut tulokset on esitetty kuvassa 70. Suodattamattomien signaalien osalta IF6031:n tasot jäivät kaikilla nopeuksilla alle 6 dB:n ja IA5034:llä 4 dB tai sen alle. Antureista IF6031:n signaali-kohina-suhteet osoittautuvat kaikilla nopeuksilla korkeammiksi, pois lukien nopeudella 1470 m/min tapahtuva poikkeus.

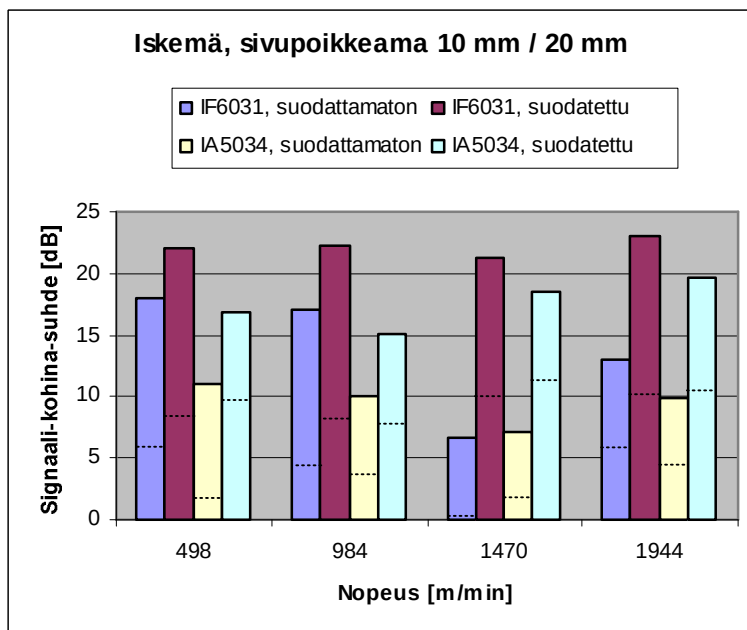
Suodatettujen signaalien tasot ovat kauttaaltaan korkeampia suodattamattomiin verrattuna. Molemmat anturit antavat hyvin samankaltaisia tuloksia toisiinsa nähden kaikilla nopeuksilla. Tasot vaihtelevat 8 ja 11 dB:n välillä, eikä selvää trendiä pyörimisnopeuden suhteen ole havaittavissa. Havaintona voidaan tehdä, että IA5034 saavuttaa paremman signaali-kohina-suhteen kaikilla paitsi nopeudella 984 m/min.

Keskiarvoistus tehtiin jälleen, ja sen vaikutukset nähdään kuvassa 71. Vertailun vuoksi ilman keskiarvoistusta saadut tasot on merkattu palkkeihin katkoviivalla.



Kuva 70. Sivusta mitattuna iskemän aiheuttaman muutoksen signaali-kohina-suhteet.

Signaali-kohina-suhteet paranevat noin 6 – 14 dB:ä IF6031:n tapauksessa ja noin 5 – 10 dB:ä IA5034:llä. Yleisesti tasot kuitenkin vaihtelevat melko rajusti; 5 dB:stä aina 23 dB:n asti.



Kuva 71. Signaali-kohina-suhteet 30 kierroksen keskiarvoistukselle. Katkoviivalla on merkattu tasot, jotka saatiin ilman keskiarvoistusta.

8.3.2 Mikrofoni

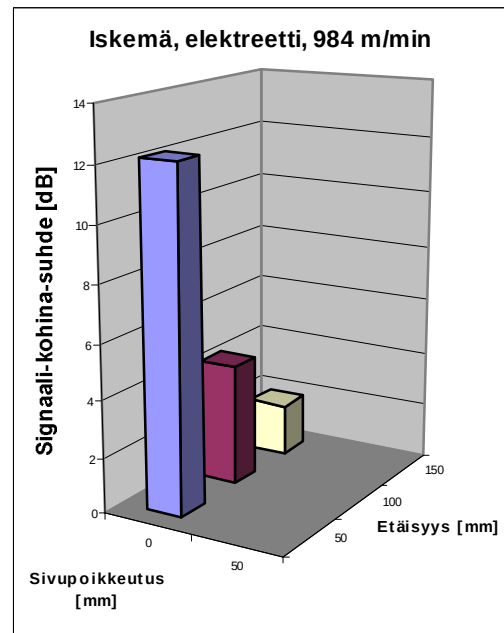
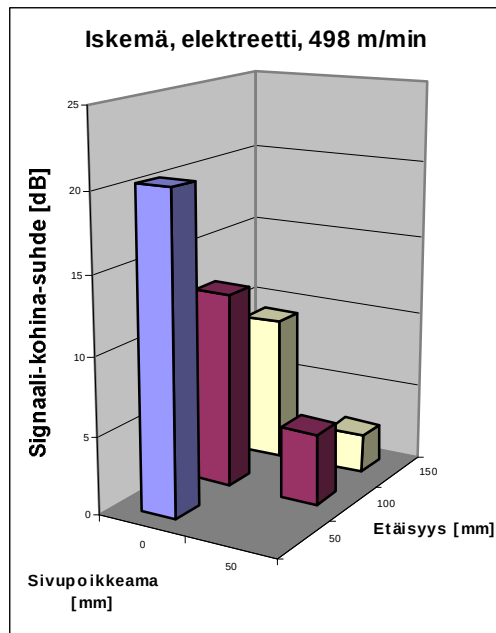
Mikrofoneilla mitattiin iskemän aiheuttaman muutoksen signaali-kohina-suhde nopeuksilla 498 m/min ja 984 m/min. Iskemän signaalissa aiheuttamien muutosten maksimit mitattiin ja niistä laskettiin keskiarvo. Näin saatiin signaalin arvo. Nollatasoksi määritettiin laskemalla koko signaalin keskiarvo. Kohina määriteltiin jälleen kuvasta mittaamalla. Kuvassa 72 ja 73 on esitetty elektreettimikrofonilla ja dynaamisella mikrofonilla tehtyjen signaali-kohina-suhdemittausten tulokset. Suotimena käytettiin samaa kaistanpäästösuodinta, kuin hiushalkeaman mittauksissa.

Elektreettimikrofonilla nopeudella 498 m/min saadut tulokset on esitetty kuvassa 72. Kuvasta havaitaan heti, että etäisyyden kasvattaminen kohteeseen huonontaa signaali-kohina-suhdetta merkittävästi. 50 mm päässä mitattu taso on 20 dB:ä. Tämän jälkeen signaali-kohina-suhde tippuu etäisyyden kasvaessa siten, että viimeinen tulos saadaan 150 mm päässä kohteesta. Tällöin taso on ehtinyt tippua jo alle 10 dB:n. Myös sivuttaissuunnassa tehty mikrofonin paikan vaihtaminen vaikuttaa mitattuihin tasoihin samalla tavalla, kuin halkeaman kohdallakin. Verrattuna suoraan edessä saatuihin tuloksiin, tasot tippuvat 7 – 8 dB:ä siirryttäessä 50 mm sivuun. 100 mm päässä ei tuloksia enää saatu.

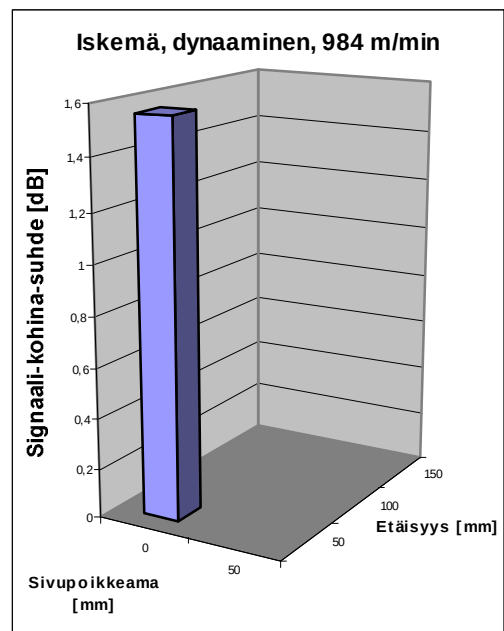
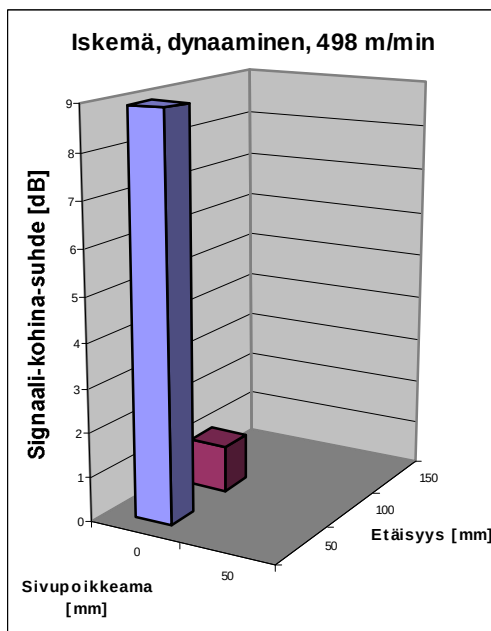
Dynaamisella mikrofonilla ei päästy taaskaan elektreettimikrofonin antamiin tasoihin. Tuloksia ei saatu kuin 50 mm ja 100 mm etäisyyksillä kohteesta. 50 mm päässä signaali-kohina-suhde jäi alle 10 dB:n ja 100 mm etäisyydellä taso painui jo alle 1 dB:in. Kuten hiushalkeaman mittauksissakin, sivuttaissuunnassa tapahtuva mikrofonin poikkeutus hävittää piikit näkyvistä kokonaan.

