

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Markku J. Niemelä

**TEOLLISUUSPROSESSIEN SIGNAALIEN
AUTOMAATTINEN ANALYSOINTI**

Työn tarkastajat:

Professori Olli Pyrhönen

TkT Tuomo Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Markku J. Niemelä

Teollisuusprosessien signaalien automaattinen analysointi

Diplomityö

2011

86 sivua, 39 kuvaa ja 4 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Olli Pyrhönen

TkT Tuomo Lindh

Ohjaajat: DI Sampo Luukkainen, Stora Enso Oyj

TkT Tuomo Lindh

Hakusanat: aika-taajuusanalyysi, stokastinen signaalianalyysi, värähtelyn havaitseminen

Keywords: time-frequency analysis, stochastic signal analysis, oscillation detection

Diplomityössä kehitettiin menetelmiä teollisuusprosessien signaalien automaattiseen havainnointiin ja luotiin työkalu tulosten esittämiseen. Työn tarkoituksena on nopeuttaa ja helpottaa prosessin ongelmien ratkaisua luokittelemalla signaalit matemaattisten menetelmien avulla.

Koska prosessin mittaussignaalit ovat pääasiassa stokastisia, eli niitä ei voida etukäteen ennustaa, käsitellään signaaleita tilastomatematisin keinoin. Työstä rajattiin mittaushistorian käyttö, joten värähtelyiden tunnistus toteutettiin taajuusanalyysin avulla. Korrelaation avulla löydetään samankaltaiset signaalit.

Testeissä todettiin, että työssä kehitetyt havainnoinnit toimivat eri näytteenottotaajuuksilla ja työkalun suoritusnopeus todettiin hyväksi. Lopuksi esiteltiin todellinen teollisuusprosessin ongelma ja siihen mahdollisia ratkaisuja.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

Department of Electrical Engineering

Markku J. Niemelä

The automatic analysis of signals in industrial processes

Master's thesis

2011

86 pages, 39 figures and 4 tables

Examiners: Professor Olli Pyrhönen

D.Sc. Tuomo Lindh

Supervisors: M.Sc. Sampo Luukkainen, Stora Enso Oyj

D.Sc. Tuomo Lindh

Keywords: time-frequency analysis, stochastic signal analysis, oscillation detection

This master's thesis presents the methods developed for the automatic observation of signals in industrial processes. A tool was created to report the observation results. The purpose of this study is to make the solving of problems in the process quicker and easier by categorizing the signals with various mathematical methods.

Process signals are handled by statistical mathematic means due to their mainly stochastic, randomly determined nature. The use of measurement history was excluded from this research. Therefore the detection of vibrations was carried out with frequency analysis. Corresponding signals are found by means of the correlation method.

The methods of observation developed during this research function on different sampling frequencies and the performance speed of the tool proved to be viable. The final part of this study presents the true problem in the industrial process as well as possible solutions.

ALKUSANAT

Diplomityön mahdollistivat Lappeenrannan teknillisen yliopiston tukisäätiö ja Stora Enson Pulp Competence Centre. Haluan kiittää kaikkia Imatran tutkimuskeskuksen työntekijöitä mukavasta, työntäyteisestä kesästä. Erityisesti haluan kiittää ohjaajaani, DI Sampo Luukkaista, kaikesta siitä mitä hän teki työni eteen.

Kiitoksen ansaitsevat myös työn tarkastajat professori Olli Pyrhönen ja tutkijaopettaja Tuomo Lindh. Kehitys- ja seurantapalavereissa antamat ideat, ohjaukset ja neuvot varmasti näkyvät työn lopputuloksessa. Isääni, dosentti Jorma Niemelää, kiitän arvokkaista vinkeistä ja sisartani, fil.maist. Maija Niemelää, englanninkielisen tiivistelmän tarkistamisesta.

Lisäksi haluan kiittää lämpimästi vaimoani Johanna.

Lappeenrannassa 20.9.2011

Markku J. Niemelä

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	9
2 DIGITAALINEN SIGNAALIEN KÄSITTELY.....	12
2.1 Signaali.....	13
2.2 Tilastolliset signaalin analysointimenetelmät	14
2.3 Taajuusanalyysi.....	16
2.3.1 DTFT, DFT ja FFT.....	17
2.3.2 Aika-taajuusanalyysi	18
2.4 Signaalin suodatus.....	20
3 WEDGEN LISÄOSAN TOTEUTUS.....	25
3.1 Ohjelman rakenne	26
3.2 Havainnointien merkkkaus binäärikoodilla	31
3.3 Signaalien tunnistaminen säännönmukaisilla lausekkeilla	31
4 ANALYSOINNIN MATEMAATTISET TESTIT.....	33
4.1 Suodatinsuunnittelu.....	34
4.2 Vakiotasolla ja keskiarvo on nolla	36
4.3 Muuttunut 2-20 kertaa	37
4.4 Keskiarvo negatiivinen ja osa arvoista negatiivisia	38
4.5 Nouseva tai laskeva.....	38
4.6 Suhteellinen hajonta suuri tai pieni	38
4.7 Taso muuttuu jaksolla	39
4.8 Löytyy samankaltaisia.....	40
4.9 Puuttuva tieto	40
4.10 Sisältää NaN.....	41
4.11 Tasomaisia muutoksia	42
4.12 Suuret ääriarvot	43
4.13 Leikkautuu ääriarvoihin	45
4.14 Värähtelyt.....	46
4.15 Jatkuvat värähtelyt	57

5 KEHITETTYJEN MENETELMIEN TESTAUS	63
5.1 Aikavälin vaikutus mittaustuloksiin.....	65
5.2 Eri menetelmien laskennan vaikutus suoritusaikaan.....	66
5.3 Ongelma integraatin lopputuotteen laadussa	68
5.3.1 Lopputuotteen valmistusprosessi.....	69
5.3.2 Raaka-aineen valmistusprosessi	74
5.3.3 Lopputulos.....	77
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	78
6.1 Jatkokehityskohteet	80
6.2 Tulevaisuuden automaatiojärjestelmä.....	81
7 YHTEENVETO	83
LÄHDELUETTELO	84

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Symbolit

a, b	suodattimen kertoimet
c	kovarianssi
D	suhteellinen hajonta
E	odotusarvo
f	taajuus
F	Fourier-muunnettu, signaali taajuustasossa
H	taajuusvaste
i, j, k, n, N, p	kokonaislukumuuttuja
j	imaginääriluku
m	keskiarvo
p	todennäköisyys
S	spektrogrammi
t	aika
w	diskreetti aika
x, X	signaali
γ	ikkunafunktio
δ	rippeli
ρ	korrelaatio
σ	hajonta
ω	kulmataajuus

Alaindeksit

i, k, m	kokonaislukumuuttuja
n	normalisoitu
p	päästökaista
s	näyte, estokaista
x, y	signaali

Lyhenteet

CSS	Cascading Style Sheets
CSV	Comma-Seperated Values
DCT	Discrete Cosine Transform, Diskreetti Cosini-muunnos
DFT	Discrete Fourier Transform, Diskreetti Fourier-muunnos
DHT	Discrete Hartley Transform, Diskreetti Hartley-muunnos
DTFT	Discrete-time Fourier Transform, diskreettiaikainen Fourier-muunnos
DWT	Discrete Wavelet Transform
FFT	Fast Fourier Transform, Nopea Fourier-muunnos
FIR	Finite Impulse Response
HTML	Hypertext Markup Language
IIR	Infinite Impulse Response
NaN	Not a Number
PCC	Pulp Comptence Centre
PDF	Portable Document Format
PEM	Prediction-Error identification
PHP	PHP: Hypertext Preprocessor
SPC	Statistical Process Control, Tilastollinen prosessinohjaus
STFT	Short-time Fourier Transform, Ikkunoitu Fourier-muunnos

1 JOHDANTO

Tuotantolaitoksista löytyy satoja mittauslaitteita ja toimilaitteita ohjaavia säätöpiirejä, jotka tuottavat signaaleja tuotantolaitoksien tietokantoihin. Integroidussa sellu- ja paperitehtaassa voi olla jopa 40 000 eri signaalia tallennettuna prosessitietokantaan. Prosessien toimintaa ohjataan, seurataan ja analysoidaan näiden tietokantaan tallentuneiden tietojen perusteella.

Tässä diplomityössä kehitetään signaalianalyysimenetelmiä, joiden avulla tuotantolaitosten tuottamaa tietoa analysoidaan automaattisesti pyrkimyksenä löytää prosessin häiriö-, ongelma- ja vikakohtia. Työn yhteydessä luodaan työkalu, jonka avulla tulokset voidaan esittää selvästi ja jäsennellysti.

Työn tavoitteena on ensinnäkin löytää esitystapa, jolla prosessista löydetyt havainnot pystytään koostamaan niin, että ne ovat nähtävissä yhdellä silmäyksellä yleisnäkymässä. Toiseksi esitystavan on myös mahdollistettava, että käyttäjän niin halutessa, virhealueeseen oleellisesti liittyvät jatkokäsittelyyn tarvittavat tiedot on helposti saatavilla. Kolmanneksi tavoitteeksi asetettiin hyvä suorituskyky, jotta työkalun avulla voidaan ajaa suuria signaalimääriä kohtuullisessa ajassa. Työn yhteydessä luotavan työkalun avulla voidaan käsitellä suurempia signaalijoukkoja automaattisesti ja prosessin ongelmakohdat havaitaan nopeammin ja syyn paikallistaminen sekä ratkaiseminen helpottuvat.

Työkalu toteutetaan lisäosana Savcor Forest Oy:n Savcor Wedge -ohjelmaan. Savcor Wedge, lyhyesti Wedge, on prosessidiagnostiikkaan kehitetty ohjelmisto. Ohjelma mahdollistaa signaalien silmämääräisen ja tilastollisen tarkastelun sekä signaalien matemaattisen käsittelyn. Ohjelma sisältää myös erikoisominaisuuksia, joiden avulla voidaan analysoida yksittäistä signaalia tai signaalijoukkoa tarkemmin. Wedge ei kuitenkaan esikäsittele tai lajittele tietoa millään tavalla, vaan se on vain työkalu prosessin toiminnan havainnointiin ja analysointiin.

Työn tarkoitus ei ole korvata tai vähentää henkilöitä, jotka työskentelevät prosessien kehittämisen ja kunnossapidon parissa, vaan varustaa heidät apuvälineellä, jonka avulla voidaan analysoida suurempia määriä signaaleita ja näin laajentaa vikojen ja ongelmien havainnointien määrää. Työkalun avulla pyritään antamaan käyttäjälle valmiiksi esikäsiteltyä, jäsenneltyä tietoa ja näin nopeuttamaan prosessin analysointia ja lisäämään tietämystä itse prosessista.

Viat ja ongelmat, joita ei havaita ajoissa, voivat aiheuttaa tuotannossa hävikkiä ja katkoksia, energian tuhlausta tai pahimmillaan tehtaan alasajon. Suunnittelematon seisokki voi aiheuttaa päivässä 200 000 € liiketappion (Pöllänen, 2007). Prosessin ja koko tuotantolaitoksen signaalien onnistuneella ja tehokkaalla havainnoinnilla voidaan sekä tehdä jatkuvaa tehtaan suorituskyvyn optimointia, että puuttua ongelmiin ajoissa ja ennaltaehkäisevästi, saaden näin suora taloudellinen hyöty.

Prosessiteollisuudessa laajasti käytössä olevassa tilastollisessa prosessinohjauksessa (SPC) keskitytään prosessin eri vaiheiden laadun tarkkailuun tilastollisten poikkeamien havainnoinnin avulla. Virheen löydyttyä ryhdytään toimenpiteisiin laadun parantamiseksi. Työssä pyritään löytämään menetelmiä, jotka havainnoivat mahdollista laadun heikkenemistä ennen kuin se näkyy merkittävästi lopputuotteen laadussa.

Tutkimus tehdään Stora Enson Pulp Competence Centrelle (PCC) eli siinä keskitytään paperiteollisuuteen ja erityisesti sellun tuotantoprosessin signaaleihin. Työn suunnittelu-, toteutus- ja testausvaiheessa hyödynnetään Stora Enson eri tuotantoyksiköiden signaaleja. Työssä esitetyissä signaaleissa on arvoasteikko poistettu tai muutettu Stora Enson pyynnöstä.

Wedge mahdollistaa todellisten signaalien käytön tutkimuksen tekemiseen ja menetelmien testaukseen. Tutkimuksessa pyritään keräämään mittauksia erilaisten virhetilanteiden

ympäriä ja käyttämään näitä signaaleita pohjana havainnointikeinojen kehityksessä. Työssä on mahdollista käyttää pitkää mittaushistoriaa, mutta työssä rajataan havainnointien teko Wedgessä valittuun aikaväliin ja aikatasoon. Myöskään mittausten yksikköä ei hyödynnetä analyyseissä vaikka se on tiedossa.

Työssä signaalit lajitellaan tilastomatematiikan tunnuslukujen perusteella. Ongelmien havainnointiin käytetään signaalien käsittelyssä yleisesti tunnettuja menetelmiä, kuten suodatusta, taajuusanalyysiä sekä aika-taajuusanalyysiä.

Ohjelmallisessa toteutuksessa pyritään käyttämään mahdollisimman paljon valmiita ja avoimia ohjelmakirjastoja, koska tutkimuksen painopiste on signaalien analysointimenetelmien kehittämisessä eikä tulosten esittämismenetelmien toteutuksessa. Valmiin ohjelman tulisi olla rakenteeltaan sellainen, johon on helppo myöhemmin lisätä uusia matemaattisia signaalien havainnointimenetelmiä.

2 DIGITAALINEN SIGNAALIEN KÄSITTELY

Signaalinkäsittelyä voi soveltaa monella eri tavalla. Aumalan mukaan on viisi erilaista tapaa hyödyntää signaalianalyysiä: paljastaa kohteessa kehittyvä vika ennen kuin varsinaista vahinkoa ehtii tapahtua, tutkia ilmiöiden vuorovaikutuksia ja niiden etenemistä, etsiä keino erottaa hyötysignaali häiriöstä ja identifioida fysikaalisen prosessin matemaattinen malli sekä seurata järjestelmän toimintatilaa. (Aumala, 1989)

Aumala luettelee kolme tarkoituksesimerkkiä signaalinkäsittelylle: toimintatilan määrittäminen, järjestelmän mallintaminen sekä diagnostiikka. Työssä keskitytään diagnostiikan tarkoitukseen eli pyritään häiriölähteen paikallistamiseen, vaikutustieanalyysiin, kunnan valvontaan ja huoltotarvearviointiin. (Aumala, 1995)

Prosessitietokantaan tallentuva mittaustieto on diskreettiä, eli tieto alkuperäisestä signaalista on saatavilla vain tietyillä ajanhetkillä. Wedgen hakiessa valitun aikavälin signaalin tiedot prosessitietokannasta, tieto on keskiarvotettua. Wedgessä valittu aikataso määrää keskiarvoituksen pituuden ja myös näytteistystaajuuden. Näytteistystaajuus on näytteenottovälin käänteisarvo. Signaalin näytteiden määrä, eli tutkittava aikaväli, on valittavissa Wedgestä.

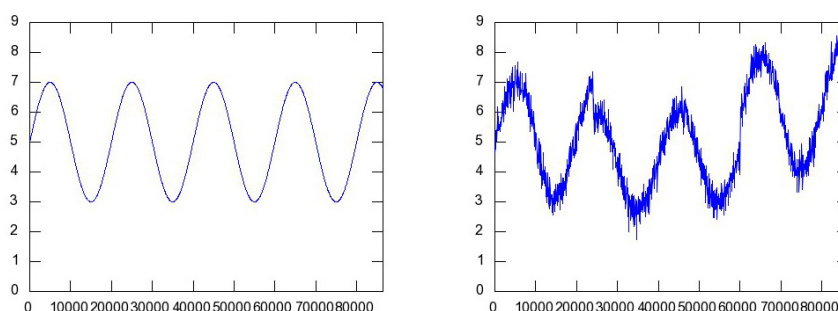
Signaalianalyysiä voidaan tehdä kolmessa eri tasossa. Amplituditasossa analyysi tuottaa tietoa signaalin jakaumasta, aikatasossa tarkastellaan signaalin lineaarista korrelaatiota toisen tai saman signaalin eri ajanhetkien kanssa ja taajuusanalyysissä tarkastellaan signaalin taajuusominaisuuksia (Aumala, 1989). Tasoja voi myös yhdistellä ja tutkia esimerkiksi signaalin sisältämiä taajuuksia tietyssä aikaikkunassa. Koska työssä käsitellään vain diskreettejä signaaleja, tässä osuudessa esitetään käytettävien menetelmien diskreeteille signaaleille johdetut yhtälöt.

2.1 Signaali

Matemaattinen signaalien analysointi ja käsittely vaatii matemaattisen kuvauksen signaalista itsestään. Signaalin matemaattisen kuvauksen, jota kutsutaan myös signaalimalliksi, avulla voidaan signaalit jakaa kahteen luokkaan. Signaalit ovat joko deterministisiä tai stokastisia. (Proakis, 1996)

Deterministiset signaalit ovat sellaisia, jotka ovat toistettavissa eli ne voidaan ilmaista eksplisiittisesti. Deterministisillä signaaleilla on joko eksplisiittinen matemaattinen kuvaus, arvotaulukko tai hyvin määritelty sääntö. Kaikki determinististen signaalien arvot tiedetään menneestä, nykyisestä ja tulevasta hetkestä. (Proakis, 1996)

Käytännön sovelluksissa, kuten paperiteollisuudessa, mittaussignaaleja ei voida pitää deterministisinä. Signaaleja ei voida luotettavalla tarkkuudella mallintaa matemaattisesti ja jos voitaisiin, se ei olisi käytännöllistä. Signaalianalyysin kannalta paperiteollisuuden mittaussignaaleita on käsiteltävä satunnaisina, eli stokastisina signaaleina. Stokastisia signaaleja voidaan kuvata ainoastaan tilastollisten ominaisuuksien avulla ja ne ovat toistettaessa merkittävästi erilaisia (Aumala, 1989).



Kuva 1. Kuvassa vasemmalla on deterministinen sinimuotoinen signaali. Siitä voidaan määrittää signaalin taso, amplitudi ja taajuus. Oikealla on stokastinen signaali, joka sisältää satunnaisia komponentteja eli se ei ole toistettavissa vaikka sisältääkin sinisignaalin.