Nopeuden nostamisen jälkeen tehtyjen mittausten tulokset näkyvät myös kuvissa 72 ja 73. Testilaitteen käyntinopeuden nostaminen näyttää jälleen kasvattavan taustamelua, kuten halkeaman mittauksissakin. Kohinan kasvun takia signaali-kohina-suhteet tippuvat rajusti. Elektreettimikrofonilla tason lasku on 8 dB:n luokkaa kaikissa mittauspisteissä. Tämä johtaa siihen, että 50 mm:n sivuttaissuuntaisella poikkeutuksella tehdyissä mittauksissa, piikit häviävät kokonaan kohinan alle. Ilman poikittaissuunnassa tehtävää siirtoa saavutetaan signaali-kohina-suhteissa 50 mm päässä noin 12 dB:n taso, 100 mm päässä 4,5 dB:n taso ja 150 mm päässä noin 2 dB:n taso.

Dynaamisella mikrofonilla tasot tippuvat samalla tavalla nopeutta nostettaessa. Tästä syystä, ja siitä, että jo nopeudella 498 m/min tasot olivat melko heikkoja, johtuen mittauksissa ei saatu tulos kuin 50 mm päässä suoraan kohteen edestä. Tällöinkin taso on enää 1,5 dB:n tuntumassa, joka on 7,5 dB vähemmän kuin nopeudella 498 m/min.



Kuva 72. Iskemän aiheuttaman äänen mittaus elektreettimikrofonilla.



Kuva 73. Iskemän aiheuttaman äänen mittaus dynaamisella mikrofonilla.

8.4 Tuotantolaitteen mittaukset

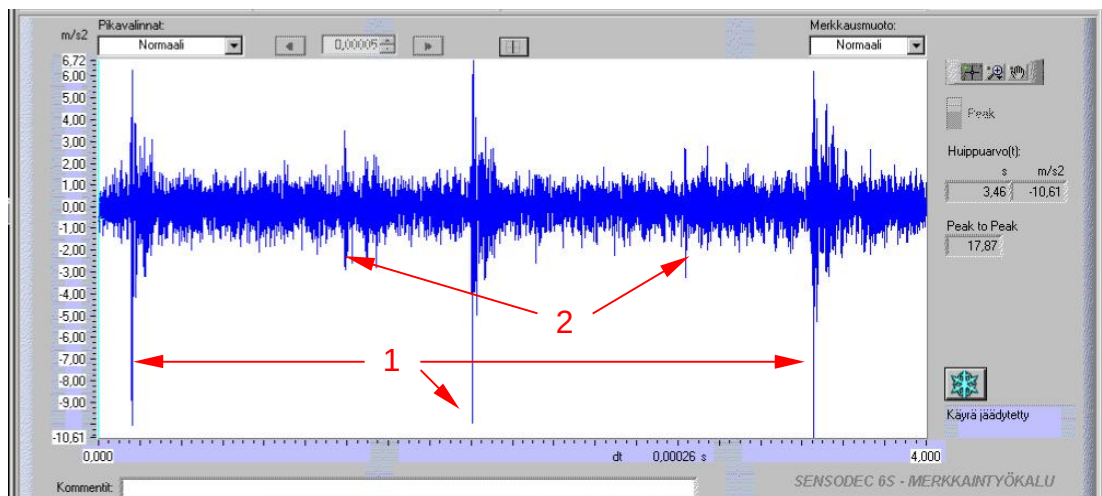
Tässä kappaleessa esitetyistä mittaustuloksista osion 8.4.1 *Nykyinen hihnan kunnonvalvonta* tulokset on saatu käyttämällä Sensodec 6S järjestelmää kaavarilla olevien värähtelyanturien signaalien tulkitsemiseen. Järjestelmä on päivittäisessä käytössä tuotantolaitteen yhteydessä.

8.4.1 Nykyinen hihnan kunnonvalvonta

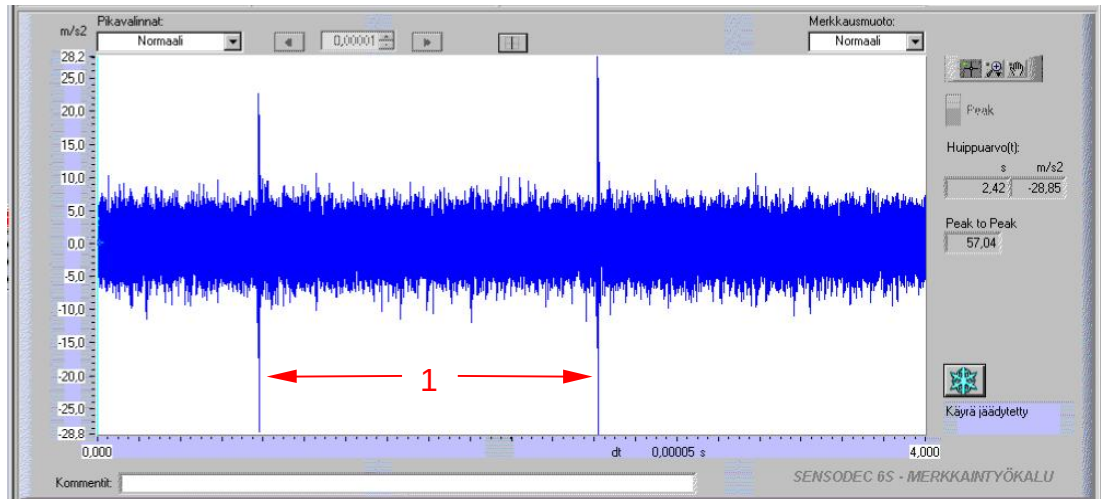
Kyseisien mittausten aikana hihnassa oli kolme kappaletta hiushalkeamia, jotka huomattiin koneen pysäytyksen jälkeen hihnan tutkinnan aikana. Halkeamien koot ja sijainnit on lueteltu taulukossa 12 (sivu 91).

Kuvassa 74 on esitetty 4 sekunnin mittainen ajanjakso signaalia joka on saatu kaavaripalkin hoitupuolen puoleiseen päätyyn asennetulta värähtelyanturilta. Signaalin taajuuskaista on 0 – 1000 Hz ja sen näytteenotto taajuus on 3906 Hz. Y-akselin yksikkönä on kiihtyvyys [m/s^2]. Kuvassa nähdään voimakas iskemä (merkattu numerolla 1), joka esiintyy kolme kertaa 4 sekunnin aikana. Kun iskemien välistä aikaa ja esiintymistaajuutta tutkitaan Sensodecistä löytyvillä mittaustyökaluilla, selviää, että iskemien välit ovat 1,649 s ja 1,643 s. Tästä laskemalla saadaan esiintymistaajuudeksi 0,6064 Hz ja 0,6086 Hz.

Sensodec ilmoittaa laitteen pyörimistaajuudeksi 0,61 Hz, joten voidaan olettaa, että kuvassa näkyvät iskemät aiheuttaa yksi ja sama halkeama, joka kerran kierroksessa iskeytyy kaavariin ja aiheuttaa tärähdyksen. Kuvaa 74 tarkemmin tarkastelemalla havaitaan toinenkin noin taajuudella 0,61 Hz esiintyvä piikki. Nämä piikit on merkattu kuvaa numerolla 2. Nämä iskemät eivät ole yhtä helposti havaittavissa, vaan kohoavat vain hiukan kohinan yläpuolelle. Iskemien väli on 1,643 s, joka taajuutena ilmoitettuna on 0,6086 Hz. Aikavälit, jotka jäävät suuren (1) ja pienen (2) iskemän väliin ovat 0,624 s ja 0,629 s.



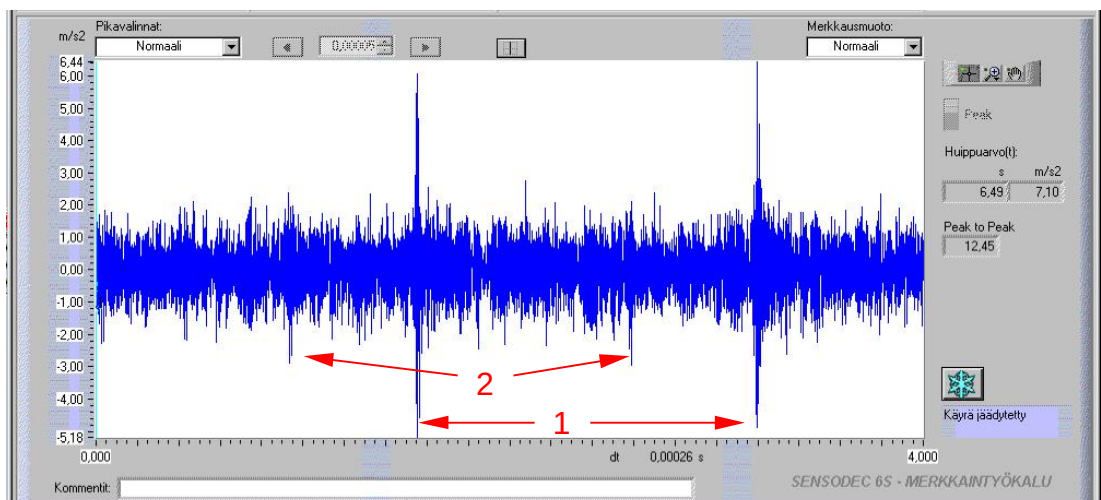
Kuva 74. Kaavaripalkin päähän hoitupuolelle asennetun kiihtyvyysanturin signaali taajuuskaistalla 0 – 1000 Hz [Sensodec 6S].



Kuva 75. Kaavaripalkin päähän hoitopuolelle asennetun kiihtyvyyssanturin signaali taajuuskaistalla 0 – 10000 Hz [Sensodec 6S].

Kuvassa 75 on esitetty saman kiihtyvyyssanturin signaali taajuuskaistalla 0 – 10000 Hz:ä. Nähdään, että kohinasta erottuu selvästi kaksi iskemää (1). Lähempi tarkastelu osoittaa jälleen, että kyseessä on piikki, joka esiintyy 1,638 s välein (esiintymistaajuus 0,6105 Hz), ja on mitä todennäköisimmin saman halkeaman aikaansaama. Muita piikkejä ei signaalista ole havaittavissa.

Seuraavaksi signaalia tutkittiin kaavaripalkin käyttöpuolelta. Värähtelyanturilta saatu signaali on esitetty kuvassa 76, ja sen taajuuskaista on 0 – 1000 Hz. Signaalissa näkyy kaksi suurta piikkiä (1), joiden aikaväliksi mitattiin 1,644 s (0,6083 Hz). Lähempi signaalin tarkastelu paljastaa myös pienemmän iskemän (2), joka esiintyy 1,643 sekunnin välein. Esiintymistaajuuksiksi saadaan 0,6086 Hz. Pienen (2) ja suuren (1) iskemän väliseksi ajaksi saadaan 0,607 s ja 0,608 s.



Kuva 76. Kaavaripalkin päähän käyttöpuolelle asennetun kiihtyvyyssanturin signaali taajuuskaistalla 0 – 1000 Hz [Sensodec 6S].

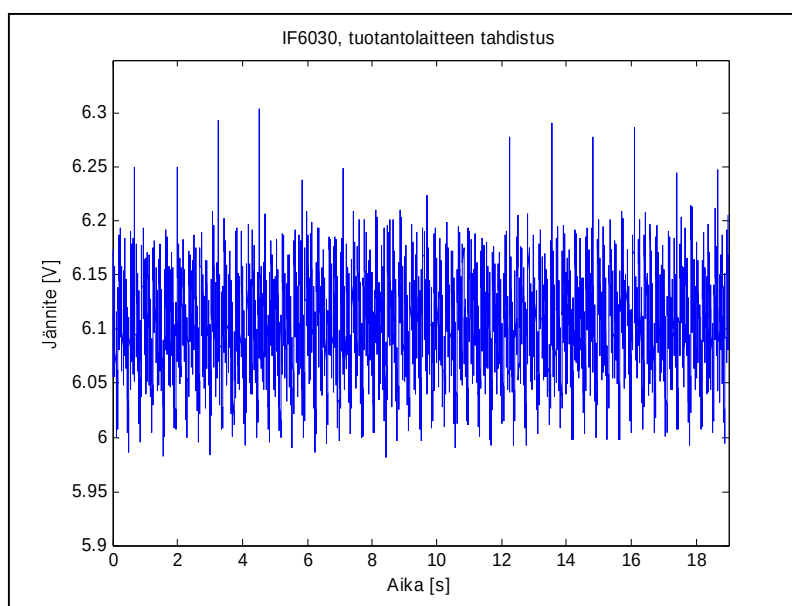
Taulukko 12. Hihnassa havaittujen halkeamien pituudet sekä sijainnit. Halkeamien numerointi vastaa kuvissa 74–76 esitettyä numerointia.

	Pituus [mm]	Etäisyys hoitopuolen reunasta [mm]
1. halkeama	80	680
2. halkeama	50	800
3. halkeama	15	1600

8.4.2 Tahdistus pyörrevirta-anturilla

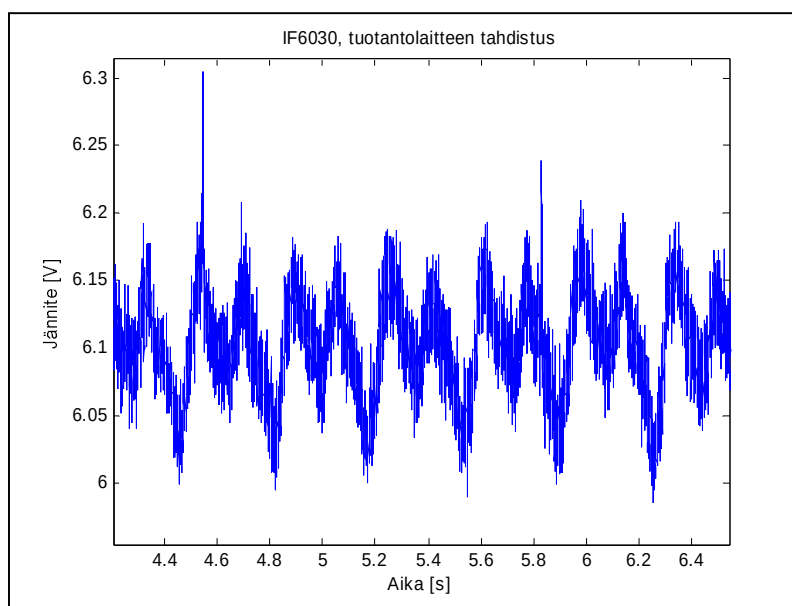
Kuvassa 76 on esitetty tuotantolaitteesta pyörrevirta-anturilla IF6030 saatu suodattamaton mittaustulos. Sensodec-järjestelmä ilmoitti mittaushetkellä laitteen hihnan pyörimistaajuudeksi 0,78 Hz:ä.

Signaalissa nähdään voimakas säännöllinen piikki, joka kohoaa useassa kohdassa näkyviin kohinasta. Signaalin lähempi tarkastelu (kuva 77) osoittaa, että mukana oleva matalataajuinen huojunta aiheuttaa kuvassa 76 näkyvän suuren eron piikkien voimakkuuksissa. Tarkastelemalla piikkejä lähemmin, saadaan niiden aiheuttamaksi muutokseksi noin 150 mV. Tämä jännitteen muutos vastaa noin 0,054 mm eli 54 μm etäisyyden muutosta anturin ja hihnan välillä. Piikit esiintyvät 1,284 sekunnin tasavälein. Pyörimistaajuudeksi muutettuna tämä väli on 0,7789 Hz. Tästä voidaan päätellä, että piikit aiheuttaa yksi ja sama kohde hihnassa.

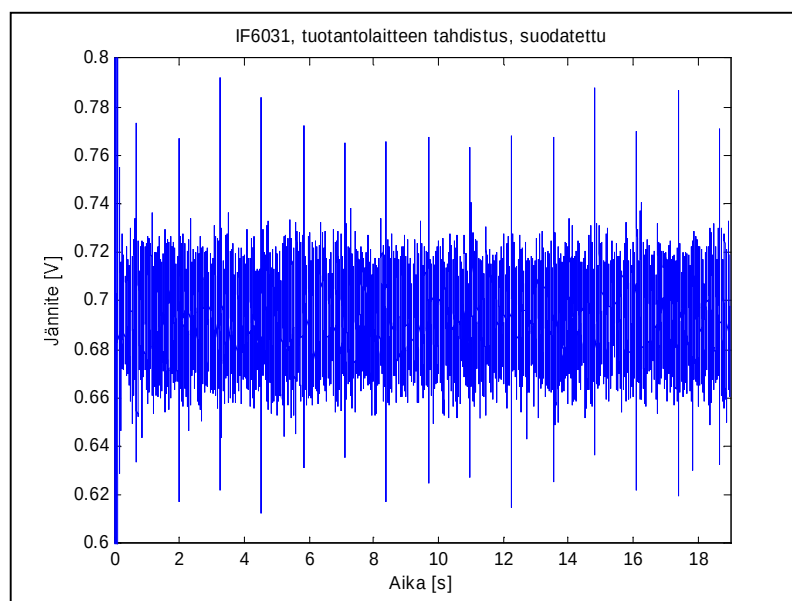


Kuva 76. Tuotantolaitteesta mitattu tahdistussignaali.

Signaalia suodatettiin seuraavaksi matalilla taajuuksilla olevat komponentit. Suotimena toimi 6.-asteen Chebyshev II-tyypin kaistanpäästösuoitin, jonka kaistaksi asetettiin 30 – 3000 Hz. Kuten kuvasta 78 nähdään, piikit tulevat nyt paremmin näkyviin ja ne kohoavat suodatetusta signaalista 50 – 80 mV kohinan yläpuolelle. Signaali-kohina-suhteeksi signaalissa esiintyvillä piikeillä saatiin 2,2 dB:ä.



Kuva 77. Tuotantolaitteesta mitatun tahdistussignaalin lähempi tarkastelu paljastaa säännöllisesti esiintyvän piikin.



Kuva 78. Tuotantolaitteen suodatettu tahdistussignaali.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET TULOKSISTA

9.1 Tahdistus

Tahdistuksen toimivuuden kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia tahdistussignaaleille on siinä esiintyvien piikkien tarkka toistuvuus mittauksesta toiseen, sekä piikkien erottuminen selvästi muusta signaalista. Tahdistuksen on lisäksi toimittava halutulla tavalla usealla nopeudella, jotta tuotantolaitteen nopeuden nosto ei aiheuttaisi ongelmia.