Signaaleista on tietokantaan tallennettu, mittausdatan lisäksi, mitattava yksikkö sekä mittauksen nimi, positio ja tietolähde. Nämä tiedot antavat yksityiskohtaisen tiedon siitä mitä ja missä mittaus sijaitsee. Signaaleita automaattisesti käsiteltäessä, toteutuksessa ei

ole käytössä tietämystä siitä, mitä mittarin ympärillä tapahtuu, eikä ole mahdollista luoda tarpeeksi tarkkaa mallia, jotta voitaisiin ennustaa, miten signaali jatkuu valitun signaalijonon jälkeen. Tästä syystä mittauksia on analysoitava stokastisin menetelmin eli signaalien tarkastelu on tehtävä tilastollisia menetelmiä hyväksi käyttäen (Aumala, 1989).

2.2 Tilastolliset signaalin analysointimenetelmät

Diskreetti signaali voidaan kuvata näytejonona $x(n)$, joka vastaa analogista signaalia $x(t)$, mutta diskreetissä signaalissa n on kokonaisluku eli signaali kuvataan vain tiettyinä ajanhetkinä.

Signaalia analysoitaessa sen keskiarvo ja hajonta ovat hyvin tärkeät suureet kuvaamaan signaalia. Keskiarvo eli odotusarvo on esitetty yhtälössä (1) ja hajonta yhtälössä (2). Myös mediaani, eli järjestetyn joukon keskimäinen alkio, on hyödyllinen tilastollinen arvo kuvaamaan signaalia. Matlabissa mediaanin saa laskettua funktiolla `median()`.

Keskiarvo on summa signaalin näytteistä, jotka ovat kerrottu niiden todennäköisyydellä. Matlabissa keskiarvon laskemiselle on funktio `mean()`. Hajonta on summa signaalin näytteistä, joista on vähennetty keskiarvo ja se kerrottu näytteen todennäköisyydellä. Funktio `std()` laskee hajonnan Matlabissa. Signaalin yhden näytteen todennäköisyys on signaalin sisältämien näytteiden kokonaismäärän käänteisluku. Näiden kahden tunnussuureen avulla voidaan saada jo kohtalaisen tarkka kuva signaalin amplitudiominaisuuksista.

$$m_x = E[x] = \sum_i X_i p_i \quad (1)$$

$$\sigma_x = E[(x - m_x)] = \sum_i p_i (X_i - m_x) \quad (2)$$

Keskiarvo kuvaa signaalin tasoa ja hajonnan avulla tiedetään kuinka laajalle amplitudialueelle signaali on jakautunut. Näiden kahden suureen avulla voidaan laskea suhteellinen hajonta tai hajonnan indeksi, joka on signaalin hajonnan ja keskiarvon suhdeluku. Suhteellisen hajonnan avulla signaaleita voidaan analysoida ja verrata keskenään ilman, että otetaan huomioon signaalien yksiköitä tai amplituditasoja. Suhteellinen hajonta saadaan yhtälöstä (3). Suhteellinen hajonta voidaan myös ilmoittaa keskiarvon ja varianssin, eli hajonnan neliön, suhdelukuna.

$$D = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (3)$$

Jos halutaan tutkia usean signaalin vuorovaikutusta toisiinsa, voidaan laskea kahden signaalin välinen korrelaatiokerroin. Usean signaalin tapauksessa korrelaatiokertoimet voidaan laskea matriisina. Korrelaatiokerroin saa arvon väliltä $[-1,1]$ ja riippuen etumerkistä, korrelaatio on joko positiivinen tai negatiivinen. Mitä suurempi korrelaatiokertoimen itseisarvo on, sitä parempi yhteneväisyys signaalien välillä on. Kahden signaalin välinen korrelaatio lasketaan yhtälöllä (4) eli korrelaatio on kahden signaalin välinen kovarianssi jaettuna hajontojen tulolla.

$$\rho_{X,Y} = \frac{c_{X,Y}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4)$$

Kovarianssi lasketaan yhtälöllä (5), jossa odotusarvot lasketaan yhtälöllä (1).

$$c_{X,Y} = E[(X - E[X])(Y - E[Y])] \quad (5)$$

Huomattavaa on, että korrelaatiokerroimen avulla voidaan vertailla vain signaalien samankaltaisuutta eli korrelaatiokerroin ei tutki signaalien syy-seuraus-suhdetta vaan ainoastaan antaa arvion kertoimen muodossa, kuinka yhtenevät signaalit ovat toisiinsa nähden. Vaikka korrelaatio ei tutkikaan kausaalisuutta, menetelmän avulla on helppo löytää signaaleita, joiden välillä on kausaalisuussuhde.

Korrelaatio voidaan myös laskea signaalille itselleen, jolloin laskentaa kutsutaan autokorrelaatioksi. Autokorrelaation avulla voidaan tutkia signaalista toistuvia ilmiöitä. Se toimii myös valkoisen kohinan määrän mittarina (Aumala, 1995).

2.3 Taajuusanalyysi

On neljä erilaista syytä tutkia signaalin spektriä tai taajuutta: spektrianalyysin käyrämuodosta voidaan oppia signaalista, signaalin eteneminen aineessa riippuu taajuudesta, signaalin hajottaminen spektriä yksinkertaistaa signaalin rakenteen ja Fourier-analyysi on tehokas matemaattinen työkalu ratkaista differentiaaliyhtälöitä (Cohen, 1995). Syistä ensimmäinen on se, miksi signaalianalyysiä käytetään prosessin signaalien havainnoinnissa.

Taajuuksien analysointiin on olemassa monta eri menetelmää. Menetelmiä diskreetin signaalien taajuuksien laskentaan ovat Fourier muunnos (DFT) ja sille läheiset cosini-muunnos (DCT) sekä Hartley (DHT), Haar ja Hadamard muunnokset (Oppenheim, 1999). Ensin mainittu on hyvin yleinen ja sen laskennallisesti tehokas versio FFT, eli nopea Fourier-muunnos, on toteutettu valmiiksi Matlabiin. Matlabin `fft()` -funktio laskee signaalille Fourier-muunnoksen.

2.3.1 DTFT, DFT ja FFT

Diskreetti Fourier-muunnos perustuu diskreettiaikaisen Fourier-muunnoksen (DTFT) yhtälöön (6), joka on määritelty äärettömän pituiselle aikasarjalle.

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (6)$$

Diskreettiaikaista Fourier-muunnosta ei voida kuitenkaan käyttää rajatulla aikavälillä, joten on käytettävä Fourier-sarjakehitelmää, joka on esitetty yhtälössä (7). Tätä menetelmää kutsutaan Diskreetiksi Fourier-muunnokseksi eli DFT:ksi ja se tehdään N näytemäärälle. Muunnoksen taajuusresoluutioksi Δf tulee näyteenottotaajuus jaettuna näytemäärällä (Aumala, 95).

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{2\pi}{N}kn} \quad (7)$$

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (8)$$

DFT on tehokas tapa määrittää signaalin taajuussisältö, mutta laskennallisesti se on hyvin raskas. DFT vaatii N^2 kompleksista kertolaskutoimitusta ja N^2-N kompleksista summausta. Digitaalisesti laskettaessa kompleksisia kertolaskuja, vaaditaan neljä reaalista kertomista ja kaksi reaalista summausta, joten kokonaisuudessaan DFT:n laskeminen vaatii $4N^2$ aritmeettista operaatiota. (Kuo, 2001)

Cooley and Tukey esittelivät vuonna 1965 Fast Fourier Transform -menetelmän (FFT), jossa DFT:n laskeminen jaetaan pienempiin DFT laskuihin ja siten yksinkertaistetaan ja

nopeutetaan laskentaa (Heideman, 1984). On menetelmiä, jotka perustuvat näytemäärän kahden potenssiin eli $N = 2^p$, kuten radix-2, radix-4 ja split-radix sekä menetelmiä, joissa N ei ole kahden potenssi, kuten Good-Thomas ja Winograd. Kahden potenssin laskentamenetelmässä mahdollistetaan DFT:n yhtälön eksponentin laskennan symmetria, jolloin eksponenttia ei tarvitse joka kerta laskea uudestaan ja tarvittavien laskutoimitusten määrää saadaan vähennettyä merkittävästi. Muissa menetelmissä laskettava signaali $x(n)$ hajotetaan pienempiin, helpommin laskettaviin, aliarvosarjoihin, jolloin DFT:n laskentaa voidaan nopeuttaa.

Jos laskettavan DFT:n alioperaatioiden näytemäärän pituus on kahden potenssi, on laskenta tehokkaimmillaan, jolloin tarvitaan vain $2Np$ kertolasku- ja summausoperaatiota (Aumala, 1995). DFT:llä operaatioiden määrä on N^2 ja FFT:llä $M \log_2 N$ (Kuo, 2001).

2.3.2 Aika-taajuusanalyysi

FFT:n avulla saadaan tietoon mitä taajuuksia signaali sisältää ajassa, jonka signaalin kesto määrittää. Se ei kuitenkaan kerro, milloin nämä taajuudet esiintyivät tai esiintyvätkö ne koko signaalin keston ajan. Signaalia on tutkittava aika-taajuusanalyysien avulla jos halutaan paremmin tietoa signaalin sisältämistä taajuuskomponenteista. Aika-taajuuskuvaukset, kuten spektrogrammit, scalogrammit tai bilineaariset esitykset, kuten Wigner ja tasoitettu Wigner jakaumat, ovat yleisesti käytössä signaalianalyysissä. Menetelmiä käytetään tutkimaan signaalin taajuussisältöä eri ajan hetkillä.

Spektrogrammin avulla voidaan tarkastella signaalia ajan ja taajuuden funktiona. Tällöin taajuus analysoidaan käyttäen Short-time Fourier Transform -menetelmää (STFT), jossa signaali ikkunoidaan aikatasossa ja ikkunalle lasketaan Fourier-muunnos. Diskreetti STFT määritellään yhtälön (9) mukaan.

$$F_x^\gamma(w, e^{j\omega}) = \sum_n x(n) \gamma^*(n - wf_s) e^{-j\omega n} \quad (9)$$

Yhtälössä (9) lasketaan signaalin $x(n)$, ikkunafunktion γ kompleksikonjugaatin ja eksponenttiosan konvoluutiosumma. Diskreetin ajan w ja näytteenottotaajuuden f_s tulo on oltava kokonaisluku ja siksi ne usein merkitään yhdeksi muuttujaksi. Koska STFT on yleensä kompleksinen, signaalia tutkitaan sen neliönä, eli niin sanottuna spektrogrammina (Mertins, 1999). Spektrogrammi määritellään yhtälön (10) mukaan.

$$S_x(w, e^{j\omega}) = |F_x^\gamma(w, e^{j\omega})|^2 \quad (10)$$

STFT on hyvin käyttökelpoinen menetelmä tutkia signaalin taajuusominaisuuksia. STFT:n ongelmana on ikkunoinnin koon määrittäminen. Ikkunan leveydestä riippuu, painottuuko havainnointi aikaan vai taajuuteen. Ikkunan kokoa määrittäessä pitää tehdä kompromissi kuinka hyvin muutokset ja epäjatkuvuudet on havaittavissa tai kuinka tarkasti pitkän aikavälin käyttäytyminen voidaan havaita (Vetterli, 1992).

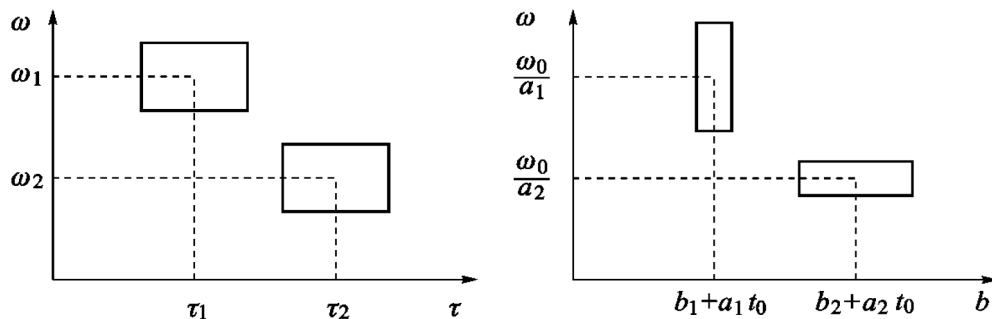
Pidempi ikkuna tuottaa pienemmän aikaresoluution ja suuremman taajuusresoluution. Ikkunan tehtävä on saada signaalista aika-ikkuna, jonka aikana taajuusominaisuudet ovat lähes vakiot. Jos ikkuna on liian pitkä, se ei onnistu havaitsemaan nopeimpia muutoksia. Jos ikkuna on liian lyhyt, se sotkee aika-taajuusanalyysin taajuusavaruuden ilman, että se parantaa aika-avaruuden resoluutiota. Mitä nopeammin taajuussisältö muuttuu, sitä lyhyempi ikkunan pitää olla (Boashash, 2003).

Koska STFT on menetelmänä yksinkertainen ja sillä on hyvä suorituskyky, resoluutio-ongelmaa on parannettu käyttämällä adaptiivista ikkunaa. Normaalin STFT:n ja adaptiivisella ikkunalla lasketun FFT:n ainoana erona on, että adaptiivisen ikkunan taajuus

ja aika vaihtelee. Edistyneempää menetelmää määrittää taajuudet tietyillä ajanhetkillä, käyttämällä muuttuvaa ikkunaa, kutsutaan digitaaliseksi wavelet-muunnokseksi (DWT).

Wavelet käyttää jakaumia tai prototyypifunktioita luomaan ikkunan, jonka resoluutio on muuttuva, ja näin sillä ei ole STFT:n ikkunakoon resoluutio-ongelmaa. Muuttuvan resoluution avulla saadaan tarkempi aika-taajuuskuvaus.

Adaptiivisella ikkunalla laskettu FFT, Gabor-muunnos ja Wavelet-muunnos perustuvat signaalin jakamiseen erikokoisiin taajuuskaistoihin, joiden taajuudet analysoidaan erikseen. Kuva 2. esittää STFT:n ja Waveletin ikkunoiden eron. STFT:ssä ikkunan koko on vakio ajasta tai taajuudesta riippumatta. Waveletissä ikkunan koko muuttuu ajassa ja taajuudessa.



Kuva 2. Ikkunoiden koot aika-taajuustasossa ovat erilaiset vasemmalla olevan STFT:n ja oikean kuvan Waveletin välillä. Ikkunan koko on vakio STFT:llä ja muuttuva Wavelet-menetelmässä. (Mertins 1999).

2.4 Signaalin suodatus

Suodattimia käytetään muuttamaan signaalin taajuussisältöä. Signaalin suodatuksella voidaan tavoitella esimerkiksi signaalin laadun parantamista, kohinan poistoa, tiedon saamista signaalista, taajuuksien analysointia tai kahden signaalin erottamista, jotka on

aikaisemmin yhdistetty (Kuo, 2001; Proakis, 1996). Suodatintyyppit voidaan jakaa viiteen ryhmään, jotka ovat yli- ja alipäästösuodattimet, kaistanpäästö- ja kaistanestosuodattimet sekä suodattimet, jotka päästävät kaikki taajuudet läpi.

Suodattimet voidaan toteuttaa joko lineaarisina tai epälinearisina. Lineaarinen suodatin on joko äärellisen mittaisella (FIR) tai äärettömän mittaisella (IIR) impulssivasteella. Epälinearisista suotimista mainittakoon mediaanisuodatin, jossa aikasarja käydään näyte näytteeltä läpi ja suodatetun signaalin näytteen arvoksi tulee määrätyn ikkunan sisältämien näytteiden mediaani. Mediaanisuodatin toimii alipäästösuodattimena, joka säilyttää hyvin signaalissa tapahtuvat muutokset, mutta poistaa yksittäiset piikit signaalista. Mediaanisuodatus aiheuttaa signaaliin viivettä mediaani-ikkunan koon puolikkaan verran.

Tarkastellaan lineaarista suodatintyyppiä ja sen suunnittelua. Lineaarisen, aika-invariantin suodattimen yleinen muoto on esitetty yhtälössä (11) ja sen taajuusvaste yhtälössä (12). Jos $N=0$, on suodatin FIR -tyyppinen, muuten se on IIR -tyyppinen.

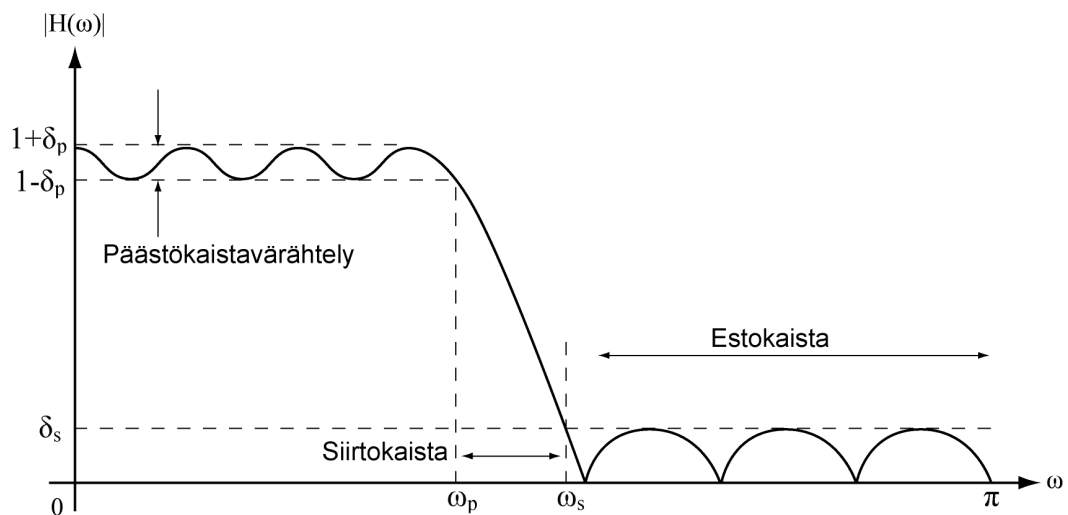
$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{m=0}^M b_m x(n-m) \quad (11)$$

$$H(\omega) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k e^{-j\omega k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k e^{-j\omega k}} \quad (12)$$

Jos suodattimeen ei haluta lineaarista vaihesiirtoa taajuuden suhteen eli vakioryhmäviivettä, on käytettävä FIR-suodatinta, koska IIR-suodatin aiheuttaa epälineaarisen vaihesiirron alkuperäisen ja suodatetun signaalin välille. Jos epälinearisesta vaihesiirrosta ei ole haittaa, on IIR-suodatin parempi vaihtoehto digitaalisissa systeemeissä. IIR-suotimella on matalammat estokaistan sivukeilat ja siinä on vähemmän

parametreja. Se myös vaatii vähemmän muistia ja laskutoimituksia tietokoneelta. (Proakis, 1996)

Reaalisen suodattimen suunnittelu sisältää kolme vaihetta. Aluksi pitää määrittellä suotimelle halutut ominaisuudet. Kuvassa 3. on esitetty alipäästösuodattimen suunnitteluparametrit. Kun tiedetään halutut suotimen ominaisuudet, on ne approksimoitava kausaalisella diskreettiaikaisella systeemillä. Kausaalisessa systeemissä nykyinen arvo on riippuvainen vain nykyisestä arvosta tai aikaisemmista arvoista. Viimeinen vaihe on suodattimen reaalin toteutus. (Oppenheim, 1999)



Kuva 3. Reaalisen suotimen suunnitteluparametrit. Taajuudet ω_p ja ω_s ovat rajataajuudet. Muuttuja δ_p on päästökaistan rippeli desibeleissä ja δ_s on haluttu suodatuksen vaimennus desibeleissä

Idealisella suotimella päästökaistalla signaalin vahvistus on yksi, eli halutut taajuuksien amplitudit säilyvät alkuperäisinä. Estokaistalla vahvistus on nolla, jolloin poistettavat taajuudet täysin häviäisivät. Päästökaistan ja estokaistan välinen siirtokaista tulisi olla olematon eli vahvistus tippuisi ykkösestä nollaan. Reaalisessa suodattimessa nämä eivät ole toteutettavissa kausaalisuuden takia. Kausaalisessa systeemissä taajuusvaste ei voi olla nolla, eli estokaistalle syntyy sivukeiloja. Myöskään siirtokaista ei voi olla olematon eli vahvistus ei voi tippua ykkösestä nollaan. (Proakis, 1996)

Käytännön toteutuksissa täydellisesti ideaalinen suodatin ei ole tarpeen, jolloin sallimalla estokaistalle sivukeilat sekä suotimelle siirtokaista, voidaan suunnitella reaalinen suodatin. Kuvan 3. alipäästösuodattimen peilikuva antaa ylipäästösuodattimen suunnitteluparametrit. Kun suodatinparametrit ovat tiedossa, voidaan valita yhtälön (12) a - ja b -kertoimet, jotka parhaiten approksimoivat määriteltyjen suodatinparametrien mukaista suodatinta.

Suodattimen parametrien pohjalta tehtävän suodatinsuunnittelun voi tehdä monella eri tavalla. Yksi menetelmistä on suunnitella suodatin analogisena ja muuttaa se digitaalseksi. Tämä suunnittelumalli onnistuu kuitenkin vain IIR-suodattimelle, koska FIR-suodattimella ei ole analogista vastaavuutta.

Suodatinta suunniteltaessa on otettava huomioon suodattimen stabiilisuus. Analogisessa napa-nolla-kuvauksessa stabiilin suodattimen navat kuvautuvat vasemmalle puolitasolle. Stabiilissa digitaalisessa suodattimessa navat kuvautuvat yksikköympyrän sisälle.

Suunnittelumenetelmällä, jossa suodatin suunnitellaan ensin analogiseksi ja muutetaan se digitaalseksi, on useita hyötyjä. Jatkuva-aikaisten IIR-suodattimien suunnittelu on hyvin kehittynyttä, jonka voi hyödyntää digitaalista suodatinta suunniteltaessa. Lisäksi jatkuva-aikaisilla IIR-suodattimilla yhtälöt ja approksimaatiomenetelmät ovat sopivia diskreetti aikaisen suodattimen suunnitteluun. (Oppenheim, 1999)

Suodatinsuunnittelun eri menetelmiä on esitelty muun muassa lähteissä (Oppenheim, 1999) ja (Proakis, 1996). Koska suodatin voidaan suunnitella hyvin monella eri tavalla, keskitytään suodattimen toteutukseen. Toteutuksen kautta myös selviää, kuinka suodattimen kertoimien määrittäminen onnistuu Matlabin avulla.

Matlabissa funktiolla `filter()` voidaan suodattaa signaali. Funktiolle annetaan parametreiksi yhtälön (12) a - ja b -kertoimet sekä suodatettavan signaalin vektori. Kertoimet voidaan määrittää syöttämällä kuvasta 3. löytyvät suunnitteluparametrit suodattimien suunnittelufunktioihin, joita Matlabin Signal Processing Toolboxissa on useita. Vastaavat funktiot löytyvät myös Octave Forgesta, joten suodattimen toteutukseen ei tarvita Matlabin Signal Processing Toolboxia, jos suodattimen tarvitsee luoda vain kerran. Octave on GNU-lisensioitu avoin matemaattinen ohjelma, joka on syntaksiltaan lähes sama kuin Matlab ja sillä voi ajaa Matlab-koodia. Octave Forge on myös avoin ja se sisältää valmiita matemaattisia funktioita.

Matlabin Signal Processing Toolboxista ja Octave Forgesta löytyvät Butterworth, elliptinen ja tyyppien I ja II Chebyshev suodatinsuunnittelufunktiot. Optimaalisten kertoimien saamiseksi tarvitaan kahta funktiota. Ensimmäiseen syötetään kuvan 3. suunnitteluparametrit. Suunnitteluparametrien taajuudet normalisoidaan nollan ja yhden välille yhtälöllä (13), jossa f_s on näytteenottotaajuus. Päästökaistavärähtelyn ja estokaistan vaimennuksen arvot annetaan desibeleinä.

$$f_n = \frac{f_s}{2} \quad (13)$$

Kun halutut parametrit on syötetty ensimmäiseen funktioon, paluuarvona saadaan suodattimen minimikertaluku ja halutut rajataajuudet vektorina. Syöttämällä nämä toiseen funktioon, funktio palauttaa a - ja b -kertoimet, jotka toteuttavat halutut suodatinominaisuudet. Saadut kertoimet voidaan sellaisenaan syöttää `filter()` - funktiolle. Suodattimien suunnitteluun käytettäviä funktiopareja ovat `buttord()/butter()`, `ellipord()/ellip()`, `cheblord()/cheby1` sekä `cheb2ord()/cheby2`. Normaalisti suodattimien kertoimien laskentafunktio antaa alipäästösuodattimen kertoimet, mutta lisäämällä suoritettavaan funktioon parametri 'high', saadaan ylipäästösuodattimen kertoimet.

3 WEDGEN LISÄOSAN TOTEUTUS

Signaalien analysointityökalu luotiin Wedgeen sen laajenusominaisuuden avulla. Laajennuksia Wedgeen voi ohjelmoida PHP:llä. Wedgen laajennus on käytännössä www-sivu, joka avautuu Wedgen ikkunaan. Laajennuksen ulkoasua voidaan muotoilla käyttäen HTML:ää ja CSS:ää. Käyttäjäystävällisyyttä sekä dynaamisuutta lisäosaan tuodaan käyttämällä Javascriptiä.

Toteutuksessa hyödynnettiin vapaita Javascript-kirjastoja. Tavoitteeksi oli määritelty, että koko sivua ei tarvitsisi ladata uudestaan jos sivulla olevia tietoja tarvitsee päivittää. Tätä tarkoitusta varten pohjaksi otettiin jQuery, joka on suunniteltu yksinkertaistamaan asiakasohjelmassa tapahtuvaa HTML-ohjelmointia.

Lisäosassa on hyödynnetty myös jQueryUI:ta, joka on jQueryn laajennuskirjasto, jonka avulla saa yhtenäisen ja helposti muokattavan ulkoasun. Sen avulla lisäosan ilmeen saa vaihdettua nopeasti ja vaivattomasti. Suunnitteluvaiheessa ulkoasun värimaailman pohjana käytettiin Stora Enson uuden imago-ohjeen määrittämiä värejä ja yrityksen uutta tunnusta.

Lisäosassa käytetään hyödyksi myös Datatables-laajennusta, joka parantaa taulukoiden luettavuutta mm. sivuttamalla taulukot. Datatablesin avulla voidaan myös suodattaa taulukkoa. Suodatinominaisuus ei pelkästään helpota tietojen tarkastelua, vaan mahdollistaa myös koko lisäosan toiminnallisuuden.

Wedge sisältää Matlab Compiler Runtime -komponentin, jonka avulla lisäosissa voidaan laskea Matlabin peruslaskutoimitukset. Wedge antaa mahdollisuuden myös suorittaa laskenta palvelimella, jonne on asennettu Octave sekä Octave Forge, joka sisältää matemaattisten funktioiden kokoelman.

Lisäosan laskentamoottoriksi valittiin lopulta kuitenkin Matlab, koska se on selvästi nopeampi laskemaan kehitetyt analyysit. Syy selvään nopeuseroon löytyy laskennan suorittavasta tietokoneesta, joka on eri laskettaessa Matlabilla ja Octavella, sekä siitä, että Matlab on toteutettu sisäisesti Wedgeen, jolloin vältytään ylimääräisiltä tiedonsiirroilta. Toteutuksen kannalta helpompi valinta olisi ollut Octave ja Octave Forge, koska siinä on käytössä enemmän signaalinkäsittelyn matemaattisia funktioita.

3.1 Ohjelman rakenne

Kuvassa 4. on kuvankaappaus valmiista lisäosan suomenkielisestä versiosta. Lisäosasta toteutettiin myös englanninkielinen versio ja uusien kielten lisääminen tehtiin helpoksi moniulotteisten muuttujien avulla.

Lisäosan tulosruudun yläreunasta löytyy ajon perustiedot, jotka ilmoittavat valitun aikavälin sekä näytevälin. Yläreunassa on myös tieto, koska raportti on luotu ja kenen toimesta. Yläreunaan sijoitetut tiedot ovat esittämisen kannalta oleellisia. Niiden avulla testi voidaan toistaa, eli avaamaan sama aikaväli samalla aikatasolla Wedgessä, jolloin pystytään signaalit avaamaan ja tarkastelemaan niitä Wedgen tarjoamilla työkaluilla.



12.8.2011 21:00:00 - 16.8.2011 21:00:00
Näytäväli 1 min

Raportti luotu: 10.9.2011 11:58
Käyttäjä: niemema

Automaattinen Signaalien Analysointi

Signaalia (747)	Havainnoidut (343)	Informaatiota (441)
Mittaukset (324)	<ul style="list-style-type: none"> Jatkuva värähtely (3) Puuttuva tieto (3) Suuret ääriarvot (44) Värähtelevä (88) Leikkautuu ääriarvoihin (7) Taso muuttuu jaksolla (38) 	<ul style="list-style-type: none"> Keskisarvo negatiivinen (5) Nouseva tai laskeva (9) Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (14) Tasomaisia muutoksia (16) Vakiotasolla (1) Löytyy samankaltaisia (141) Keskisarvo on nolla (58)
Säädöt (327)	<ul style="list-style-type: none"> Jatkuva värähtely (3) Puuttuva tieto (4) Suuret ääriarvot (54) Värähtelevä (79) Leikkautuu ääriarvoihin (4) Taso muuttuu jaksolla (31) 	<ul style="list-style-type: none"> Keskisarvo negatiivinen (6) Osa arvoista negatiivisia (1) Nouseva tai laskeva (5) Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (18) Tasomaisia muutoksia (1) Vakiotasolla (1) Löytyy samankaltaisia (163) Keskisarvo on nolla (22)
Ohjaukset (30)	<ul style="list-style-type: none"> Jatkuva värähtely (1) Suuret ääriarvot (2) Värähtelevä (10) Taso muuttuu jaksolla (1) 	<ul style="list-style-type: none"> Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (4) Tasomaisia muutoksia (2) Vakiotasolla (3) Löytyy samankaltaisia (11) Keskisarvo on nolla (8)
Muut (66)	<ul style="list-style-type: none"> Puuttuva tieto (20) Suuret ääriarvot (7) Värähtelevä (11) Leikkautuu ääriarvoihin (3) Taso muuttuu jaksolla (9) 	<ul style="list-style-type: none"> Keskisarvo negatiivinen (3) Osa arvoista negatiivisia (1) Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (15) Tasomaisia muutoksia (8) Vakiotasolla (4) Löytyy samankaltaisia (25) Keskisarvo on nolla (4)

Näytä 10 riviä		Hae:	
Havainnot	Nimi	Positio	Yksikkö
	DD1 KIERTOSUODOS 1	HA1_PI007	kPa
	DD1 KIERTOSUODOS 2~^0	HA1_PC006	kPa
	DD1 SYÖTTÖSAKELI	HA1_OI001	%

Kuva 4. Työssä toteutetun Wedge-lisäosan tulosikkunan näkymä, jossa ylimmäisenä on analyysin perustiedot, keskellä analyysien tulokset jaoteltuna ylätauluun ja alimmaisena alataulu, jossa on signaalit lueteltuna.

Jos halutaan antaa käyttäjälle varoitus, tulee varoitustekstin sisältävä punainen laatikko perustietojen alapuolelle. Varoitus annetaan esimerkiksi kun aikataso on suuri ja aikaväli on pieni. Kaikki testit suoritetaan normaalisti varoituksesta huolimatta, tosin testien luotettavuus voi olla heikko. Kuvassa 5. on esitetty perustieto-osa ja varoitustekstilaatikko.



▲ Huomio! Aikataso on liian pitkä verrattuna tarkasteltavaan aikaan. Analyysit eivät ole luotettavia.

Kuva 5. Lisäosan perustieto-osa ja varoitustekstin sisältävä punainen laatikko ilmestyy perustieto-osan alle jos lisäosa antaa varoituksen.

Toiminnallisuutta ja tulosten esittämistä suunniteltaessa päädyttiin kahden taulukon ratkaisuun. Ylemmässä taulukossa on esitetty analyysien tulokset ja alemmassa taulukossa on taulukoituna signaalit ja niiden tiedot. Ylätaulukosta havainnon kohdalta linkkiä painamalla alataulun taulukko päivittyy niin, että siellä näkyy vain ne signaalit, joissa valittu havainto on.

Ylemmässä taulussa analyysien tulokset on lajiteltu kahteen ryhmään: havainnoidut ja informaatiota. Havainnoiduissa olevat havainnot ovat tyypiltään sellaisia, jotka voivat olla prosessin toiminnan kannalta merkittäviä. Informaatiota -ryhmään kuuluvat signaalia kuvaavat havainnot, joista voi olla hyötyä signaaleja tutkittaessa, mutta sinänsä niitä ei voida luokitella haitallisiksi.

Ylätaulukon tiedot on myös jaoteltu positionimen perusteella mittauksiin, ohjauksiin, säätöihin, asetusarvoihin, tila-arvoihin sekä laskennallisiin mittauksiin. Työssä jaottelu positionimien mukaan toteutettiin kahdelle tehtäälle, mutta jaottelumahdollisuus on helposti toteutettavissa muihinkin tehtäisiin edellyttäen positionimien loogisen nimeämisen. Lisäosaa voidaan käyttää myös tehtäissa, joissa ei jaottelua ole toteutettu. Tällöin signaalit jaetaan kahteen ryhmään: muut ja laskennalliset mittaukset. Laskennalliset mittaukset ovat Wedgessä olevia signaaleja, jotka perustuvat toiseen signaaliin, mutta niitä on matemaattisesti käsitelty.

Alempi taulukko toteutettiin käyttäen hyväksi Datatables-laajennuskirjastoa. Datatables muotoilee HTML-taulukon dynaamiseksi taulukoksi, joka näyttää perusasetuksella kymmenen riviä sivulla ja sivuja on mahdollisuus selata. Laajennuskirjaston avulla mahdollistettiin suurienkin signaalimäärien tuominen näkyville ilman, että tulostulosta tulee liian monimutkainen.

Datatablesin ominaisuuksiin kuuluu lisäksi hakuominaisuudet. Hakukentällä voidaan hakea taulukosta tietoa nimestä, positiosta tai yksiköstä. Taulukon alareunasta löytyy myös erilliset hakukentät, joiden avulla voidaan tehdä yksityiskohtaisempia hakuja. Esimerkiksi paperikoneen tuotantolinjan 1 kaikki mittaukset, joissa yksikkönä on prosentti, saadaan kun position hakukenttään kirjoitetaan PK1 ja yksikön hakukenttään %. Olettaen, että paperikoneen tuotantolinjan 1 signaalien positionimet sisältävät PK1:sen.

Alataulun signaalitaulukkoon tehtiin jokaiselle signaalille painike, josta saa avattua informaatioikkunan. Informaatioikkuna toteutettiin käyttämällä jQueryUI:n dialogi-ikkunaa. Ikkunassa on ilmoitettu signaalin tilastolliset tunnusluvut, kuten keskiarvo, hajonta, minimi- ja maksimiarvo sekä käyrämuodon kuvaaja.

Informaatioikkunaan tuodaan myös tietoa Matlabissa suoritetuista laskuista. Matlabissa lasketuista tiedoista siirtyy havaitun värähtelyn värähtelytaajuus, valitun signaalin kanssa korreloivat muut signaalit, signaalin negatiivisten arvojen osuus sekä kuinka monta prosenttia signaalista on puutteellista tietoa.

Sekä alataulun signaalilistauksessa signaalin nimen kohdalla, että informaatioikkunassa on linkki, josta saa valitun signaalin kuvaajan auki Wedgessä. Mahdollisuutta avata useita signaaleita samaan ikkunaan käytetään hyväksi sekä infoikkunan korreloivien mittausten kanssa, että ylätaulussa havaintojen yhteydessä.

Jos signaali korreloi hyvin muiden signaalien kanssa, tuodaan infoikkunaan nämä signaalit. Tällöin infoikkunassa on myös linkki, josta saa auki ikkunan, jossa on esitettyinä valittu signaali ja sen kanssa korreloivat signaalit. Mahdollisuus avata ja verrata korreloivien signaalien käyrämuotoja on erinomainen työkalu tutkia signaalien välisiä vuorovaikutuksia.



Kuva 6. Infoikkuna, joka sisältää signaalin tilastotiedot, käyrämuodon sekä muuta informaatiota, mitä analysointi on signaalista kyennyt havaitsemaan.

Ylätaulussa on esitettyinä havainnot, joita signaaleista on löytynyt. Havainnon nimen valitsemalla alataulun signaalit päivittyvät. Havaintojen viereen on sulkuihin laskettuna havaintoihin sopivien signaalien määrä. Tästä luvusta hiirellä painamalla saa esiin kaikkien mittausten kuvaajat, joihin havainto on sopinut. Lisäosan toiminnallisuuden ja loogisen käytön kannalta useiden kuvaajien saaminen samaan aikaan näkyville oli erittäin tärkeää.

3.2 Havainnointien merkkkaus binäärikoodilla

Ohjelman toteutuksessa yhdeksi suureksi kysymykseksi muodostui se, kuinka saada järkevästi signaalista löytyneet havainnot kohdistettua ja taltioitua oikeille signaaleille. Haasteena oli myös löytää keino, jolla saataisiin alatauluun päivittymään ne signaalit, jotka ylätaulusta valitaan tarkasteltaviksi. Ratkaisuksi valittiin Datatablesin suodatusominaisuus ja binääriaritmetiikka.