Tahdistussignaaleissa olevien piikkien toistuvuutta ajan suhteen tutkittiin mittaamalla piikkien välisen ajan sekä taajuuden keskihajonta. Näistä arvoista saadaan tietoa siitä, miten tarkasti yksi kierros pystytään mittaamaan. Tuloksista (kuvat 55 ja 56) nähdään, että kaikilla anturivaihtoehdoilla päästään ajan keskihajonnassa alle 0,12 ms ja taajuuden keskihajonnassa alle 2,5 mHz. Otettiinpa tarkastelun kohteeksi sitten aika tai taajuus, samat havainnot anturien eroista on tehtävissä molemmista;

- Pyörrevirta-antureista herkkyydeltään suurempi IF6031 on koko nopeusalueella (pois lukien nopeus 498 m/min) tarkempi, kuin IA5034.
- Signaalin suodatus näyttää suurentavan keskihajontaa.
- Optisen valokennon OJ5100:n keskihajonnat ovat suurempia kuin IF6031:n, mutta pienempiä kuin IA5034:n.
- Kaikkien anturien taajuuden keskihajonta kasvaa eksponentiaalisesti nopeuden kasvaessa.

Pyörrevirta-anturien välinen ero IF6031:n hyväksi selittyy sillä, että IF6031:lle hihnassa olevan sauman koko suhteessa anturin havainnointialueeseen on suurempi, kuin IA5034:lle. Tällöin sauman aiheuttama piikki on terävämpi ja näin sen maksimin paikka varmemmin määriteltävissä. Suodatuksen keskihajontaa suurentavan vaikutuksen voidaan arvioida johtuvan siitä, että piikit sisältävä joitain matalia komponentteja, jotka suodin poistaa. Tällöin joidenkin taajuuksien puute saattaa vaikuttaa piikin paikkaan ja siirtymiseen. Lisäksi suotimen vaiheen epälineaarisuudet saattavat vaikuttaa joihinkin taajuuskomponentteihin suuremmalla viiveellä kuin toisiin. Tämä saattaa olla yksi tekijöistä, joka saa aikaan keskihajonnan kasvun.

Piikkien erottumista muusta signaalista mitattiin määrittelemällä piikeille signaali-kohina-suhde. Suhteen määrittely oli mahdollista ainoastaan pyörrevirta-antureille, sillä niiden ulostulo oli analoginen, toisin kuin OJ5100, jolla ulostulo oli digitaalinen. Kuvasta 58 nähdään seuraavat havainnot;

- Suuremman herkkyyden omaavan IF6031:n tasot ovat kauttaaltaan korkeammat kuin IA5034:n.
- Suodatus parantaa signaali-kohina-suhdetta huomattavasti.

- Suodattamattoman signaalin signaali-kohina-suhteet laskevat nopeuden noustessa. Suodatettujen signaalien tasot pysyvät tasaisena koko nopeusalueella.

IF6031:n suuremmat signaali-kohina-suhteet on pitkälti selitettävissä sen paremmalla herkkyydellä. Paremman herkkyytensä ansiosta hitsaussauman aiheuttama muutos on suurempi, kuin IA5034. Suodatettujen signaalien tasoja verratessa ero on 2 – 5 dB IF6031:n hyväksi. Suodattamattoman ja suodatetun signaalin tasojen käytöksestä pyörimisnopeuden suhteen voidaan päätellä, että nopeuden noustessa laitteen liikkumisesta ja hihnan pyörimisestä johtuvat kohinat lisääntyvät. Signaalin suodatus poistaa kohinan, jonka jälkeen jäljelle jää nopeudesta riippumatta yhtä suurina piikkeinä näkyvä sauman aiheuttama muutos. Suodatetun ja suodattamattoman signaalien tasojen (IF6031) ero on koko nopeusalueella 5,5 – 8,5 dB suodatetun hyväksi.

Pyörrevirta-anturien signaalissa esiintyvien piikkien nousuajat sekä optisen valokennon pulssin pituudet mitattiin, jotta saataisiin tietoa kuinka nopeasta muutoksesta on kysymys. Muutoksen nopeus vaikuttaa signaalia seuraavalle elektroniikalle asetettaviin vaatimuksiin. Digitaalisen näytteistykseen kannalta näytteenottotaajuus on valittava siten, että nousuajan aikana otetaan noin 4 – 10 näytettä. Analogisen elektroniikan kannalta piirin on kyettävä seuraamaan nopeaa transienttia.

Kuvista 57 ja 59 voidaan tehdä seuraavanlaisia päätelmiä nousuajan ja pulssin pituuden suhteen;

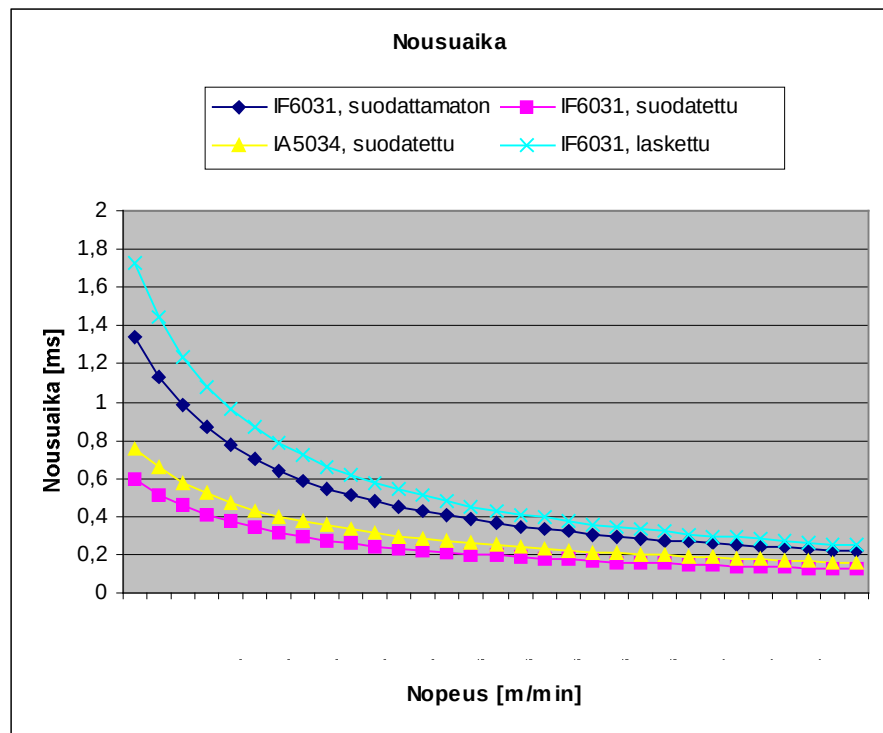
- Signaalin suodatus aiheuttaa piikkien nousuajan lyhenemistä.
- Pyörrevirta-antureista suuremman halkaisijan omaava IA5034 saavuttaa suuremman nousuajan.
- Nousuajat ja pulssin pituus lyhenevät nopeuden kasvaessa

Pyörrevirta-anturin signaalia suodatettaessa nähdään, että piikkien nousuajat lyhenevät merkittävästi verrattuna suodattamattoman signaalin piikkien nousuaikoihin. IF6031:n tapauksessa suodatus lyhentää nousuaikoja 40 – 60 % ja painaa ne koko mitatun nopeusalueen sisällä 0,6 ms:n alle (0,2 – 0,6 ms). Ilman suodatusta mitatussa signaalissa piikkien nousuajat ovat välillä 0,4 – 1,4 ms.

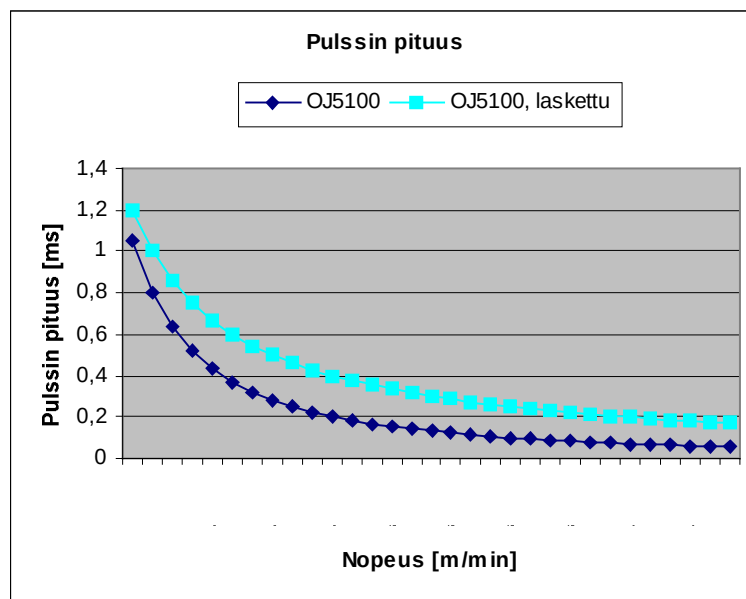
Pyörrevirta-anturin havainnointialue on verrannollinen anturin fyysiseen halkaisijaan. Tästä johtuen suuremman halkaisijan omaava IA5034 havaitsee sauman aikaisemmin, kuin pienempi IF6031, ja sauman aiheuttama piikki on nousultaan loivempi ja ajallisesti pidempi. Suodatetuista signaaleista nähdään, että IA5034:n nousuajat ovat 15 – 40 % pidemmät kuin IF6031:n. Molemmilla nousuajat sijoittuvat koko nopeusalueella välille 0,2 – 0,7 ms.

Kuvissa 79 ja 80 on esitetty ennustukset nousuajan ja pulssin pituuden käyttäytymisestä suuremmilla nopeuksilla. Käyrät on saatu mitattuihin arvoihin sovitetulla trendillä. Laskettujen trendien lisäksi kuviin on lisätty käyrä, joka on saatu oletusarvoista laskemalla (vaalean sininen väri). Nousuajan tapauksessa laskettiin arvot IF6031:lle, jotka saatiin määrittämällä etäisyys anturin havainnointietäisyyden reunasta hitsisauman keskikohtaan. Tämän etäisyyden ja hihnan nopeuden avulla pystyttiin laskemaan teoreettinen arvo nousuajalle. IF6031:n osalta raakasignaalin nousuajat noudattavat hyvin laskettuja arvoja. Pulssin pituuden teoreettinen arvo saatiin laskemalla aika, joka pistemäisellä valonsäteellä menee hitsisauman mittaisen matkan kulkemiseen kullakin nopeudella.