Binäärikoodaamalla jokainen havaintotyyppi omalla 2^n numeroarvolla, pystytään havainnot erottelemaan ja kohdistamaan signaaleihin. Koska jokaisella havainnolla on oma numeroarvonsa tai bittinsä, voi signaali saada useita havaintomerkintöjä. Numeroarvojen muuttaminen binäärikoodiksi mahdollistaa helpon hakutoteutuksen. Käyttämällä binäärikoodausta, voidaan alataulun tietoja suodattaa Datatablesin suodatusominaisuudella niin, että ylätaulusta valitun testin tulokset saadaan näkymään alataulussa.

Binäärihaku toimii siten, että binäärikoodi tulostetaan alataulun taulukkoon ja ylätaulun havaintojen linkkejä painettaessa suodatuskäsky siirtyy alatauluun, jossa Datatables suodattaa signaaleista ne, joista löytyy haettu bitti. Käyttäjäystävällisyyttä lisättiin piilottamalla alataulusta binäärikoodi ja lisäämällä sarake, johon tulostuu niiden havaintojen kuvakkeet, jotka analysointi signaalille on antanut. Näin saadaan mittauksen taulukkoa yksinkertaisemmän näköiseksi ja kuvakkeista näkee nopeasti, minkä tyyppinen signaali on ja onko siinä jotain huomioitavaa.

3.3 Signaalien tunnistaminen säännönmukaisilla lausekkeilla

Kuten aikaisemmin todettiin, signaalien tyyppien tunnistaminen toteutettiin kahteen Stora Enson tehtäseen. Position perusteella tunnistettavat signaalityypit ovat: mittaus, säätö, asetusarvo, ohjaus, laskennallinen mittaus ja jos signaalia ei tunnisteta mihinkään näistä

ryhmistä, kuuluu se ryhmään muut. Tunnistamisen toteuttaminen vaatii, että positioiden nimeäminen on tehty loogisesti ja käytössä on sama nimeämiskäytäntö koko tehtaassa. Tehtaissa, joihin automaattinen tunnistus toteutettiin, on kummassakin erittäin helposti tunnistettavat positionimet. Taulukossa 1. on esitetty kahden eri tehtaan signaalien tyyppien tunnistaminen PHP:n säännönmukaisilla lausekkeilla.

Taulukko 1. Signaalien tyyppien tunnistus. Tunnistuksessa käytetään säännönmukaisia lauseita. Taulukossa on esitetty säännönmukaiset lauseet kahden tehtaan eri mittauksista.

Tehdas 1		
	Position nimi	Säännönmukainen lause
Mittaus	XY1_QI123	^[0-9a-zA-Z]+[_].I[0-9]+\$
Säätö	XY1_FC123	^[0-9a-zA-Z]+[_].C[0-9]+\$
Asetusarvo	XY1_FC123_SET	^[0-9a-zA-Z]+[_].C[0-9]+_SET\$
Ohjaus	XY1_FC123_CON	^[0-9a-zA-Z]+[_].C[0-9]+_CON\$
Tehdas 2		
	Position nimi	Säännönmukainen lause
Mittaus	QI99123.MES	^.I[0-9a-zA-Z]+\.[A-Z]+\$
Säätö	FC99123.MES	^.C[0-9a-zA-Z]+\.[M]ES\$
Asetusarvo	FC99123.SET	^.C[0-9a-zA-Z]+\.[S]ET\$
Ohjaus	FC99123.CON	^.C[0-9a-zA-Z]+\.[C]ON\$

Lisää positionimien tunnistuksia voi lisätä suoraan PHP-koodiin.

4 ANALYSOINNIN MATEMAATTISET TESTIT

Automaattisen analysoinnin tarkoitus on mahdollistaa suurien signaalijoukkojen havainnointi esikäsittelemällä signaalit ja esittää ne havainnollisessa muodossa. Signaalien havainnointimenetelmät jaettiin kahteen ryhmään. Ryhmä, joka nimettiin *informaatioita*, jaottelee signaaleita niiden ominaisuuksien perusteella. Toinen ryhmä sisältää testit, jotka on suunniteltu löytämään ongelmia ja poikkeavuuksia signaaleista. Nämä nimettiin nimellä *havainnoidut*. Signaaleille tehdään kumpaankin ryhmään kuuluvat testit ja yksittäinen signaali voi olla kummassakin ryhmässä. Tuloksia esitettäessä tehdään kuitenkin tiettyjä rajauksia, jotka poistavat tulosjoukosta sellaisia tuloksia, jotka poissulkevat toisensa. Alataulun signaalilistauksessa kuitenkin näkyvät kaikki havaintojen kuvakkeet, jotka täsmäävät signaaliin.

Menetelmiä luotaessa törmättiin usein samaan merkittävyyden kysymykseen. Koska poikkeama on niin suuri, että siitä tulisi ilmoittaa? Ongelman erityisen suureksi teki se, että paperiteollisuudessa mittauksia tehdään hyvin erityyppisille suureille. Esimerkiksi sellun pH-mittaus voi liikkua nollan ja neljäntoista välillä ja säiliön pinta on nollan ja sadan välillä. Lämpötilaa mitatessa asteikko on suuri, mutta usein mittaus pysyy hyvin tasaisena tietyllä alueella ja mahdolliset muutokset ovat hitaita.

Toteutetuissa menetelmissä pyrittiin poistamaan mittauksen skaala käyttäen hyväksi tilastollisia suureita, kuten keskiarvoa, mediaania, hajontaa ja suhteellista hajontaa. Mittauksista olisi ollut käytössä myös yksikkö, josta olisi voinut päätellä signaalin tasoja ja sen käyttäytymistä. Työn rajauksessa päätettiin, ettei käytetä yksikköä signaalien analysointiin, koska siitä olisi aiheutunut erilaisten painokertoimien ja taulukkoarvojen viidakko. Havainnointimenetelmät toteutettiin täysin stokastisin menetelmin.

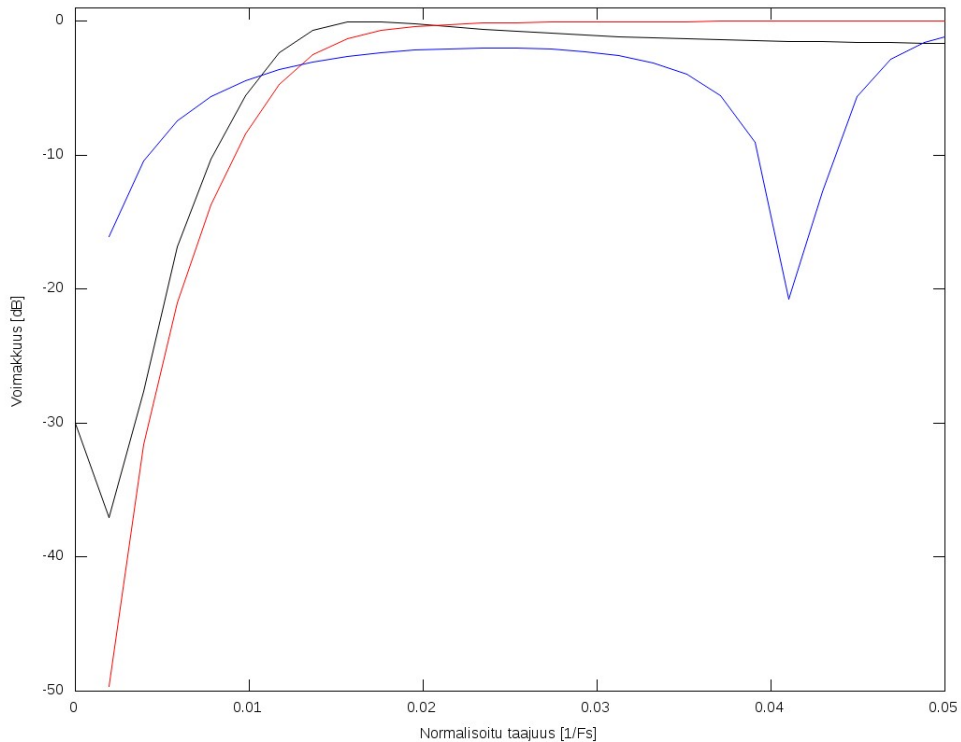
Tämän osion aluksi suunnitellaan työssä käytettävä suodatin, jonka jälkeen käydään läpi eri havainnointimenetelmät.

4.1 Suodatinsuunnittelu

Prosessissa tapahtuu usein tasomaisia muutoksia, jotka kuuluvat tuotantotoimintaan. Koska kyseiset tasomaiset muutokset ovat suunniteltuja ja haluttuja, pyritään niistä pääsemään eroon ennen kuin signaalit analysoidaan. Tällaisia tasomaiset muutokset poistetaan signaalista käyttämällä ylipäästösuodatinta. Ylipäästösuodatuksen jälkeen käsiteltävä signaali on itse asiassa kaistanpäästösuodatettu, koska matalat taajuudet on suodatettu ylipäästösuotimella ja korkeat taajuudet suodattuvat käytettäessä keskiarvotettua mittaustietoa.

Suodatusta suunniteltaessa arvioitiin, että yli kahta tuntia vastaavat taajuudet ovat tuotantotason muutoksiin kuuluvia tai muuten ei ole tarpeellista analysoida. Suunnitellaan ylipäästösuodatin parametreilla: $\omega_p = 1e-4/f_n$, $\omega_s = 4e-4/f_n$, $\delta_p = 2$ dB ja $\delta_s = 30$ dB. Taajuudet ω_p ja ω_s ovat normalisoitu nollan ja yhden välille ja ne vastaavat 166,67 ja 41,667 minuutin jaksonaikoja. Valituilla parametreilla signaali on vaimentunut kahden tunnin kohdalla noin yhden desibelin, jonka jälkeen vaimennus alkaa kasvaa merkittävästi.

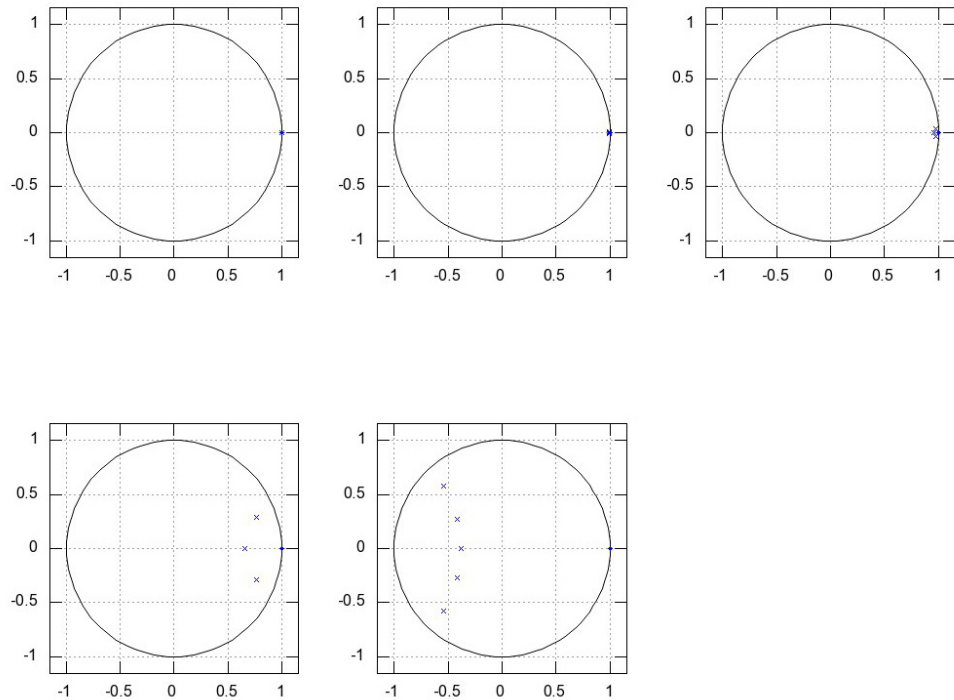
Normalisoitu taajuus f_n on yhtälön (13) mukaan näytevälän käänteisarvo eli näytteistystaajuus jaettuna kahdella. Wedgessä näyteväli on valittu aikataso. δ_p on päästökaistan rippeli desibeleissä ja δ_s on haluttu suodatuksen vaimennus desibeleissä. Kuvassa 7. on esitettyinä eri suodatintyyppien taajuusvasteet.



Kuva 7. Kuvaajassa on esitettyä ylipäästösudattimen taajuusvasteet eri suodatintyypeillä. Punainen on Butterworth, sininen elliptinen ja musta Chebysev I. Havaitaan, että Butterworthilla on tasainen päästökaista ja riittävän nopea siirtymä estokaistalle, joten se soveltuu hyvin analyysien tekemiseen.

Eri suodatintyyppien taajuusvasteiden perusteella voidaan todeta, että Butterworth-suodattimen kertoimet vastaavat haluttua vastetta parhaiten, loivasta vaimennuskäyrästä huolimatta. Butterworth-suodattimen suurimpana etuna on sen päästökaistan tasaisuus.

Koska Wedgeen rakennetussa Matlabissa ei ole suodatinsuunnittelufunktioita, laskettiin kertoimet eri aikatasoille Octavessa. Jos aikatasoksi on valittu yli tunti, ei suodatusta tehdä, koska suodattimen rajataajuus ylittyy. Stabiilisuus on tarkastettava jokaiselle aikatasolle erikseen. Kuvassa 8. on esitetty suunnitellun suodattimen napa-nolla-kuvaukset eri aikatasoilla. Kaikkien aikatasojen kertoimilla navat ovat yksikköympyrän sisäpuolella, eli suunniteltu suodatin on stabiili kaikilla aikatasoilla.



Kuva 8. Suunnittelun suodattimen napa-nolla-kuvaukset eri aikatasoilla. Vasemmalla ylhäällä on sekunti ja oikealla alhaalla tunti. Välissä olevat aikatasot ovat kymmenen sekuntia, minuutti sekä kymmenen minuuttia. Kaikilla aikatasoilla navat ovat yksikköympyrän sisäpuolella eli suodatin on stabiili valituilla parametreilla kaikilla aikatasoilla.

4.2 Vakiotasolla ja keskiarvo on nolla

Analyysin yksinkertaisimmat testit ovat keskiarvon ja hajonnan vertaaminen nolnaan. Jos keskiarvo on nolla, on mittaussignaali hyvin todennäköisesti koko ajan nollassa. On pieni todennäköisyys, että löytyy sellainen mittaus, jonka hajonta ei ole nolla, mutta keskiarvo on. Siksi testiä ei haluttu nimetä niin, että se antaisi kuvan, että mittaus on todellakin nollassa. Toisaalta taas ei haluttu rajata testiä näyttämään pelkästään, että mittaus on nollassa, koska hajonnalle on oma testinsä.

Vakiotasolla testaa yksinkertaisesti signaalin hajontaa. Jos signaalin hajonta on nolla, sillä on tarkastelujaksolla vain yksi arvo eli signaali on vakiotasoinen. Koska haluttiin erikseen

ilmoittaa nollassa olevat signaalit ja vakiotasoiset signaalit, tuloksissa ei ilmoiteta niitä signaaleja vakiotasoisiksi, joissa keskiarvo on nolla.

Asetusarvoja lukuun ottamatta, mittauksen ei tulisi olla vakioarvoinen tai nollassa näyttävä. Vaikka mitattava suure olisikin tasainen, mittarin epävarmuuden tulisi aiheuttaa mittaukseen hajontaa. Näitä havaintoja ei esitetä tuloslistauksessa asetuservoille, koska prosessin toimiessa hyvin, ei asetuservoja tarvitse muuttaa ja silloin ne pysyvät vakiona.

4.3 Muuttunut 2-20 kertaa

Tämä testi on tehty asetuservojen muutosten tarkastelua varten. Jos asetuservoa ei määrää joku ylemmän tason säätö tai kaskadisäätö, ja prosessi toimii hyvin, sen pitäisi olla vakioarvoinen eli saada havainto joko vakiotasolla tai keskiarvo on nolla. Jos säätimen asetuservoa joudutaan käsin muuttamaan usein prosessin vakaan toiminnan ylläpitämiseksi, voi prosessin säätimessä olla ongelma. Tämä havainto on erityisen hyödyllinen sellaisille henkilöille, jotka eivät ole tehtaalla prosessia seuraamassa. Todennäköisesti tehtaalla on jo vika huomattu kun on jouduttu asetuservoa muuttamaan.

Testissä lasketaan signaalissa tapahtuneiden muutosten määrää. Jos differenssin itseisarvo on suurempi kuin nolla, tapahtuu signaalissa muutos ja muuttujaan tallentuu ykkönen. Summaamalla saatu tulos, saadaan tietoon kuinka monta muutosta signaalissa tapahtui. Jos muutoksia on kahdesta kahteenkymmeneen, asetetaan signaalille bitti ilmoittamaan tästä. Yläraja on asetettu, koska muuten kaikki ylätasen säädöltä asetuservonsa saavat säätöpiirit saisivat havainnon.

4.4 Keskiarvo negatiivinen ja osa arvoista negatiivisia

Näiden yksinkertaisten testien tarkoituksena on ilmoittaa mahdollisista negatiivisista signaaleista. Suurin hyöty näiden ilmoittamisesta saadaan laskennallisissa mittauksissa, koska jos se saa negatiivisen arvon, on sen laskussa todennäköisesti merkkivirhe.

Osa arvoista negatiivisia -testissä verrataan signaalin vektorin alkioiden negatiivisten arvojen määrän summaa alkioiden kokonaismäärään. Jos suhde on yli viisi prosenttia, merkataan signaali bitillä. Keskiarvo negatiivinen -testissä verrataan signaalin keskiarvoa nollaan ja jos keskiarvo on alle nollan, merkataan signaalille keskiarvo negatiivinen bitti.