Autokorrelaatiolla saaduista tuloksista nähdään, että signaalin suodattaminen ennen itse autokorrelaation tekemistä vaikuttaa maksimien havaitsemiseen selvästi (vertaa kuvia 60 ja 62). Lisäksi suodattaminen ei vaikuttanut mitenkään autokorrelaation maksimeista laskettuihin taajuuksiin, joten signaalin suodattamista voidaan pitää tuloksien kannalta turvallisena. Taulukoista 10 ja 11 nähdään, että autokorrelaation antamat pyörimistaajuuDET ovat hyvin lähellä Sensodec järjestelmän nykyisiä laskettuja taajuuksia. Ongelmana autokorrelaation tuloksien tarkkuuden arvioinnissa onkin, että arvon, johon saatuja tuloksia verrataan, oikeellisuudesta ei ole varmaa tietoa. Tuloksista pystytään kuitenkin hyvällä varmuudella toteamaan, että saatu taajuus on hihnan pyörimistaajuus. Tätä päättelyä tukee saadun taajuuden hyvin pieni heitto laskennallisesta, sekä autokorrelaation terävät ja selvät maksimit.



Kuva 79. Nousuaikojen laskeminen korkeammille nopeuksille.



Kuva 80. Pulssin pituuden laskeminen korkeamille nopeuksilla.

9.2 Vian havainnointi

Hiushalkeaman ja iskemän havainnoinnin tarkkuutta mitattiin laskemalla signaali-kohina-suhde sen aiheuttamalle muutokselle signaalissa. Mitä suurempi signaali-kohina-suhde oli, sitä paremmin vika pystyttiin havaitsemaan.

Seuraavia johtopäätöksiä pystytään vetämään pyörrevirta-antureilla saaduista tuloksista;

- Pyörrevirta-anturilla, joka asennetaan telan kaarelle (kuva 48, kohta a), saadaan parempia tuloksia, kuin hihnan suoralle osalle asennetulla (kuva 48, kohta b).
- Suodatus parantaa merkittävästi signaali-kohina-suhdetta.
- Paremman herkkyyden omaava IF6031 saavuttaa pyörrevirta-antureista korkeammat signaali-kohina-suhteet tai vähintään yhtä suuret, kuin IA5034.
- Nopeuden kasvu ei vaikuta tasoihin merkittävästi.
- Pyörrevirta-anturin siirtäminen iskemän havainnoinnissa anturin halkaisijan verran sivuun laskee signaali-kohina-suhteita.

Hihnassa olevan vian havainnoimiseksi mahdollisimman hyvin, kannattaa anturi sijoittaa sellaiseen paikkaan hihnan kiertoradalla, jossa hihna myötäilee ohjaustelan pintaa. Vian havainnointi on varmempaa telan kaarella, kuin hihnan suoralla osuudella. Pyörrevirta-anturin tapauksessa mittaustuloksia parantaa se, että hihna ei pääse heilumaan, sekä halkeaman ”aukeamisesta” johtuva pyörrevirtojen kokema suurempi resistanssi. Mittauksissa saatiin telan kaarella kuvan 63 mukaiset tulokset,

joista huomataan, että ilman suodatusta piikkien havainnointi on vaikeaa tai jopa mahdotonta. Ilman suodatusta molempien anturien tasot laskevat voimakkaasti nopeuden kasvaessa, ja parhaimmillaankin ne jäävät alle 4 dB:n. Suodattamalla signaali-kohina-suhteita saadaan nousemaan 6 – 7 dB:ä (tasolle 6 – 8 dB:ä) IF6031:n tapauksessa, sekä tasot saadaan paremmin pysymään paikoillaan nopeuden noususta huolimatta. Tämä selittyy sillä, että nopeuden noustessa kohinatasot kasvavat, jotka kuitenkin saadaan suodattamalla alenemaan. IA034:n heikommät tasot voidaan selittää sillä, että halkeaman koko on sille anturin halkaisijaan suhteutettuna pienempi. Tällöin halkeama ei häiritse syntyviä pyörrevirtoja yhtä paljon, kuin IF6031:n tapauksessa. Hihnan suoralla osuudella tehdyissä mittauksissa ei tuloksia saatu suodatuksesta huolimatta kummallekaan anturille.

Iskemän mittauksissa saadut tulokset on esitetty kuvissa 68 ja 70. Tuloksista nähdään, että suoraan iskemän yläpuolella IF6031 saavuttaa suodattamattomana signaali-kohina-suhteet 12 – 13 dB ja suodatettuna tasot 15 – 21 dB. Parannusta tapahtuu suodattamisen ansiosta 9 – 14 dB:ä nopeudesta riippuen. IA5034:llä vastaavat tasot jäävät hiukan matalammiksi. Suodattamattomissa signaaleissa IA5034:n tasot jäävät 3 – 5 dB:ä (tasolle 8 – 9 dB) ja suodatetuissa 4 – 6 dB:ä (tasolle 15 – 18 dB) IF6031:n alapuolelle. Huonompi herkkyys kohteen ja anturin välisessä mittauksessa näyttää koituvan IA5034:n tappioksi, vaikka erot eivät olekaan suuret.

Iskemän kohdalta sivuun mentäessä anturin halkaisijan verran, lähenevät anturien tulokset toisiaan niin, että ero IF6031:n eduksi on enää 1 – 4 dB:ä suodattamattomien signaalien osalta. Suodatettujen signaalien osalta anturien tulokset ovat yhden desibelin sisällä toisistaan suuntaan tai toiseen. IF6031:n signaali-kohina-suhteet ovat suodattamattomissa signaaleissa välillä 4 – 6 dB:ä ja suodatuksen jälkeen välillä 8 – 10 dB:ä. Vastaavat tasojen välit IA5034:lle ovat 2 – 4 dB:ä ja 8 – 11 dB:ä. Anturin siirtäminen sivuun iskemän yläpuolelta vaikuttaa selvästi alentavasti mitattavan piikin signaali-kohina-suhteeseen. Pienemmän halkaisijan omaava ja herkempi IF6031 näyttää kärsivän siirrosta enemmän sillä sen tasot tippuvat 6 – 8 dB:ä (suodattamaton) ja 8 – 13 dB:ä (suodatettu). IA5034:llä pudotukset ovat maltillisempia; 5 – 6 dB:ä ja 3 – 7 dB:ä. Selvää selitystä tälle IA5034:n tasojen pienemmälle tippumiselle ei ole. Siirtoetäisyydeksi valittiin juuri anturin halkaisijan mitta, jotta tulokset olisivat verrannollisia toisiinsa.

Mikrofoneilla tehtävässä vian havainnoinnissa saatiin seuraavanlaisia johtopäätöksiä tuloksista;

- Elektreettimikrofonilla päästää kaikissa mittauksissa parempiin tuloksiin, kuin dynaamisella mikrofonilla.
- Signaali-kohina-suhde laskee etäisyyden kasvaessa.
- Signaali-kohina-suhde laskee sivuttaissuuntaan tehtävän poikkeutuksen kasvaessa.
- Nopeuden kasvattaminen huonontaa signaali-kohina-suhdetta.

Mikrofonilla saatujen signaali-kohina-suhteiden tulokset on esitetty kuvissa 66 ja 67 sekä 72 – 73. Kuvista nähdään välittömästi elektreettimikrofonin ja dynaamisen

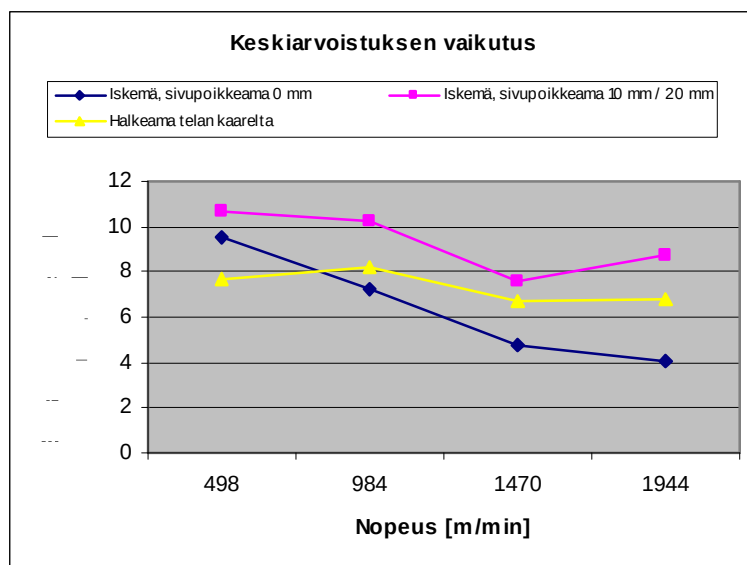
mikrofonin ero vian havainnoinnin tarkkuudessa. Elektreettimikrofonilla saadaan halkeaman havainnoinnissa 4 – 6 dB, ja iskemän havainnoinnissa 10 – 12 dB suuremmat signaali-kohina-suhteet, kuin dynaamisella mikrofoniolla. Lisäksi havaitaan, että elektreettimikrofonilla saadaan tuloksia huomattavasti laajemmalla mittauspistealueella. Etäisyys kohteeseen sekä sivuttaissuunnassa tehtävä siirto vaikuttavat dynaamisen mikrofoniin tuloksiin huomattavasti selvemmin, kuin elektreettimikrofonin. Syynä mikrofoniin eroon voidaan pitää elektreettimikrofonin luontaisesti suurempaa herkkyyttä, sekä mikrofoniin rakenteellista eroa.