4.5 Nouseva tai laskeva

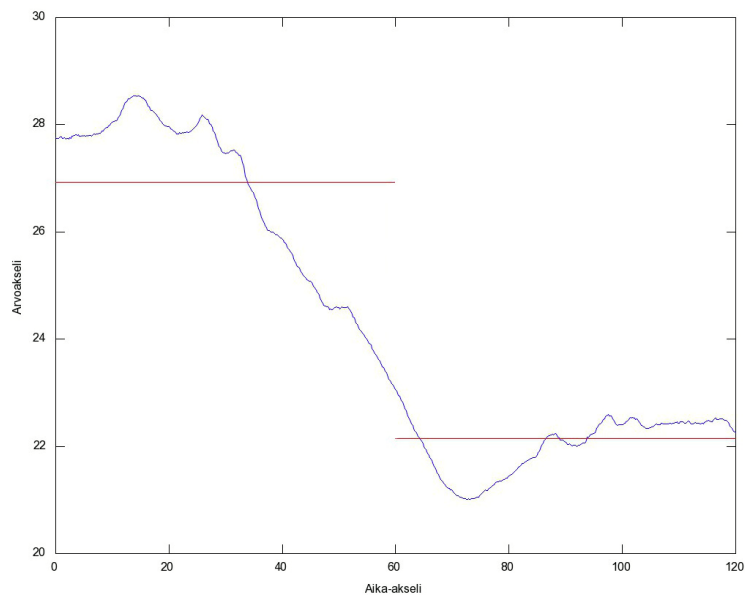
Testillä halutaan löytää signaaleja, joissa signaalin arvo kasvaa tai vähenee tarkasteluajana. Testillä pyritään löytämään mahdollisia hiipuvia mittauksia tai hiljalleen tyhjentyvää säiliötä. Jos signaalin alkioihin nähden differenssin arvoista yli kahdeksankymmentä prosenttia on positiivisia tai saman verran negatiivisia, merkataan signaali nousevaksi tai laskevaksi.

4.6 Suhteellinen hajonta suuri tai pieni

Jokaiselle signaalille lasketaan suhteellinen hajonta yhtälön (3) mukaan. Jos suhteellinen hajonta on hyvin pieni tai suuri, saa signaali bitin, joka kertoo havainnosta. Suhteellinen hajonta kertoo, että mittarissa, josta signaali saadaan, on jotain vialla. Lämpötilamittaukset ovat poikkeus. Lämpötilan mittarit ovat hyvin tarkkoja, jolloin korkeiden lämpötilojen mittaukset saavat helposti pienen suhteellisen hajonnan.

4.7 Taso muuttuu jaksolla

Testin avulla halutaan verrata signaalin tasoja valitun aikatazon alussa ja lopussa. Jos puolikkaiden tasojen ero kasvaa yli kymmenen prosenttia suhteessa signaalin keskiarvoon, halutaan tästä tieto. Puolikkaiden tasot lasketaan poistamalla kolmannekset puolikkaan maksimi- ja minimiarvoista ja ottamalla jäljelle jääneistä näytteistä keskiarvo. Ääriarvojen poisto tehdään, koska halutaan poistaa keskiarvon laskemisesta signaalin mahdolliset piikit ja tason muuttumisen arvot. Yksittäinen piikki signaalissa voi muuttaa keskiarvoa merkittävästi, ellei sitä poisteta. Kuvassa 9. on esitetty signaali, jossa taso muuttuu.



Kuva 9. Signaali, jossa taso muuttuu. Punaiset viivat kuvaavat, missä puolikkaiden keskiarvot ovat, kun ääriarvot on poistettu.

Testi on erityisen hyödyllinen kun halutaan tutkia kahden eri ajanhetken välillä olevia muutoksia. Käyttämällä hyödyksi Wedgen aikavälin rajausta, voidaan aikavälistä poistaa pätkiä. Jos halutaan tutkia kahta eri ajanhetkeä prosessissa, valitaan aikavälin alku aiemman ajanhetken alusta ja loppu myöhemmän aikavälin lopusta. Rajaamalla aikaväliä niin, että aikaväliin jää puolikas aiempaa ajanhetkeä ja puolikas myöhempää aikaväliä, saadaan testillä helposti testattua mahdollisia muutoksia aikavälien välillä.

4.8 Löytyy samankaltaisia

Testissä signaaleille lasketaan korrelaatiomatriisi ja nollataan saadun matriisin diagonaalimatriisi. Nollaus tehdään, koska diagonaalimatriisi kertoo korrelaation signaalin itsensä kanssa. Jos signaalille löytyy jonkun toisen signaalin kanssa yli 0,8:n korrelaatio, merkataan signaalille bitti, joka osoittaa, että signaalille löytyy samankaltainen tai samankaltaisia signaaleja.

Korrelaatiomatriisia käytetään hyväksi myös listamaan korreloivat signaalit. Matriisiin tallennetaan kaikki korreloivat signaalit ja tulokset esitetään infoikkunassa. Infoikkunasta saa avattua Wedgen kuvaajina kaikki signaalin kanssa hyvin korreloivat mittaukset.

4.9 Puuttuva tieto

Kuvassa 10. on esitetty mittauksia, jotka on löydetty puuttuva tieto -havaintojen perusteella. Kuvasta löytyvä kuitulinjan kappamittaus (KL2_QI0013) on tärkeä laadunmittaus. Mittaus on kuitenkin vaihdettu uudelle positiolle, mutta Wedge-malliin positiota ei ole päivitetty.

Puuttuva tieto kertoo, että mittausta ei ole olemassa eli sen positionimi on vaihdettu tai poistettu tiedonkeruusta. Mittaus pitäisi siis myös päivittää tai poistaa Wedge-mallista ja seurannasta. Puuttuva tiedonkeruu vaikuttaa virheellisesti myös laskennallisiin Wedgen mittauksiin. Laskennallinen mittauksen laskeminen epäonnistuu, jos se sisältää positionimen, jota ei ole enää olemassa tai se ei ole tiedonkeruussa. Tämä virhe näkyy kuvan 10. ylimmässä kuvaajassa. Kaksi alemmaa kuvaajaa kertoo sen, että laskennallinen mittaus on kopioitu jostain toisesta mallista ja kopioidun mittauksen lähdemittaukset puuttuvat. Tällainen epäonnistunut laskennallinen mittaus sisältyy myös puuttuviin tietoihin.

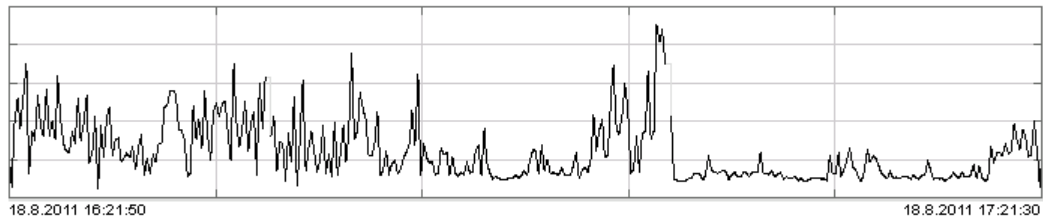
	H-tekijä_uusi - H-factor (KPI)
	Error using ==> evalin Undefined function or method 'hfactorout2' for input arguments of type 'double'.
kg aCl/kappa	Kappa factor [kg aCl/kappa]
	Virheellinen mittauksen nimi: 1228834839
kg/ADt	Total NaOH charge in bleaching
	Virheellinen mittauksen nimi: 1275391108

Kuva 10. Laskennallisia mittauksia, joissa puuttuva tieto.

Puuttuva tieto -havainnointi tehdään Matlabin funktiolla `isnan()`, joka palauttaa samankokoisen matriisin kuin sille annetussa parametrissa on. Palautuvassa matriisissa on looginen ykkönen jos parametriksi syötetyn matriisin alkiossa on NaN, ja nollan jos ei ole. Jos positionimeä ei ole enää olemassa tai laskennallinen mittaus sisältää tällaisen puuttuvan positionimen, tulee mittauksen vektorin kaikille alkiolle arvo NaN. Jos mittauksen arvojen määrä ja funktion antaman tuloksen summa ovat samat, kaikki mittauksen arvot ovat NaN.

4.10 Sisältää NaN

Matlabin funktiota `isnan()` voidaan käyttää myös hyödyksi tarkistamaan onko mittauksella kaikissa alkioiden mittausarvo. Kuvassa 11. on esitetty testin löytämä mittaus, josta puuttuu mittausarvo. Tämä näkyy mittauksen kuvaajassa epäjatkuvuutena.



Kuva 11. Mittaus, joka sisältää NaN eli mittauksesta puuttuu arvoja. Puuttuvat kohdat näkyvät kuvaajassa epäjatkuvuuskohtina.

Jos funktion `isnan()` summa on erisuuri kuin nolla, parametriksi annettu vektori sisältää vähintään yhden NaN:in. Mittaukseen tulee NaN jos mitta-anturilta ei välity mittaustieto. Yksikin puutteellinen mittaustiedon välittymisen epäonnistuminen aiheuttaa sen, että prosessitietokantaan tallentuva keskiarvo on NaN.

Testi on myös tärkeä muiden havainnointien kannalta, koska mittauksessa oleva epäjatkuvuuskohta estää monien muiden havainnointien tekemisen. NaN:in sisältävälle mittaukselle ei tehdä suurinta muista testeistä, joten jos signaalia haluaa testata, on tarkastelu tehtävä ennen tai jälkeen epäjatkuvuuskohtaa tai rajaamalla ulos epäjatkuvuuskohta.

4.11 Tasomaisia muutoksia

Tasomaisilla muutoksilla halutaan tunnistaa sellaiset signaalit, jotka saavat signaalia tarkasteltaessa vain tasomaisia muutoksia. Tällaisia mittauksia ovat usein mittaukset, jotka tehdään vain tietyin aikavälein. Laatumittaukset ovat usein tällaisia mittauksia. Niissä laatu mitataan säännöllisin väliajoin ja edellisen mittauksen arvo toistuu aikasarjassa niin kauan kunnes uusi mittaus on otettu.

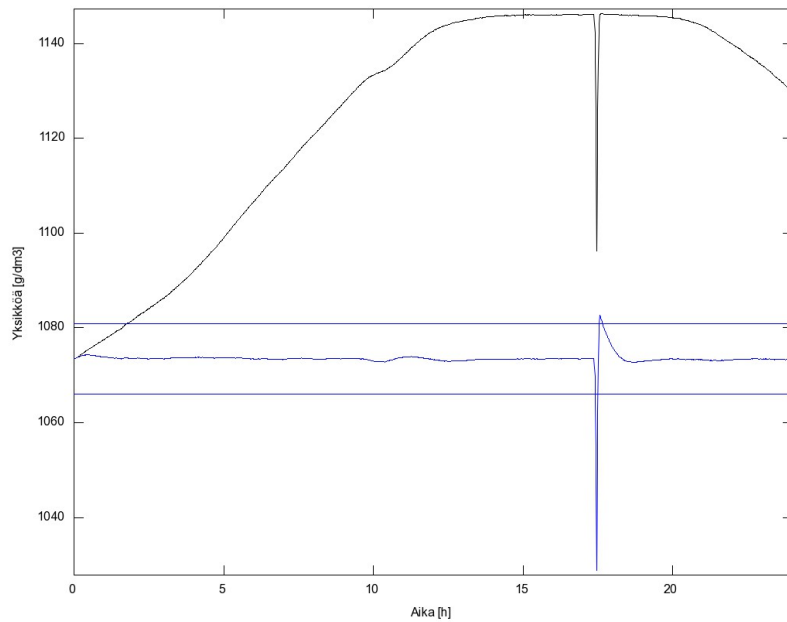
4.12 Suuret ääriarvot

Erilaisia vikatilanteiden havainnoiteja suunniteltaessa yksi tärkeimmistä signaalin analysointimenetelmien kehityskohteista oli ääriarvojen tutkiminen. Ääriarvojen tutkimisen taustalla on kolme syytä, joiden takia havainnointia pidettiin tärkeänä. Prosessien toiminta halutaan pitää vakaana ja jos toiminnassa tapahtuu äkillisiä piikkejä tai muutoksia, halutaan siitä tieto. Toisaalta taas suurien piikkien muodostuminen voi ilmaista mittarissa olevan vian. Kolmantena syynä haluan saada ääriarvojen tunnistaminen oli perinteisen Statistical Process Control -ajatteluun kuuluvan laajentaminen pelkästä laadun ääriarvojen seurannasta myös muihin mittauksiin.

Prosessin käyttäytyminen on ennustettavissa vain jos prosessi on vakaa ja hallittavissa. Tilastolliset menetelmät voivat auttaa arvioimaan prosessin hallittavuutta. Asettamalla tilastolliset rajat, prosessin pysyessä näiden rajojen sisällä, voidaan olettaa prosessin olevan hallittavissa. (Weller, 2000)

Tilastolliset rajat määritettiin käyttämällä hajonnan monikertaa. Rajat lasketaan käytettävästä datasta, koska työtä määriteltäessä päätettiin, ettei käytössä ole mittaushistoriaa. Ääriarvojen ylittäessä hajonnan monikerran, annetaan signaalille bitti, joka ilmoittaa ääriarvojen olevan liian suuret. Hajonnan monikerta asetettiin muuttujaksi, jotta sitä voi tarvittaessa myöhemmin muuttaa, jos prosessia saadaan parannettua.

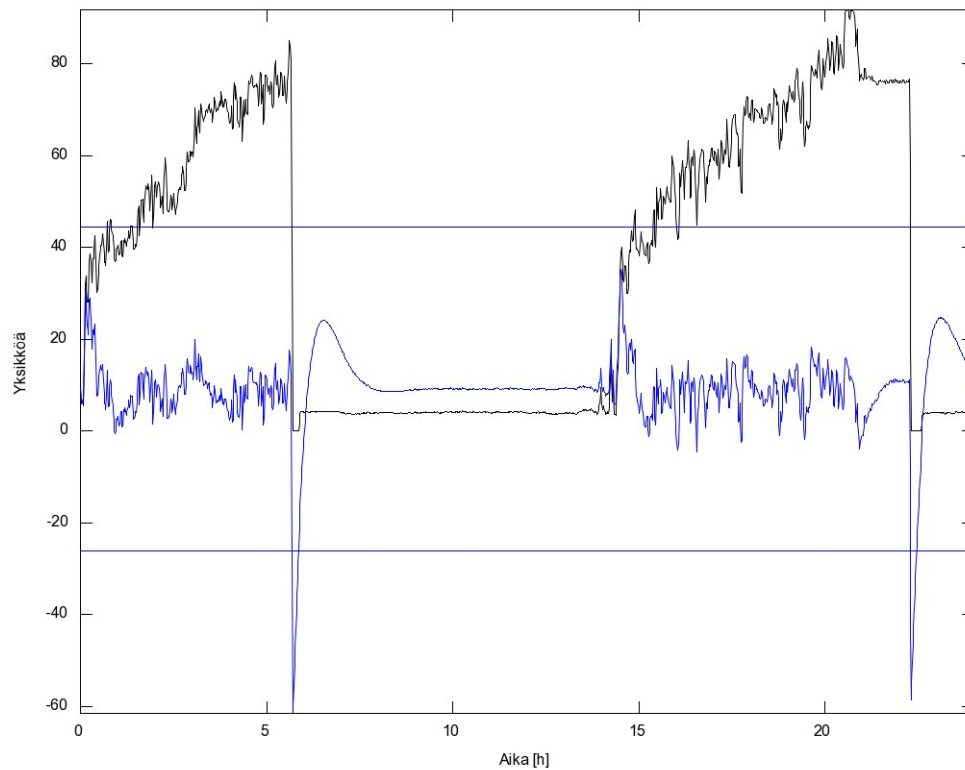
Kyseinen testi tehdään ylipäästösuodatetulle signaalille, koska ei haluta tuotantotason muutosten aiheuttavan hälytyksiä. Kuvassa 12. on esitetty mittausta johon on esimerkin vuoksi lisätty piikki. Piikkiä jota ei huomattaisi, jos testi tehtäisiin alkuperäisestä signaalista. Ylipäästösuodatettu signaali poistaa tuotannossa tapahtuvat muutokset, jolloin piikin minimiarvo jää hajonnan monikerran ulkopuolelle.



Kuva 12. Alkuperäiseen mustaan signaaliin on lisätty piikki, joka ei ylitä havaintorajoja. Alkuperäisen signaalin havaintorajat eivät näy kuvassa. Sinisellä piirretty ylipäästösuodatettu signaali antaa hälytyksen piikistä.

Ylipäästösuodatuksen avulla saadaan myös nopeat tasomuutokset näkyviin, koska ylipäästösuodatus ei ehdi reagoimaan niihin. Kuvassa 13. on esitetty mittaus, joka havainnoidaan, koska se sisältää nopeita tasomaisia muutoksia. Ylipäästösuodatus aiheuttaa sen, että tasomuutoksen kohdalle muodostuu piikki, joka ylittää hajonnan monikerran.

Kuvan 13. mittauksen ei tulisi antaa hälytystä, koska se mittaa rejektilavan pintaa. Rejektilavoja on kaksi, jotka säännöllisesti tyhjätyään ja tyhjätyksen aikana toista lavaa täytetään. Vaikka testi aiheuttaa vääriä tuloksia, todettiin menetelmän olevan hyvä, koska se ilmoittaa esimerkiksi putken tai mittarin rikkoutumisista, paineen häviämisestä tai venttiilin jumiutumisesta. Testi ilmoittaa kaikista prosessissa tapahtuvista äkillisistä muutoksista ja tämä katsottiin ylipäästösuodatuksen aiheuttamaksi hyväksi ominaisuudeksi. Tässäkin testissä lopullinen johtopäätös jää prosessia tuntevan henkilön tehtäväksi.



Kuva 13. Mittaus, jossa äkillisiä muutoksia. Ylipäästösuodatettu signaali aiheuttaa piikit tasomuutosten kohdalle ja nämä ylittävät hajonnan monikerran.

Prosessin laadun mittareiden tilastollisella seurannalla on saatu hyviä tuloksia myös muissa tutkimuksissa. SPC:n käyttöönotto Slave Lake Pulp Corporationissa paransi operaattoreiden prosessin ymmärrystä sekä vähensi vasteaikaa prosessin palauttamiseen tavoitetilaan. Tuotteen laatu parantui valkaisuvaaleuden osalta kuusikymmentä prosenttia ja massan suotautuvuuskyky kaksikymmentäkuusi prosenttia (Ho, 1993).

4.13 Leikkautuu ääriarvoihin

Prosesseissa on tilanteita, jolloin mittauksen dynamiikka ei riitä tai säätimen antama ohjearvo on suurempi mihin ohjattava toimilaite kykenee. Prosessissa voi myös tulla

tilanne, jossa säiliö tyhjenee tai täyttyy, jolloin mittaus rajautuu minimi- tai maksimiarvoon. Tutkimalla ääriarvoja ja niiden esiintymistä, voidaan havaita tällaisia tilanteita.

Ääriarvojen havainnointi tehdään tarkistamalla aluksi, että kahdeksankymmentä prosenttia signaalien arvoista on uniikkeja. Tällä halutaan estää mittaukset, joissa taso pysyy samana tai mittauksella on muuten vähäisiä muutoksia. Matlabin funktiolla `ismember()` voidaan tarkistaa sisältyykö arvo vektoriin. Funktio palauttaa vektorin, jossa on ykkönen alkiossa, joista tarkistettava arvo löytyy, muuten nolla. Funktiota hyväksikäyttäen voidaan hakea signaalien arvosarjasta signaalien maksimi- ja minimiarvot. Tuloksena on kaksi vektoria, joissa toisessa on maksimiarvot ja toisessa minimiarvot.

Koska testin ei haluta löytävän vain signaalien piikkejä vaan leikkaantumisia, tarkistetaan onko maksimi- tai minimipiste piikki vai leikkaantunut. Aluksi luodaan vektori, jossa alkion arvo on yksi kaikissa alkioissa, joissa signaalien differenssi on nolla, ja muuten nolla. Kertomalla tämä vektori maksimi- ja minimiarvovektoreilla jää jäljelle kaikki ne signaalien maksimiarvot, jotka leikkautuvat.

4.14 Värähtelyt

Paperiteollisuudessa prosessit ja lopputuotteen laatu ovat hallittavissa vaikka signaalien tasot eivät vastaisi täysin haluttua, kunhan ne eivät värähtelee. Tutkimusten mukaan keskimäärin kolmekymmentä prosenttia kaikista säätöpiireistä värähtelee. Tämä osuus on lähes vakio kaikilla prosessiteollisuuden aloilla (Bonavita, 2006). Värähtelyiden tutkiminen on siis hyvin tärkeää ja siksi värähtelyiden havaitsemisella on tärkeä osuus automaattisessa signaalien analysoinnissa.

Kun systeemin tulo on tiedossa, värähtelyiden tunnistamiseen on parametrisia ja ei-parametrisia menetelmiä. Parametrisiin menetelmiin kuuluvat signaalin korrelaatioon perustuvat menetelmät sekä PEM-menetelmät, joissa luodaan signaalille ennuste ja tunnistetaan ennusteen ja toteutuman virhe. Ei-parametrisiin menetelmiin kuuluvat sekä aika-, että taajuustason menetelmät. (Thambirajah, 2010).

Parametriset menetelmät ovat haasteellisia automaattisen signaalin havainnoinnin kannalta, koska työn rajauksessa havainnointi rajattiin vain valittuun aikaväliin. Tästä syystä korrelaation hyödyntäminen tai mallin tekeminen ei ole järkevää, koska jos käyttäjä tutkii värähtelyä ja valitsee aikavälin niin, ettei aikavälillä ole muuta kuin värähtelyä, eivät menetelmät osaa tunnistaa värähtelyä. Koska PEM:issä signaalille luodaan malli, joka ennustaa tulevia arvoja, se soveltuu paremmin sovellukseen, jossa analysoidaan yksittäisen prosessikohdan värähtelyä. Silloin ei tarvitse välittää niin paljon laskennan suoritusajasta ja voidaan huomioida myös historia.

Ei-parametrisistä aikatason menetelmistä korrelaatioanalyysi vaatii tiedon sisääntulosta ja ulostulosta, joten sitä ei voida käyttää automaattisessa havainnoinnissa. Käyttö vaatisi tiedon prosessin kausaalisuudesta, jotta saataisiin tutkittavalle prosessille sekä sisääntulo-, että ulostulomittaus. Värähtelyn tunnistusmenetelmistä käytettäväksi jää siis taajuustason tutkiminen eli taajuusanalyysi. Siihen ei tarvita signaalista jaksoa, joka ei värähtele, joten se soveltuu hyvin rajausehtoon.

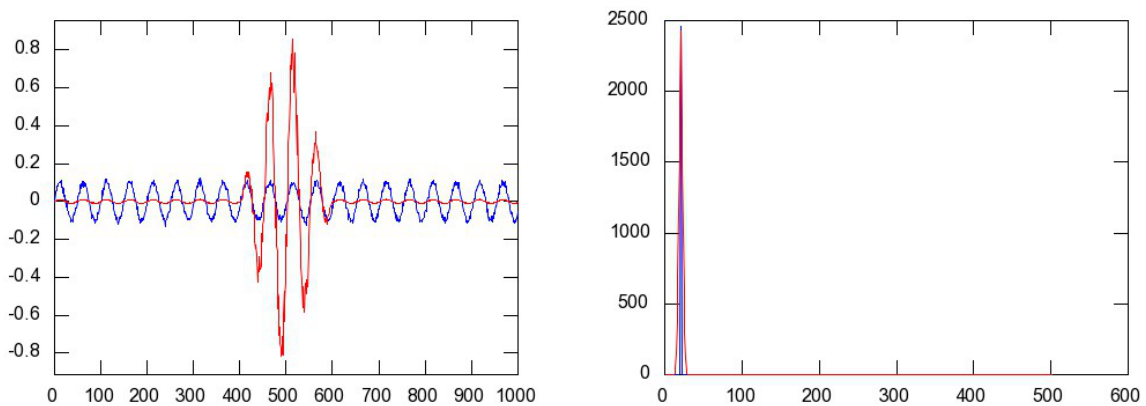
Tutkitaan ylipäästösuodatettua signaalia. Ylipäästösuodatus tehdään, koska halutaan tutkia tiettyä taajuuskaistaa ja saada pois tuotantotason vaihteluita. Wedgessä asetettu aikataso määrittää alipäästösuodatuksen määrän, eli tutkittava signaali on kaistanpäästösuodatettu.

Värähtelyiden havaitsemiseen tarvitaan menetelmä, joka tunnistaa koko jakson FFT:stä voimakkaat piikit ja ilmoittaa niistä. Koska työssä halutaan havaita vain se, värähtelee

signaali vai ei, havainnoinnin kannalta riittää korkeimman piikin löytäminen. Korkein piikki löytyy helposti ottamalla maksimiarvo amplitudiasteikolta.

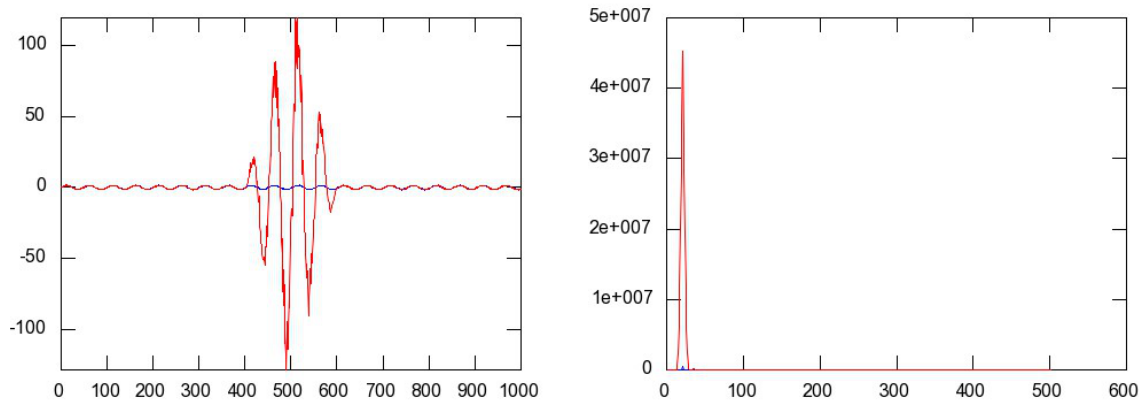
Kuvan 14. testisignaalien perusteella voidaan todeta, että FFT:n kuvaajaan voi muodostua piikki kahdella eri tavalla. Joko signaalissa on amplitudiltaan pieni jatkuva taajuus tai yksittäinen transientti-ilmiö, joka on amplitudiltaan muuhun signaaliin nähden hyvin voimakas. Tämä asettaa haasteen merkittävän värähtelyn tunnistamiseen. Kuvan 14. signaaleista ei voi tehdä havaintoja signaalien värähtelyistä.

FFT:n käyttö värähtelyiden havainnointiin on hyvin hankalaa, koska vaikka amplitudipiikki on helposti tunnistettavissa, se ei välttämättä ole merkittävää värähtelyä. Työtä määriteltäessä arvioitiin, että värähtely on merkittävää kun sen amplitudi on noin viisi prosenttia suurempi kuin signaalin taso. Tämä arvio ei päde kaikille mittauksille, mutta monissa mittauksissa tämä arvioitiin sopivaksi hälytysrajaksi. Esimerkiksi lämpötilamittauksessa lämpötilamittauksen keskiarvolla ei ole lämpötilan värähtelyn kannalta suurta merkitystä.



Kuva 14. Kaksi taajuudeltaan samanlaista, mutta amplitudiltaan erilaista signaalia ja niiden FFT. Jos kyseessä olisi esimerkiksi pH-mittaus, sinisen signaalin jatkuva värähtely ei olisi amplitudiltaan prosessin kannalta merkittävää, mutta punaisen todennäköisesti olisi. Taajuusspektrit kummallakin signaalilla ovat hyvin samanlaiset.

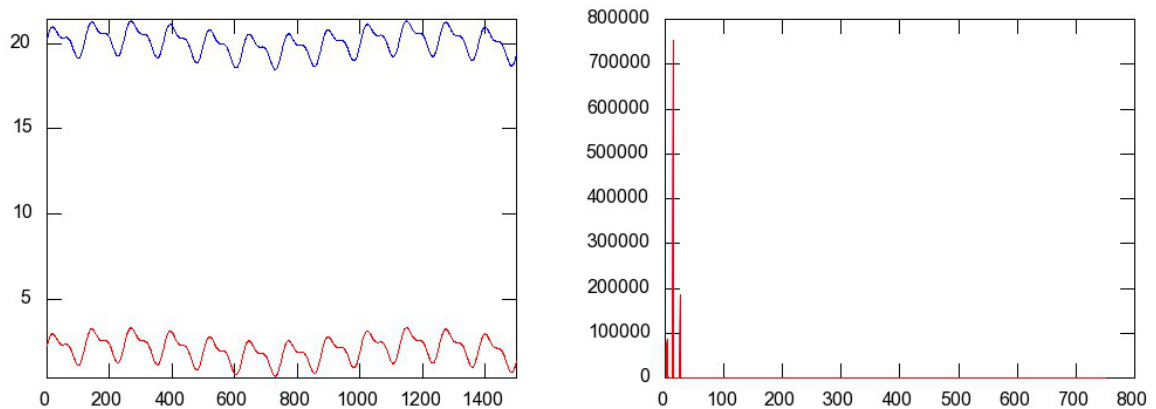
Kuvan 14. signaaleilla on kuitenkin huomattavasti erilainen hajonta. Skaalaamalla signaalit hajonnalla, saadaan värähtelyn merkittävyys paremmin esiin. Kuvassa 15. on esitetty hajonnalla skaalattujen signaalien kuvaajat ja taajuusspektrit. Signaalien taajuussisältö ei skaalauksessa muutu, mutta värähtelyn merkittävyys on havainnoitavissa paremmin.



Kuva 15. Kuvaajat esittävät samoja signaaleita, jotka ovat kuvassa 14, mutta hajonnalla skaalattuna. FFT:n kuvaajasta nähdään, että punaisen signaalin värähdys on merkittävämpi kuin sinisen, jonka taajuuspiikki näkyy vain pienenä pisteenä.

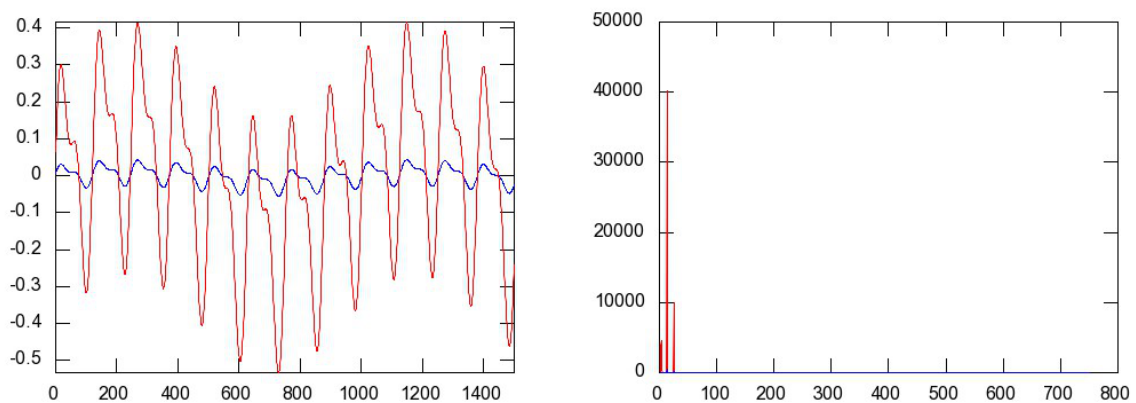
Edellä tutkittiin signaaleja, joiden keskiarvo on nolla. Mittasignaalit eivät ole keskiarvoltaan nolliä, vaikka taajuusanalyysia varten signaalista poistetaan keskiarvo. Keskiarvon poistaminen signaalista hävittää oleellista merkittävyystietoa värähtelystä.

Kuvassa 16. on esitetty kaksi samannäköistä signaalia. Toisen signaalin keskiarvo on noin kaksi ja toisen noin kaksikymmentä. Poistamalla keskiarvo signaaleista, signaalit ovat samat, joten FFT:n kuvaajat ovat samat. Jos kyseessä olisi prosessimittaus, molemmat värähtelyt voisivat olla haitallisia, mutta tärkeämpää olisi havaita keskiarvoon suhteutettuna enemmän värähtelevä.



Kuva 16. Kaksi samanmuotoista värähtelevää mittausta, joiden keskiarvot ovat hyvin erilaisia, saavat taajuusanalysissä samanlaisen tuloksen kun signaaleista on keskiarvo poistettu.

Jakamalla signaali sen keskiarvolla saadaan esiin värähtelyn merkittävyys ja erotettua kaksi samanlaista signaalia, joilla hajonta on sama, mutta niiden keskiarvo on erilainen. Kuvassa 17. on esitetty keskiarvolla jaettujen signaalien kuvaajat ja FFT.

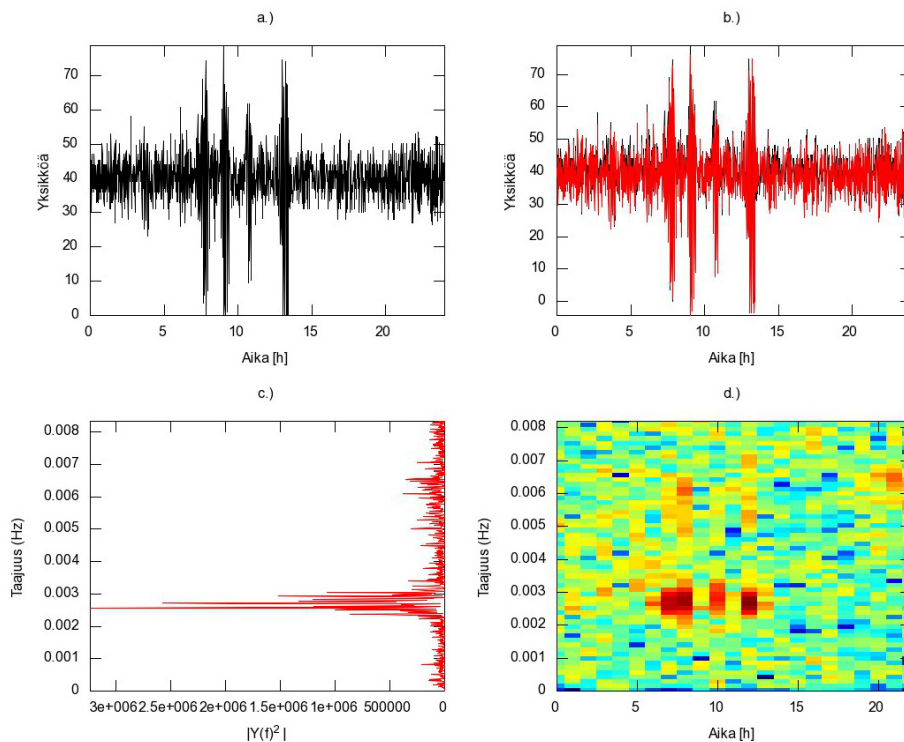


Kuva 17. Kuvassa on keskiarvolla jaetut signaalit ja niiden FFT. Punaisen signaalin FFT:n piikit ovat merkittävästi suuremmat kuin sinisen signaalin.

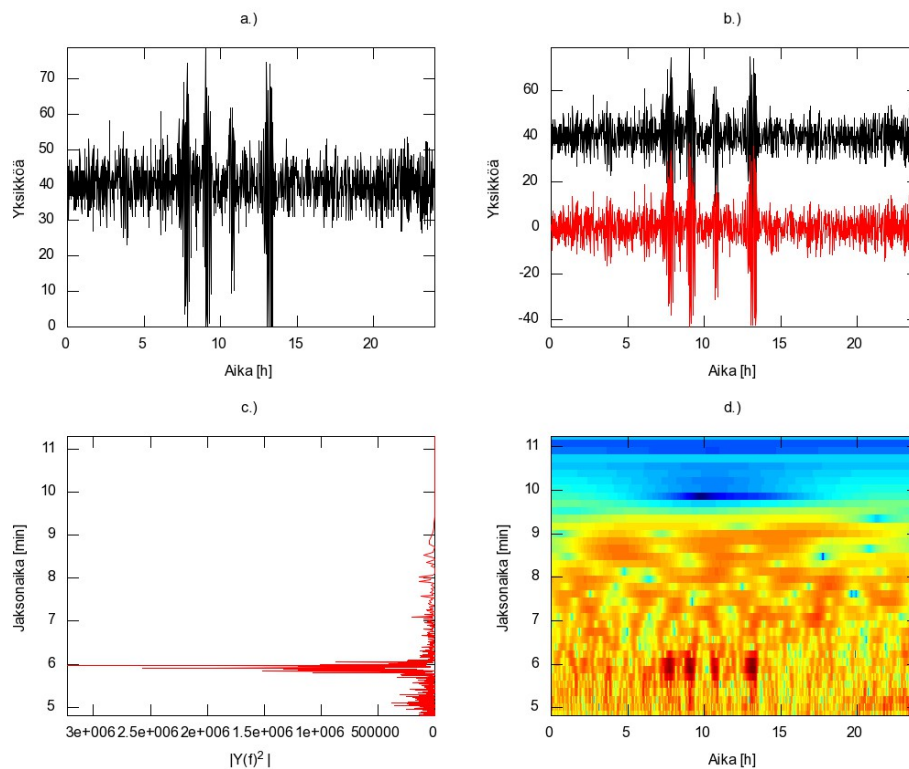
Kun signaali on skaalattu hajonnan mukaan ja jaettu keskiarvolla, saadaan signaalien FFT:n maksimipiikistä vertailukelpoinen. Yksinkertaisimmillaan värähtelyt saadaan havaittua asettamalla piikin korkeudelle sopiva raja, jolloin signaalien värähtelyt saadaan karkeasti jaettua merkittävyyden mukaan.