Mittausetäisyys vaikuttaa vahvasti saatuun signaali-kohina-suhteeseen molemmilla mikrofoneilla. Elektreettimikrofonilla etäisyyden kasvattaminen 50 mm heikentää signaali-kohina-suhdetta noin 2 – 5 dB:ä halkeaman ja 2 – 8 dB:ä iskemän tapauksessa. Kuitenkin mentäessä yli 150 mm:n ei piikkejä ole enää nähtävissä. Dynaamisella mikrofoniolla samainen tason heikkeneminen on noin 6 dB:ä halkeaman ja noin 8 dB:ä iskemän tapauksessa 50 mm kohti. Etäisyyden kasvaessa yli 100 mm ei dynaamisella mikrofoniolla enää saada mittaustuloksia. Tuloksista nähdään, että elektreettimikrofoni pystyy paremmin säilyttämään tasonsa etäisyyden kasvaessa sekä yltää pidempään maksimi etäisyyteen. Elektreettimikrofoni pystyy paremman herkkyytensä sekä rakenteensa ansiosta havainnoimaan nopeat äänenpaineen transientin suuremmankin etäisyyden päästä.

Sivusuunnassa tehtävän mikrofoniin siirron huomataan vaikuttavan selvästi signaali-kohina-suhteeseen tasoa alentavasti. Elektreettimikrofonilla sivusuunnassa tehtävä 50 mm siirto aiheuttaa sen, että signaali-kohina-suhteet laskevat noin 1 – 5 dB:ä halkeaman ja 6 – 8 dB:ä iskemän tapauksessa. Siirrettäessä mikrofoni 100 mm sivuun, ei tuloksia enää saatu. Dynaamisella mikrofoniolla jo 50 mm poikkeutus sivuun aiheutti sen, että tuloksia ei saatu. Jälleen voidaan siis todeta, että elektreettimikrofoni selviytyy paremmin mittaustapaan muuttumisesta. Molempien mikrofoniin tuloksista taas voidaan päätellä, että kumpikin on rakenteeltaan suunniteltu niin, että suoraan edestä tulevat äänet havaitaan tarkasti. Elektreettimikrofonin paremmat tulokset johtuvat paremmasta herkkyydestä, mikrofoniin rakenteesta, sekä yksinkertaisesti siitä, että dynaaminen mikrofoni on suunniteltu kapeampikeilaiseksi.

Kaikki mikrofoneilla tehtävät mittaukset suoritettiin kahdella eri nopeudella; 498 m/min ja 984 m/min. Nopeuden kasvattamisen vaikutus nähdään kuvista selvästi, ja sen huomataan alentavan saatuja signaali-kohina-suhteita. Elektreettimikrofonilla nopeuden kasvusta johtuva tasojen lasku on halkeaman tapauksessa 8 – 11 dB:ä ja iskemällä 7 – 9 dB:ä. Dynaamisella mikrofoniolla samat arvot ovat noin 8 dB:ä ja 7 dB:ä. Hihnan nopeuden kasvaessa, vian aiheuttaman äänen kesto on lyhyempi. Tällöin mikrofoniin on oltava kykenevä huomaamaan ajallisesti lyhyet muutokset äänenpaineessa ja reagoitava niihin. Molemmilla mikrofoneilla nopeudesta johtuva tasojen lasku on samaa kokoluokkaa.

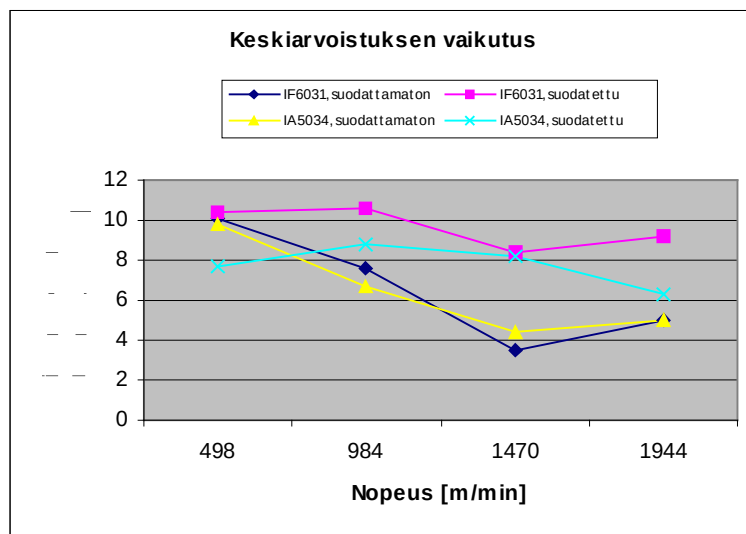
Pyörrevirta-antureilla tehtyjen mittausten yhteydessä suoritettiin signaalien 30 kierroksen tahdistettu aikakeskiarvoistus. Tahdistetuista signaaleista mitattiin signaali-kohina-suhteet, joiden tulokset nähdään kuvissa 64, 65, 69 ja 71. Yleisesti huomataan, että keskiarvoistus parantaa signaali-kohina-suhteita kuten voidaan olettaa. Tasojen nousu ei kuitenkaan ole tasaista, vaan ne saattavat erota toisistaan merkittävästi hihnan nopeudesta ja anturista riippuen. Kuvassa 81 on esitetty eri mittauksissa (halkeama / iskemä) saatujen tasojen nousut nopeuden suhteen. Tasojen



Kuva 81. Nopeuden vaikutus keskiarvoistuksen tehoon.

nousu on laskettu keskiarvona kaikista neljästä (molempien anturien suodattamaton ja suodatettu signaali) arvosta, jotka kyseisellä nopeudella saatiin. Näin saadaan viitteitä nopeuden vaikutuksesta tasojen nousuun. Nähdään, että keskiarvoistuksen teho on yleisesti parhaimmillaan alemmilla nopeuksilla. Kun siirrytään suurempiin nopeuksiin, vaikutus hieman laskee. Syynä tähän tehokkuuden laskuun on kierrosajan ja -taajuuden keskihajonnan kasvu (kuvat 55 ja 56), joka johtaa epätarkempaan keskiarvoistukseen. Voidaan kuitenkin todeta, että 30 kierroksen keskiarvoistuksella saavutetaan varteenotettavaa hyötyä, joka on vähintään 4 dB:n luokkaa.

Keskiarvoistuksen tehokkuutta anturikohtaisesti on esitetty kuvassa 82. Kuvassa esitetyt tasojen nousut ovat keskiarvoja anturilla saaduista yksittäisistä tuloksista. Tuloksista nähdään jälleen, kuinka nopeuden kasvu vaikuttaa keskiarvoistamisen



Kuva 82. Keskiarvoistuksen ansiosta tapahtuva signaali-kohinasuhteiden nousu antureittain.

tehokkuuteen. Hitailla nopeuksilla päästään parhaisiin tasojen nousuun molemmilla antureilla, kun taas suuremmilla nopeuksilla signaali-kohina-suhteen nousu on pienempää. Kuten jo edellisessä mainittiin, johtuu tehokkuuden lasku kierrosajan ja –taajuuden keskihajonnan kasvusta. Tuloksista kuitenkin nähdään jälleen, että tahdistettu aikakeskiarvoistus on tehokas väline signaali-kohina-suhteen parantamiseen.

9.3 Tuotantolaitteen hihnan kunnonvalvonta ja tahdistus

Tuotantolaitteen nykyisellä hihnan kunnonvalvonnalla on mahdollista havaita halkeama, kun se on kasvanut tarpeeksi suureksi. Tuloksista (kuvat 74 – 76) sekä hihnassa olleista halkeamista (taulukko 10) voidaan päätellä, että järjestelmän värähtelyanturien avulla kyetään havaitsemaan yli 50 mm pitkä halkeama hihnassa.

Kuvissa näkyvät piikit esiintyvät Sensodecin laskeman pyörimistaajuuden läheisyydessä, joten voidaan olettaa, että jaksollisesti esiintyvät piikit ovat aina saman hiushalkeaman aikaansaamia. Lisäksi voidaan olettaa, että piikeistä suurin ja selvimmän erottuva on halkeamista pisimmän (80 mm) aiheuttama. Toinen säännöllisesti kuvissa esiintyvä piikki kuuluu halkeamista toiseksi pisimmälle (50 mm). Tämä piikki näkyy kohinan peitosta juuri ja juuri, joten tätä 50 mm pituutta voidaan pitää raja-arvona hiushalkeaman havaitsemiselle. Tätä lyhemmät halkeamat, kuten pellissä oleva 15 mm pitkä, eivät ole havaittavissa signaalista.

Vertailemalla kuvia 74 ja 76 nähdään, että hoitopuolelta tehdyissä mittauksissa halkeamien aiheuttamat piikit ovat amplitudiltaan suurempia kuin käyttöpuolella tehdyissä. Kun tähän tietoon lisätään tieto siitä, että halkeamat sijaitsevat hihnassa lähempänä hoitopuolen laitaa (taulukko 10), voidaan perustellusti väittää, että myös halkeaman sijainti hihnassa vaikuttaa piikin kokoon. Mitä lähempänä halkeama on hihnan reunaa ja täten anturia, sitä suurempi on sen aiheuttaman piikin amplitudi.