Tarkasteluvälillä tapahtuvat suuret transientti-ilmiöt aiheuttavat FFT:hen suuren piikin. Kuvassa 18. on esitetty erään pudotusputken pinnanmittaus ja sen taajuusanalyysi. Pudotusputken pinnansäädössä on ongelma ja tietyissä tilanteissa se lähtee värähtelemään. Tällaiset tilanteet, joissa signaali alkaa värähdellä, tulisi pystyä havaitsemaan.

Pelkästään signaalia aikatasossa tutkimalla voidaan havaita, että neljässä kohtaa putken pinta lähtee värähtelemään. Ottamalla signaalista FFT, saadaan helposti esille värähtelytaajuus, joka näkyy kuvassa selvänä piikkinä. FFT ei kuitenkaan anna tietoa, koska värähtelyt tapahtuvat, vaan tarvitaan aika-taajuusanalyysiä. Spektrogrammin avulla voidaan havaita hyvin selvästi värähtelyajat ja taajuudet, joilla värähtelyt tapahtuvat. Tässä tapauksessa värähtelyt tapahtuvat kaikissa neljässä eri ajanhetkessä samalla taajuudella, josta voidaan päätellä, että ongelman syy näissä kaikissa tapauksissa on todennäköisesti sama.



Kuva 18. Pudotusputken pinnan mittaus esitettynä a.) aikatasossa, b.) alkuperäisenä ja suodatettuna signaalina, c.) taajuustasossa ja d.) aika-taajuustasossa.



Kuva 19. DWT:llä luotu skaleogrammi sellutehtaan pudotusputken pintamittauksesta. Pinta lähtee neljällä eri ajanhetkellä värähtelemään.

Spektrogrammin resoluutioksi vuorokauden aikana määriteltiin kaksi tuntia, koska ylipäästösuodatin suodattaa kaikki yli kahden tunnin jaksonajalla olevat taajuudet. Jos valittu signaalien tarkastelujakso on alle kymmenen tuntia, on spektrogrammin resoluutio kymmenesosa mittausvektorien alkioiden määrästä.

Spektrogrammista, joka on laskettu ylipäästösuodatetusta signaalista ja joka on skaalattu keskiarvolla ja hajonnalla, saadaan nyt tieto milloin signaali värähtelee voimakkaimmin ja millä taajuudella. Selvittämällä maksimiampitudipiikin sijainti, saadaan värähtelyn ajanhetki ja taajuus, jolla signaali värähtelee voimakkaimmin. Koska tutkittavat signaalit ovat skaalattu keskiarvolla ja hajonnalla, ja sitten otettu spektrogrammi, voidaan niitä verrata keskenään. Tällöin asettamalla sopiva kerroin, voidaan määrittää tulosjoukko ja muuttamalla rajaa, rajata tulosjoukkoa.

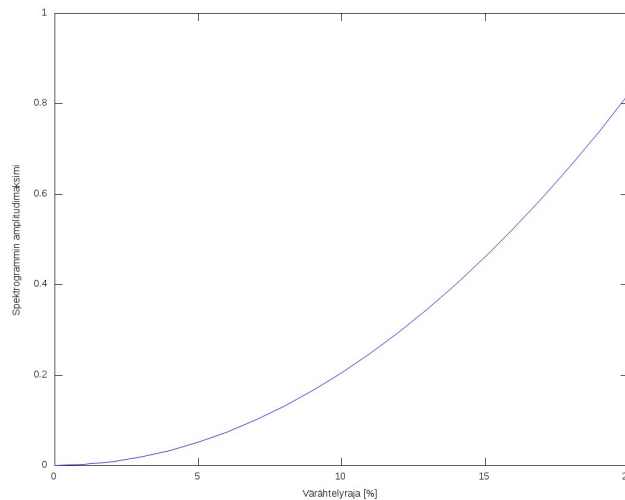
Luomalla siniaallon muotoisia testisignaaleita, jotka värähtelevät 0,05 yksikköä keskiarvon ympärillä, voidaan määrittää tulosjoukon raja-alue. Taulukkoon 2. on laskettu kahdella eri siniaallolla, joiden värähtely on viisi prosenttia keskiarvosta, spektrogrammin maksimiarvoja. Taulukosta huomataan, että amplitudin merkitys häviää kun signaali on suhteutettu keskiarvoon ja hajontaan. Taulukosta myös nähdään, että ensimmäiset arvot ovat huomattavasti muita arvoja pienemmät. Tämä johtuu siitä, että korkeimman jaksonajan signaali suodattuu ylipäästösuodatuksessa. Poistamalla ensimmäiset arvot, saadaan muille keskiarvoksi 0,050021. Tulosten hajonnan aiheuttaa STFT:n ikkunoinnin sijoittuminen siniaaltoon nähden.

Taulukko 2. Maksimi-amplitudit. Kahden erilaisen sinisignaalin, joilla värähtely on viisi prosenttia keskiarvosta, spektrogrammin maksimi-amplitudi-arvot taulukoituna. Taulukon ylimmät arvot ovat selvästi muita alhaisemmat, koska signaali on ylipäästösuodatettua. Poistamalla taulukon ylimmät arvot, saadaan muiden lukujen keskiarvoksi 0,050021.

jaksonaika [min]	Amplitudimaksimi	
	$10+0,5 \cdot \sin()$	$100+5 \cdot \sin()$
141,8	0,027212	0,027212
70,9	0,047820	0,047820
47,3	0,053757	0,053757
35,4	0,052147	0,052147
28,4	0,047489	0,047489
23,6	0,049362	0,049362
20,3	0,052499	0,052499
17,7	0,050710	0,050710
15,8	0,045386	0,045386
14,2	0,051301	0,051301
12,9	0,052403	0,052403
11,8	0,048466	0,048466
9,5	0,051348	0,051348
7,1	0,047586	0,047586

Taulukosta nähdään, että jaksonajalla 23,6 minuuttia, amplitudimaksimi on lähinnä sitä arvoa, mikä sen pitäisi olla eli kyseisellä jaksonajalla STFT:n ikkunan sisälle mahtuu

lähinnä täydellistä oleva siniaaltomuoto. Luodaan siniaaltoja, joiden jaksonaika on 23,6 minuuttia ja lasketaan spektrogrammin maksimiarvot eri siniaallon amplitudiarvoilla. Tulos on esitetty kuvassa 20.



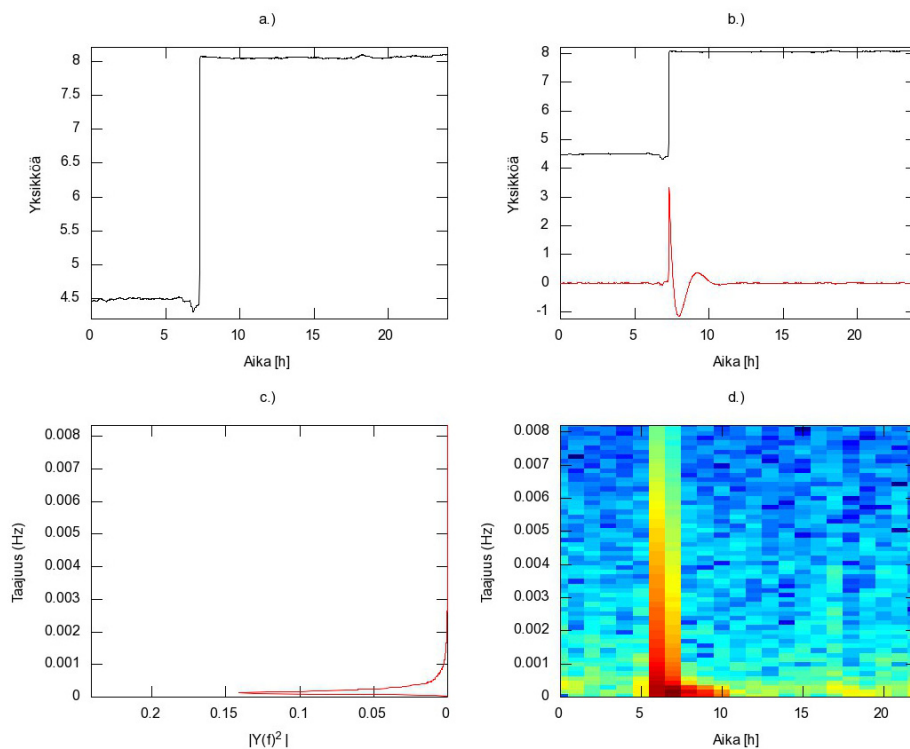
Kuva 20. Spektrogrammin maksimiarvot eri sinisignaalin amplitudeilla, eli halutuilla värehtelyrajoilla, muodostavat parabolisen käyrän.

Huomataan, että kuvaaja on parabolinen. Tämä havainto on yhtäpitävä spektrogrammin yhtälön (10) kanssa. Ottamalla neliöjuuri spektrogrammin maksimiarvosta, saadaan värehtelyrajan prosentteille lineaarisesti kasvavat arvot. Kertoimella 0,2208 saadaan neliölliset spektrogrammin maksimiarvot vastaamaan haluttua värehtelyrajaa prosentteina. Koska saatu kerroin on laskettu käyttämällä testiä, jonka tarkkuus on riippuvainen STFT:n ikkunasta, se ei ole tarkka. Käyttämällä saatua kerrointa, haluttu värehtelyraja voidaan ilmoittaa Matlabin muuttujassa suoraan prosentteina.

Käytettäessä spektrogrammin maksimiampplitudia värehtelyiden havainnoinnissa, ei saada tarkkaa prosentuaalista rajaa, jolla voitaisiin määrittää tarkasti värehteleekö mittaus vai ei. Toisaalta taas on mahdotonta määrittää tarkkaa, suureesta riippumatonta prosentuaalista rajaa, joka kertoisi tarkasti värehteleekö signaali vai ei. Spektrogrammia voidaan siis pitää

tarpeeksi hyvänä menetelmänä värähtelyiden havaitsemiseen kun asetettu värähtelyn havaitsemisrajakin on vain arvio.

Kuvan 21. kaltaiset signaalit aiheuttavat ongelman värähtelyiden tunnistuksessa. Nopea tasomuutos signaalissa aiheuttaa sen, että spektrogrammissa tasomuutoksen kohdalle tulee suuri värähtelyimpulssi ja se havainnoidaan värähtelyksi. IIR-suodatus ei pysty reagoimaan näin nopeaan muutokseen. Erityisen haastavaksi ongelman tekee se, että suodatetun signaalin käyrämuoto on lähellä värähtelevän signaalin käyrämuotoa. Suodatuksessa signaaliin jää piikki sekä pieni värähdys ennen kuin signaalin taso palautuu nolnaan.



Kuva 21. Signaali, joka luokitellaan värähteleväksi, koska signaali sisältää suuren tasomaisen muutoksen.

Tasomuutoksen sisältävä signaali tuo esiin myös toisen ongelman. Jos kuvan 21. signaalista otetaan keskiarvo, se ei kerro signaalin todellista tasoa. Kun signaalit halutaan

skaalata niiden tason mukaan, jotta ne olisivat vertailukelpoisia keskenään, on parempi käyttää mediaania kuvaamaan signaalin tasoa kuin keskiarvoa.

Vaihtamalla taajuusanalyysissä ylipäästösuodatin lineaarisesta IIR-suodattimesta epälineaariseen mediaanisuodatukseen, saadaan signaalissa olevien tasomuutosten aiheuttamat piikit poistettua taajuustarkasteluun käytettävästä signaalista. Mediaanisuodatus on alipäästösuodatin, mutta poistamalla alkuperäisestä signaalista mediaanisuodatetun signaalin, saadaan ylipäästösuodatin. Mediaanisuodattimen ikkunan koko määrittää ylipäästösuodatuksen raja-taajuuden. Vaikka mediaanisuodatusta käyttämällä saadaan ajallisesti harvat tasovaihtelut pois, jää silti tuloksiin vääriä havaintoja. Lyhyet tasomaiset muutokset eivät poistu, koska mediaanisuodattimen ikkunan kokoa on pidettävä tarpeeksi suurena, että saadaan halutut värähtelyt näkymään.

Mediaanisuodatusta käyttämällä saadaan räikeimmät tasovaihtelut poistettua värähtelyiden havaintojoukosta, mutta mediaanisuotimen epälineaarisuuden takia signaalit eivät ole enää täysin vertailukelpoisia. Koska mediaanisuodatuksesta ei saada merkittävää hyötyä ja tärkeämpää on säilyttää signaalien vertailukelpoisuus, hyväksytään mahdolliset virhetulokset ja käytetään lineaarista IIR-suodatusta poistamaan tasovaihtelut. Lopulta värähtelevien signaalien tunnistus jää joka tapauksessa prosessia tutkivalle henkilölle.

Spektrogrammi antaa paljon tietoa signaalista. Pistemäinen värähtelyn havainnointimenetelmä ei välttämättä ole paras mahdollinen keino tunnistaa värähtelyä, varsinkin kun se tunnistaa tasomaiset muutokset värähtelyinä. Esimerkiksi tutkimalla värähtelyiden pinta-alaa, saataisiin enemmän tietoa värähtelyn voimakkuudesta, kestosta ja taajuusominaisuuksista. Värähtelyiden havainnointiin voitaisiin käyttää myös parametrisia menetelmiä. Menetelmiä voitaisiin käyttää joko itsenäisesti värähtelyiden havaitsemiseen tai yhdessä taajuusanalyysin kanssa varmistamaan saatu tulos.

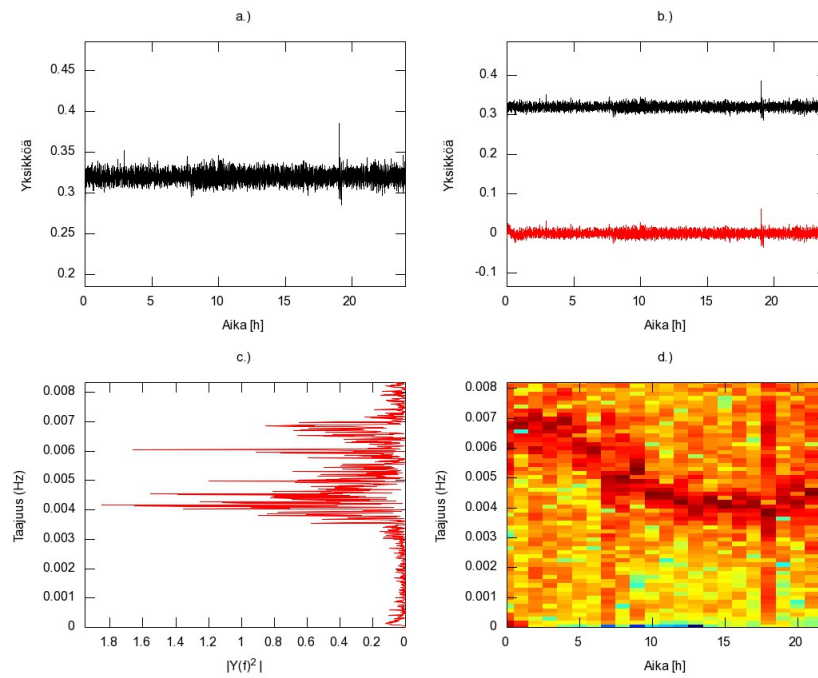
Pistemäinen värähtelyn tutkiminen spektrogrammista on kuitenkin riittävä värähtelyiden havaitsemiseen. Menetelmän avulla saadaan havaittua signaalit, jotka sisältävät yli viisi prosenttia värähtelyä signaalin tasoon nähden, hyvin helposti ja kohtalaisen vähällä laskenta-ajalla.

Värähtelyitä ei ilmoiteta signaaleille, jotka ovat tasomaisia, koska tasomaisesti muuttuville signaaleille löytyy hyvin helposti tasojen vaihtelun aikaväliin perustuva taajuus. Vaikka spektrogrammia käytetään värähtelyiden havaitsemiseen, informaatiokenttään tuodaan tieto FFT:n maksimipiikin taajuudesta, koska FFT:n taajuusresoluutio on paljon parempi.

4.15 Jatkuvat värähtelyt

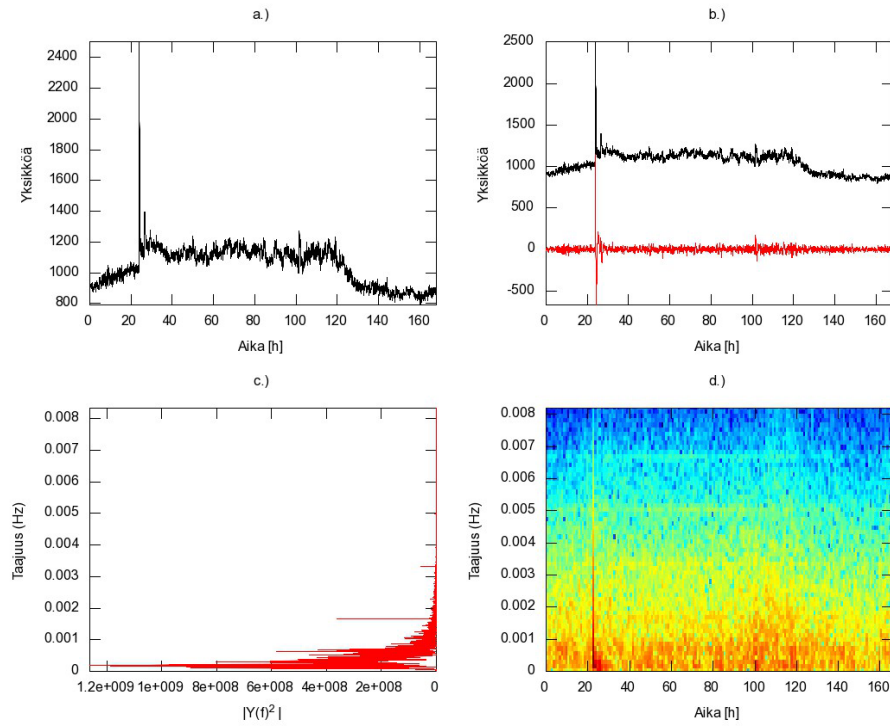
Värähtelyt -havainnointimenetelmä kertoo, sisältääkö signaali voimakkaita värähtelyitä. Olivat värähtelyt sitten jatkuvia tai hetkellisiä. Signaalit, joissa on jatkuvaa värähtelyä, voidaan jakaa kahteen tyyppiin: ei-stationäärinen ja stationäärinen signal. Näissä kahdessa erona on, että toisessa taajuus muuttuu ajan suhteen ja toisessa taajuus pysyy samana koko tarkastelujakson suhteen.