Kuvassa 79 on esitetty tuotantolaitteesta pyörrevirta-anturilla mitatun signaalin suodatettu versio. Tuloksista selviää, että signaalissa esiintyy ainoastaan yksi piikki kierrosta kohden. Koska hihnassa on valmistajan mukaan 8 identtistä hitsausaumaa, täytyisi signaalissa näkyä 8 piikkiä, jotta voitaisiin kiistattomasti todeta saumojen olevan havaittavissa pyörrevirta-anturilla. Tuloksissa saatu 54 μm muutos kerran kierroksessa anturin ja hihnan välillä kuitenkin korreloisi hyvin valmistajan antaman 50 μm hitsisauman maksimiarvon kanssa.

Noin kuukausi tuotantolaitteen tahdistusta koskevien mittausten jälkeen ilmeni, että hihnaan oli syntynyt hiushalkeama. Halkeama havaittiin nykyisen kunnonvalvonnan avulla. Hihnan korjauksen yhteydessä selvisi, että halkeama sijaitti kohdassa, jonka yläpuolelle anturi oli asennettu. Voi siis olla, että tahdistuksen mittauksissa havaittu yksinäinen piikki oli halkeaman alun aiheuttama. Se oliko hihnassa vasta pistemäinen iskemä vai jo alkanut hiushalkeama, ei tiedetä.

10. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoitus oli tutkia tekniikoita, joilla pystyttäisiin parantamaan hihnakalanterin teräshihnan kunnonvalvontaa. Hihnan kunnonvalvonnalla pyritään parantamaan koko laitteen toimintaa sekä ennakoimaan sen tarvitsemia huoltoseisokkeja. Tämän hetkinen kunnonvalvontajärjestelmä pystyy havaitsemaan hihnaan syntyneet viat, kun niiden koko ylittää tietyn kynnyksrajan. Työn tarkoitus on madaltaa tuota rajaa ja näin parantaa jo olemassa olevaa järjestelmää.

Työ jakautui kahteen osakokonaisuuteen. Ensimmäisessä osassa pyrittiin selvittämään kalanterissa pyörivän teräshihnan pyörimistaajuus, jotta saataisiin käyttöön tahdistettu aikakeskiarvoistus. Tämän ansiosta kunnonvalvonta signaalia pystyttäisiin summaamaan monen pyörähdysajan, jolloin jaksollisesti samaan aikaan tapahtuvat muutokset pystyttäisiin havaitsemaan herkemmin. Teräshihnan tahdistuksen toimiessa hihnan pinnasta pystytään havaitsemaan entistä pienempiä vikoja, joita siihen käytön aikana mahdollisesti syntyy. Työn toisessa osassa etsittiin tekniikkaa, jolla teräshihnassa esiintyvät viat saataisiin havaittua mahdollisimman pian niiden syntymisen jälkeen. Teräshihnassa esiintyvät viat ovat yleensä hiushalkeamia tai iskemiä. Näiden havaitseminen mahdollisimman tarkasti ja luotettavasti on edellytys toimivalle hihnan kunnonvalvonnalle.

Työssä testattiin useita eri anturitekniikoita ja menetelmiä, joilla pyrittiin mahdollisimman hyvään tulokseen. Kaikkia kuitenkin yhdistää se, että niitä valittaessa kiinnitettiin erityistä huomiota menetelmän yksinkertaisuuteen, hintaan sekä valmiuteen toimia sellaisenaan laitteessa. Lisäksi vaadittavien lisälaitteiden lukumäärän haluttiin pysyvän mahdollisimman pienenä. Valittujen menetelmien haluttiin olevan sellaisia, että ne suorittavat mittauksen hihnaa koskemattomasti, jolloin varmistutaan siitä, ettei menetelmä itsessään aiheuta ongelmia hihnan toiminnan ja kestävyyskannalta. Myös hihnaan mahdollisesti tehtävien merkintöjen vaadittiin olevan sellaisia, joilla ei vaikuteta hihnan kestävyyskseen.

Pyörimistaajuuden selvittämiseen käytettiin kolmea eri tekniikkaa, autokorrelaatiota, pyörrevirta-anturia ja valokennoa. Autokorrelaation käyttäminen perustui siihen ajatukseen, että pyörivistä laitteista sekä niiden osista saatavissa valvontasignaaleissa on jaksollisuutta, joka toistuu aina yhden kierroksen sykleissä. Digitaalisiin signaalinkäsittely työkaluihin kuuluva autokorrelaatio paljastaa tuon jaksollisuuden signaalissa ja antaa tuloksena pyörimistaajuuden.

Pyörrevirta-antureilla pyrittiin havaitsemaan teräshihnassa olevat hitsisaumat, joiden avulla saadaan selville teräshihnan pyörimisaika ja -taajuus. Hihnan rakentamismenetelmästä johtuen se sisältää useita hitsisaumoja, jotka ovat epäjatkuvuuskohtia muuten homogeenisessä ja tasaisessa materiaalisissa. Pyörrevirta-anturilla pyrittiin huomaamaan tämä materiaalin rajakohta, sekä mahdollinen sauman aiheuttama epätasaisuus. Pyörrevirta-anturin käyttö perustuu sen ja kohdemateriaalin väliseen sähkömagneettiseen vuorovaikutukseen, jossa tapahtuu muutoksia materiaalin koostumuksesta ja etäisyydestä riippuen.

Optisen valokennon käyttäminen pyörimistaajuuden mittaamiseen edellyttää, että hihnaan on tehtävissä merkkaukspiste, jota sensorilla sitten luetaan. Merkkaukspisteen

on oltava mattamusta, jotta se eroaa teräshihnan kiiltävästä pinnasta ja on luettavissa luotettavasti valokennolla. Piste toimii liipaisukohtana, josta optinen anturi saa tiedon kierroksen vaihtumisesta.

Teräshihnaan mahdollisesti syntyvien vikojen havainnointiin testattiin kahta eri menetelmää, pyörrevirta-anturia sekä mikrofonia. Mahdollisista hihnaan syntyvistä vioista testeissä keskityttiin hiushalkeamaan sekä iskemään. Pyörrevirta-anturin käyttäminen vian tunnistamiseen hihnan pinnasta perustui teoriaan, jonka mukaan sitä käyttämällä on mahdollista havaita terävät epäjatkuvuuskohdat, kuten halkeamat, materiaalin pinnasta ja sisältä. Iskemän havainnointi taas perustui anturin ja havaintokohteen etäisyyden muutokseen. Mikrofonilla pyrittiin mittaamaan äänenpaineen transientti, jonka halkeama tai iskemä aiheuttaa joutuessaan kosketuksiin teräshihnaa puhdistavan kaavarin kanssa. Kaavarissa on terä, joka myötäilee hihnan pintaa ja poistaa sen pinnasta epäpuhtauksia. Esitietoina tiedettiin, että tämä terän ja hihnassa olevan hiushalkeaman kontakti aiheuttaa äänen, joka on korvalla kuultavissa, kunhan halkeama on kasvanut useiden senttien mittaiseksi.

Testit suoritettiin testilaitteella, joka oli suunniteltu pyörittämään kapeita, noin muutaman kymmenen senttimetriä leveitä teräshihnoja. Tällä laitteella suoritettiin kaikki laboratoriotestit pyörimistaajuuden ja vian havainnoinnin suhteen. Teräshihnan nopeus oli korkeimmillaan 10 m/s. Ainoana poikkeuksena oli pyörimistaajuuden selvitys autokorrelaatiolla, jonka testit suoritettiin tuotantolaitteelta saatavilla olevalle mittaustiedolle. Työn lopuksi suoritettiin vielä pyörimistaajuuden mittaaminen pyörrevirta-anturia käyttäen tuotantolaitteella, sillä anturilla laboratorio-oloissa saadut tulokset olivat hyviä ja sen liittäminen nykyiseen kunnonvalvontajärjestelmään oli helpointa.

Testilaitteella saaduista pyörimistaajuuden mittauksen tuloksista nähtiin, että pyörrevirta-anturilla sekä optisella valokennolla pystyttiin selvittämään teräshihnan pyörimisnopeus. Pyörimistaajuuden toistettavuus näillä tekniikoilla kierroksesta toiseen oli niin hyvällä tasolla, että se mahdollistaisi tahdistuksen tekemisen. Lisäksi hitsausauman tai merkkaukpisteen aiheuttama muutos signaalissa oli hyvin erotettavissa kohinasta. Pyörrevirta-anturien kohdalla havaittiin, että sauman havainnointiin vaikuttaa odotetusti anturin herkkyys. Testeissä käytetyistä antureista herkempi saavutti paremman tarkkuuden sekä pulssin voimakkuuden. Pyörimistaajuuden testit autokorrelaation kohdalla antoivat myös varsin hyviä tuloksia. Tuloksien arvoa nostaa se, että niiden tuottamiseen käytettiin käytössä olevan tuotantolaitteen antamaa kunnonvalvonta signaalia. Autokorrelaatiotuloksesta pystyttiin selvästi lukemaan viive sekä sen moninkerrat, joiden avulla pyörähdystaajuus pystyttiin määrittämään luotettavasti.

Pyörrevirta-anturin hyvien tuloksien sekä helpon ja nopean asennettavuuden takia, sitä päätettiin kokeilla myös tuotantolaitteen pyörimistaajuuden mittaamiseen. Saaduista tuloksista ei pystytty kiistattomasti osoittamaan, että hitsisaumat ovat havaittavissa. Tämä johtuu siitä, että valmistajan mukaan hihnassa on kahdeksan identtistä saumaa, mutta mittauksissa löydettiin vain yksi muutos kerran kierroksessa. Tämä muutos kuitenkin vastaa hyvin sitä minkä valmistajan ilmoittama sauma aiheuttaisi pyörrevirta-anturilla mitattaessa.

Taulukko 13. Eri tekniikoiden vertailu. Asennettavuudella tarkoitetaan tekniikan vaatimaa työtä ja lisälaitteita, joita asennukseen tarvitaan. Valokennon pisteitä alentaa vaadittavan merkin tekeminen hihnaan, sekä linssin puhtaana pitävän koteloinnin lisääminen.

	Pyörimistaajuuden tarkkuus	Pulssin erottuminen	Asennettavuus	Olosuhteiden kesto
Pyörrevirta-anturi	+++	++	++	+++
Valokenno	+++	+++	+	+
Autokorrelaatio	++	++	+++	+++

Vianhavainnointia testattaessa huomattiin, että pyörrevirta-anturi on luotettava tapa selvittää onko teräshihnan pintaan muodostunut hiushalkeama tai iskemä. Viat huomattiin erinomaisella tarkkuudella, kunhan anturi asennettiin sellaiseen kohtaan hihnan kiertoa, jossa hihnan ja anturin etäisyys ei pääse muuttumaan tärinän tai värähtelyn vaikutuksesta. Myös anturien havainnointialueen huomattiin ulottuvan anturin halkaisijan verran sivuille, jossa saavutettiin varsin hyvä herkkyys vikojen havainnoinnissa. Teräshihnan pyörimisnopeudella ei näyttänyt olevan suurta vaikutusta saatuihin tuloksiin, joten anturin käyttö suurissakin nopeuksissa on mahdollista. Mikrofonien herkkyys vian havainnoimiseksi ei ollut samalla tasolla kuin pyörrevirta-anturin. Mikrofonilla saadut tulokset osoittivat, että hihnan pyörimisnopeudella sekä mikrofonin sijoittelulla on suuri heikentävä vaikutus tuloksiin. Mikrofonin sijoittaminen aivan kaavarin ja vian kohtaamispaikan yläpuolelle on välttämätöntä tarkan havainnoinnin kannalta. Testeissä käytetyistä mikrofoneista elektreettimikrofoni selviytyi paremmin dynaamiseen mikrofoniin verrattuna. Tähän on syynä elektreettimikrofonin luontaisesti suurempi herkkyys sekä nopeiden transienttien havainnointikyky.

Taulukko 14. Eri tekniikoiden vertailu. Mikrofonien asennettavuuden pisteitä laskee mahdollisten suojiin lisääminen sekä vahvistimien lisääminen. Mikrofonien välinen kamppailu kääntyy elektreettimikrofonin hyväksi.

	Iskemän havainnointi	Halkeaman havainnointi	Asennettavuus	Olosuhteiden kesto
Pyörrevirta-anturi	+++	+++	++	+++
Elektreettimikrofoni	++	++	+	+
Dynaaminen mikrofoni	+	+	+	+

10.1 Jatkotutkimus

Tuotantolaitteen tahdistusta tehdessä havaittiin, että pyörrevirta-anturilla ei pystytty kiistattomasti havaitsemaan hihnassa olevia hitsaussaumoja. Seuraavaksi on selvitettävä onko hihnassa vain yksi sauma kuten mittaustulokset antavat ymmärtää, vai kahdeksan kuten valmistaja ilmoittaa. Tämä siitä syystä, koska mittaustulos korreloi vahvasti valmistajan ilmoittaman sauman kanssa. Jos tuloksena on, että saumoja on kahdeksan, voidaan pyörrevirta-anturia silti pitää vartenotettavana vaihtoehtona tahdistuksen määrittelyyn. Tämä ratkaistaan sillä, että hihnan pintaan valmistetaan koverrus. Tällöin tarkalla pyörrevirta-anturilla voitaisiin havaita tämä pieni hihnan pinnan tasaisuudessa oleva poikkeama. Koverruksen syvyys ei saa olla liian suuri, jotta hihnan kestävyysominaisuudet eivät kärsisi. Toisaalta koverruksen on oltava tarpeeksi syvä, jotta se aiheuttaisi tarpeeksi suuren muutoksen signaalissa. Laskennallisesti voidaan arvioida tarvittavaa syvyyttä, jos tiedetään anturin herkkyys sekä haluttu signaalipiikin koko.

Tahdistuksen mittaaminen optisella valokennolla edellyttää, että hihnaan tehdään siinä luotettavasti pysyvä mittauspiste. Mittauspisteen on säilytettävä mattamusta pintansa koko hihnan käyttöajan, jotta valokennon käyttö mittauksissa toimisi. Tästä syystä, jos valokennon käyttöön päädytään, on varmistettava valmistustapa, jolla piste saadaan pysymään teräshihnassa. Kestotestit on suoritettava erilaisille merkitsemistavoille. Myös valokennon linssin suojaamiseksi lialta on tehtävä jotain, jotta luotettava toiminta varmistuu ajan kuluessa.

Hihnan tarkan pyörimistaajuuden selvittämisen jälkeen on syytä tarkistaa hihnan nykyisen kunnonvalvonnan riittävyys vian havainnoinnissa. Kun tahdistus on saatu toimimaan, pystytään nykyiselle kunnonvalvontasignaalille tekemään tahdistettu aikakeskiarvoistus. Keskiarvoistuksen ansiosta on mahdollista, että nykyisellä järjestelmällä voidaan tunnistaa viat aikaisemmassa vaiheessa tarpeellisella tarkkuudella. Näin ollen tuotantolaitteessa tarvittavan elektroniikan sekä kytkettävien anturien määrä ei kasva merkittävästi nykyisestä. Näin saadaan järjestelmä pysymään yksinkertaisena ja kustannustehokkaana.

LÄHDELUETTELO

- [1] Halmari E., Viljanmaa M. : ValZone metal belt calender starts a new era in calendering, Artikkel, Metso Paper Customer Magazine "Fiber & Paper" 3/2006
- [2] Helber H. D. : The Steel Belt Book, Sandvik Process Systems GmbH, 1993
- [3] Sähköturvallisuuden edistämiskeskus, <http://www.sahkoturva.info/>, Viitattu 10.10.2007
- [4] <http://www.metsoautomation.com/>, Viitattu 22.03.2007
- [5] Sensodec 6S OnLine Help v. 4.0, Metso Automation 2006
- [6] Proakis J. G., Manolakis D. G. : Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, 1996
- [7] Shull P. J. : Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications, 2002
- [8] HyperPhysics, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>, Viitattu 29.05.2007
- [9] Molecular Expressions: Electricity and Magnetism, <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/index.html>, Viitattu 05.06.2007
- [10] Bray D.E., McBride D. : Nondestructive Testing Techniques, 1992
- [11] Le Contrôle Industriel, <http://www.precivision.com/en/acc.php>, Viitattu 19.06.2007
- [12] NDE/NDT Resource Center, <http://www.ndt-ed.org/>, Viitattu 19.06.2007
- [13] eFunda: The Ultimate Online Reference for Engineers, <http://www.efunda.com/>, Viitattu 13.07.2007
- [14] Khan S. H., Ali F., Iqbal M. A., Nusair Khan A. : Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reductions, <http://www.ndt.net/>, Viitattu 13.07.2007

- [15] Ifm Efector; Inductive proximity sensors, <http://www.ifmefector.com>, Viitattu 29.05.2007
- [16] ABB; Inductive sensors, <http://www.abb.com/>, Viitattu 31.05.2007
- [17] IPF Electronic, <http://www.ipf-electronic.de/>, Viitattu 03.07.2007
- [18] Siemens Energy & Automation, <http://www2.sea.siemens.com/>, Viitattu 05.07.2007
- [19] Kinney T. A., Duval B. : Sensors 101: Baumer electric basics, <http://www.baumerelectric.com/>, Viitattu 20.07.2007
- [20] MeasureCentral.com : Semiconductor Laser Displacement Sensors, <http://www.measurecentral.com/>, Viitattu 17.07.2007
- [21] Backman J. : S-89.410 Sähköakustiikka, Opetusmoniste, http://www.acoustics.hut.fi/teaching/S-89.3410/sahkoaku_2006.pdf, Viitattu 25.06.2007
- [22] Alten S.R. : Audio in Media, 7th Edition, 2005
- [23] Brüel & Kjaer : Microphone Handbook Vol. 1: Theory
- [24] Media College, <http://www.mediacollege.com/>, Viitattu 29.06.2008
- [25] Streicher R. : Choosing the Right Microphone, Rycote Articles, <http://www.rycote.com/>, Viitattu 02.07.2008
- [26] Brüel & Kjaer Handbooks & Lectures: Lecture Note: Measuring Microphones
- [27] Engdahl T. : Simple Microphone Preamplifier, <http://www.tkk.fi/Misc/Electronics/>, Viitattu 25.06.2007
- [28] Nymand, M.: How to read microphone specifications, <http://www.dpamicrophones.com/>, Viitattu 28.06.2007
- [29] Valentino M.: Microphone Handbook, <http://www.pcb.com/>, Viitattu 02.07.2007

- [30] TÜV NORD Group : Eddy Current Testing of Power Equipment,
<http://www.tuev-nord.de/>, Viitattu 17.07.2007
- [31] Buckley J. M.: An Introduction to Eddy Current Testing – Theory and
technology, <http://joe.buckley.net/>, Viitattu 19.07.2007
- [32] MTI instruments : Non-contact Displacement Measurement Using Inductive
(Eddy Current) Sensors, <http://www.mtiinstruments.com/>, Viitattu
12.07.2007
- [33] DEWETRON: Dewetron Data Acquisition Solutions,
<http://www.dewetron.com/>, Viitattu 08.08.2007