Kuvassa 22. on esitetty signaali, jossa on värähtelyä, jonka taajuus vaihtelee ajan mukaan. Kyseisen signaalin värähtely ei ole sinänsä merkittävää, ja jos olisi, värähtelyiden havainnointi huomaisi sen. Tällainen signaali, jossa taajuus muuttuu ajan suhteen herättää mielenkiinnon. Miksi tällainen signaali on prosessissa, miten se syntyy ja millä tavalla se vaikuttaa prosessiin?

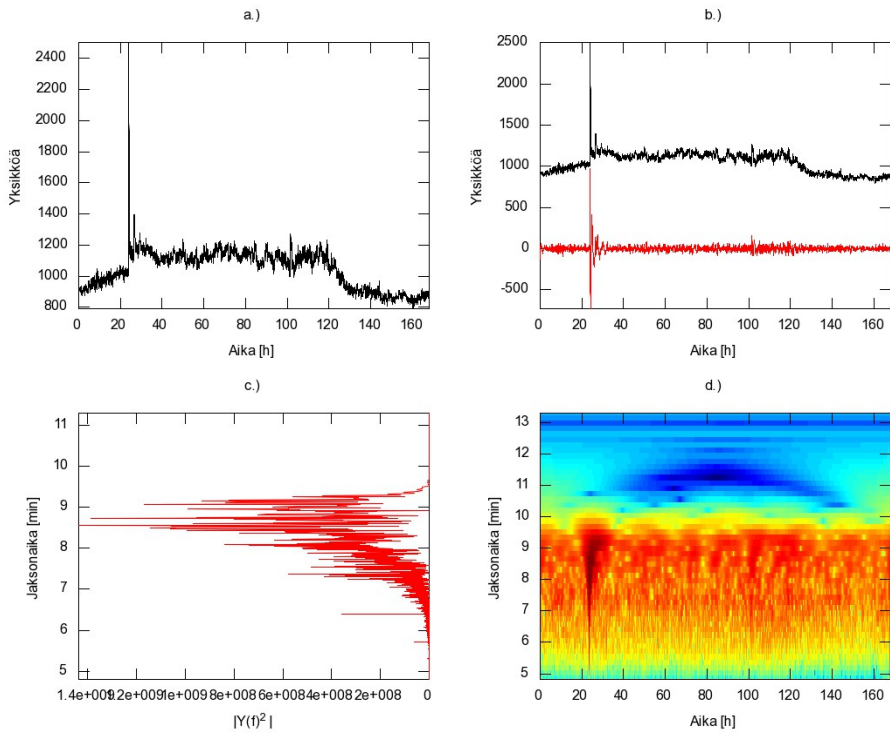


Kuva 22. Non-stationary signal eli signaali, joka värähtelee ajan suhteen vaihtuvalla taajuudella.

Tutkitaan mittausta, joka sopii sekä suuret ääriarvot, että värähtelevä -havaintoihin. Kuvat 23. ja 24. esittävät samaa signaalia. Toisessa kuvista on aika-taajuusanalyysi tehty käyttäen spektrogrammia ja toisessa wavelet-menetelmän scaleogrammia. Spektrogrammista nähdään, että signaali sisältää heikkoa jatkuvaa värähtelyä eri harmonisilla taajuuksilla. Värähtelyt -havainnointi olisi havainnoinut suuren transienttivärähtelyn, mutta ilman sitä signaali ei olisi saanut havaintoa.



Kuva 23. Pitkän aikavälin mittaus, jossa on suuri värähdys. Aika-taajuuskuvaaja on laskettu STFT:llä. Kuvasta voidaan havaita useita jatkuvia värähtelytaajuuksia.

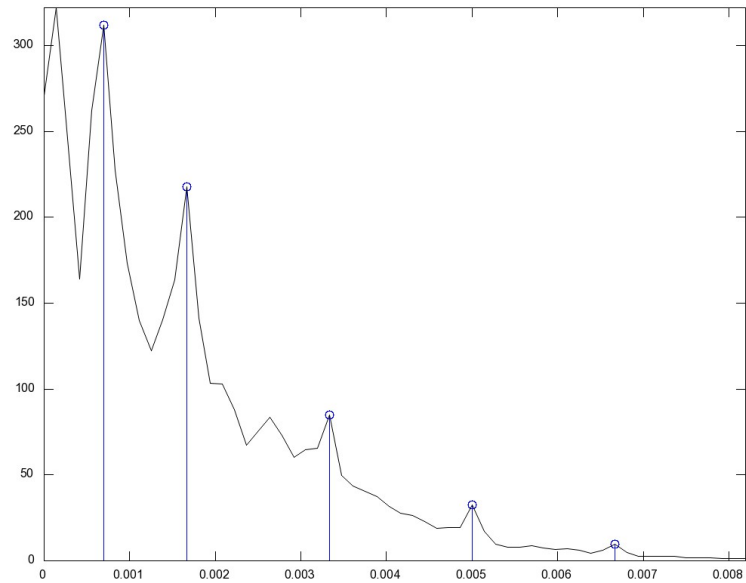


Kuva 24. Kuvassa on sama signaali kuin edellisessä kuvassa, mutta aika-taajuuskuvaaja laskettu wavelet-menetelmällä. Edelliseen kuvaan nähden resoluutio on parempi, mutta jatkuvia värähtelyitä ei pystytä näkemään kuvaajasta.

Kuvista voidaan havaita, että scaleogrammin resoluutio on parempi. Vaikka scaleogrammin resoluutio on parempi, näkyvät jatkuvat taajuudet spektrogrammista. Koska wavelet-menetelmällä jatkuvat taajuudet on vaikeampi löytää ja sen laskennan suoritusaika on pidempi, valittiin STFT aika-taajuusanalyysin laskentamenetelmäksi.

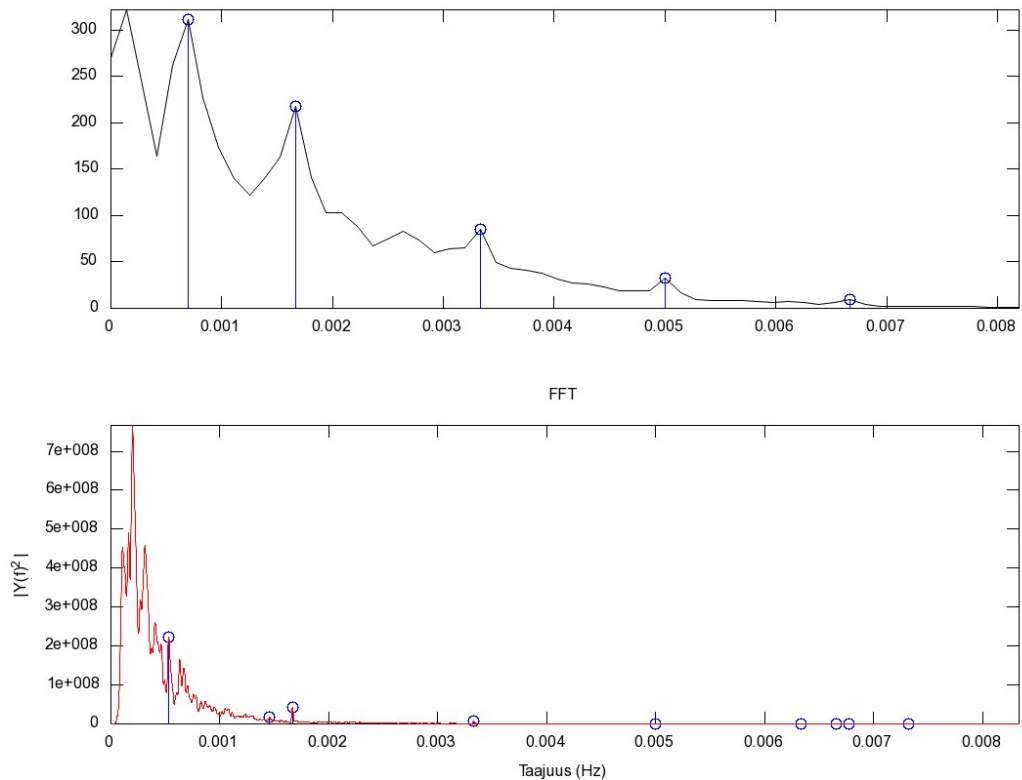
Tarkasteltava signaali sisältää sekä hetkellisen impulssimaisen muutoksen, että koko mittausjakson ulottuvia värähtelyitä. Koko mittausjaksosta otetusta FFT:stä pystytään näkemään impulssimaiset värähtelyt sekä heikommat jatkuvat värähtelyt. Kummatkin muodostavat kuvaajaan piikkejä. Nämä piikit voitaisiin tunnistaa, mutta pelkän FFT:n avulla ei voida jatkuvia taajuuksia erotella impulssimaisista.

Palautetaan spektrogrammin tuottama tieto takaisin amplituditasoon niin, että korostetaan jatkuvia taajuuksia. Jatkuvat värähtelyt muodostavat amplituditasoon piikkejä. Piikkien tunnistukseen kehitettiin menetelmä, joka korkeus- ja leveyskriteereillä hyväksyy tai hylkää maksimi-arvot. Havaitaan kuitenkin, että piikkien tunnistus löytää muitakin piikkejä kuin jatkuvat värähtelyt. Jotta saadaan lisättyä saatujen tuloksien luotettavuutta, verrataan tunnistettuja piikkejä FFT:n piikkeihin.



Kuva 25. Jatkuvien taajuuksien kohdille muodostuu piikit, jotka havaitaan piikkien tunnistuksella.

Jatkuvien värähtelyiden taajuuksien tunnistukseen kehitettyä menetelmää soveltamalla saadaan myös FFT:n piikit löydettyä. Koska FFT:n resoluutio on spektrogrammia huomattavasti parempi, keskiarvosuodatetaan FFT:n tulos ja pyöristetään löydetyt taajuudet. Testaamalla löydettyjä jatkuvien taajuuksien piikkejä FFT:stä löydettyihin, voidaan tarkistaa, ovatko löydetyt jatkuvat taajuudet todellisia vai onko laskentamenetelmä luonut ne. Kuvassa 26. on esitetty käsittelyssä olevan signaalin jatkuvien taajuuksien piikkien kuvaaja sekä signaalin FFT, joita vertaamalla toisiinsa löytyy kolme taajuutta.



Kuva 26. Jatkuvien värähtelyiden aiheuttamien piikkien ja FFT:stä löydettyjen piikkien avulla saadaan poistettua väärin tunnistetut jatkuvat värähtelyt. Vastaavuus löytyy taajuuksille 0.001666 Hz, 0.00333 Hz ja 0.005 Hz. Jaksonaikoina nämä vastaavat 10, 5 ja 3,33 minuuttia.

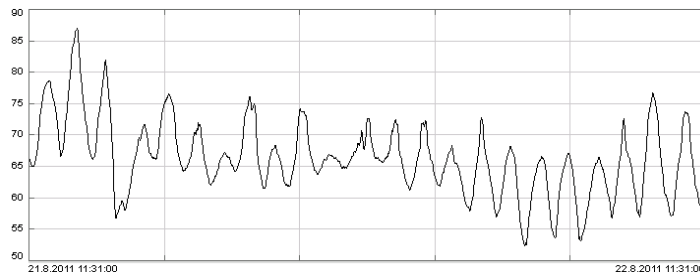
Stationaarisen signaalin havainnoinnin haasteena on hyvin vahvat, matalataajuiset jatkuvat värähtelyt. Vaikkakin vertailukuviin saadaan näkyviin ja tunnistettua nämä taajuudet, niihin muodostuu laskennassa pieni ero värähtelyn jaksonaikaan. Lisäämällä pyöristystä ne saadaan vertailussa FFT:n kanssa esille, mutta tällöin tuloksiin tulee myös liian helposti vääriä tunnistuksia erityisesti korkeammilla taajuuksilla. Ongelman sai helposti esiin luomalla yksinkertaisen matalataajuisen sinisignaalin, joka ajettiin testin läpi. Korkeampitaajuiset testisignaalit toimivat kuten haluttiin. Menetelmä tunnistaa stationääriset värähtelyt hyvin signaalista, jossa on erilaisia transienttimaisia, stationäärisiä ja ei-stationäärisiä värähtelyitä.

5 KEHITETTYJEN MENETELMIEN TESTAUS

Työn aikana luotua Wedgen lisäosan toimintaa testattiin ja säädettiin laajasti eri tehtailla, mittausjoukoilla ja aikatasoilla. Työssä kerättiin mittauksia, joissa oli ongelmia ja jotka haluttiin saada näkyviin lisäosan tekemässä analyysissä. Koska osaan havaintomenetelmistä liittyy parametreja, joiden mukaan määritetään kuuluuko signaali havaintoryhmään vai ei, arvojen säätämiseen käytettiin aikaa.

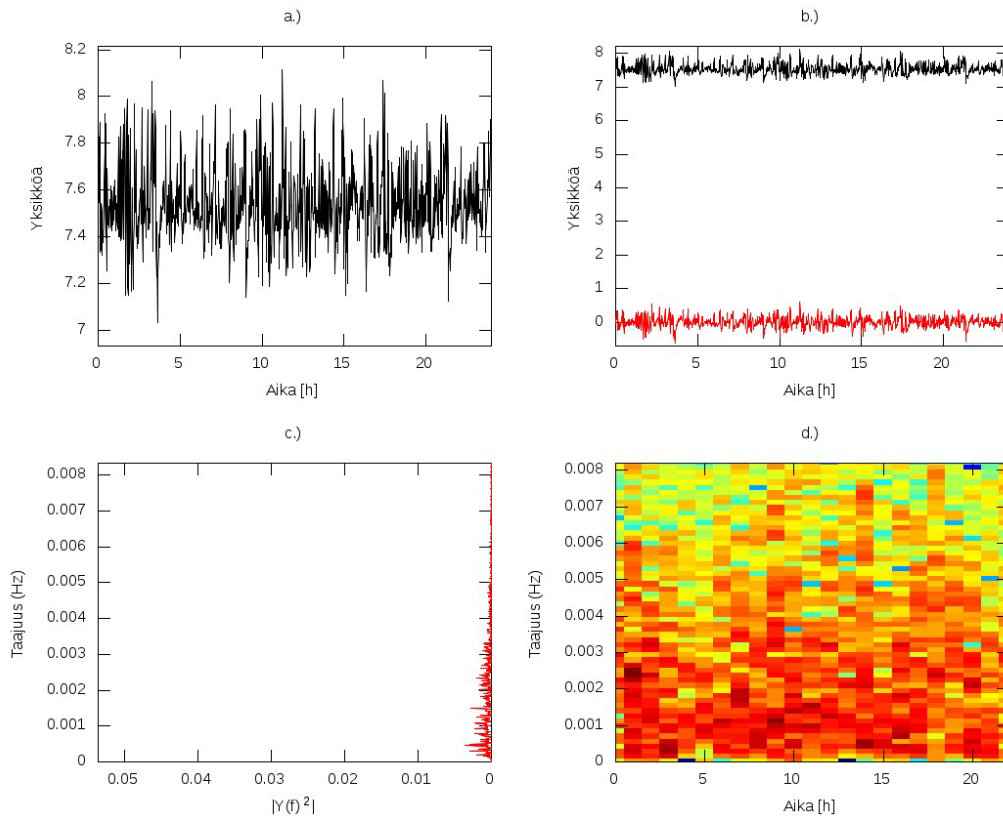
Tehtaiden mittauksen laajalla tutkimisella värähtelyiden havainnointi osoittautui tärkeäksi työkaluksi. Sillä havaitaan muun muassa säädöissä olevia ongelmia. Jatkuvat värähtelyt -testi osoittautui hyvin tarkaksi. Tämä johtuu löydettyjen taajuuksien varmistamisesta FFT:stä.

Kuvassa 27. on mittaus, joka saa jatkuvat värähtelyt -testissä havainnon. Mittauksessa säiliön pinta värähtelee säännöllisellä taajuudella. Kyseinen värähtely on merkittävää ja oli jo aikaisemmin tiedossa. Normaalityoiminnassa säiliö purkautuu tasaisesti, mutta syötön säädössä on ongelmia. Jatkuvan värähtelyn avulla löydetään helposti prosessissa olevat jatkuvat värähtelyt, jotka aiheutuvat esimerkiksi väärin toteutetusta säädöstä.



Kuva 27. Kuvassa on tehtaan erään säiliön pinnankorkeuden mittauksesta löytynyt jatkuva värähtely. Arvoasteikon yksikkö on prosenti.

Erään tehtaan mittauksia analysoitaessa ja tutkittaessa jääkö joku värähtely huomaamatta, huomattiin sakeuden mittaus, joka silmämääräisesti tulisi havainnoida värähteleväksi. Automaattinen havainnointi ei kuitenkaan luokittele sitä värähteleväksi. Laskemalla mittaukselle spektrogrammi, huomataan, että mittauksessa ei ole yhtään taajuutta, jonka amplitudi olisi tarpeeksi merkittävä värähtelyn havainnon saamiseksi. Alkuperäisen signaalin kuvaaja ja sen spektrogrammi on esitetty kuvassa 28. Todennäköisesti mittauksen signaalia on vahvistettu paljon ja samalla signaalin kohina on kasvanut.



Kuva 28. Signaalin, joka silmämääräisesti ja hajonnan perusteella värähtelee, värähtelyä ei tunnisteta. Kuvaaja a. on alkuperäinen signaali. Sen FFT on kuvaaja c. ja spektrogrammi d. Huomataan, että signaalin värähtely tapahtuu laajalla taajuusalueella ja yksikään taajuus ei nouse merkittäväksi eli värähtelyhavaintoa ei voida tehdä.

5.1 Aikavälin vaikutus mittaustuloksiin

Testataan analysointityökalun tarkkuutta eri aikaväleillä. Valitaan tarkasteluun 114 mittausta, aikaväliksi viikko ja ajetaan analyysit eri aikatasoilla. Analyysien tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Suoritus aika-analyysi. Analyysi ajettiin eri aikaväleillä valittuun mittausjoukkoon, jossa oli 114 mittausta. Aikavälinä oli viikko, ja tuotanto oli tasaista koko tarkasteltavan jakson. Analyysin löytämät havainnot on listattu taulukkoon. Kaikkia havaintoja ei saatu valituista mittauksista. Suurimmat arvot on korostettu.

Aikataso	Näytteiden määrä	Suoritus aika [s]	Jatkuvasti värähtelevä	Puuttuva tieto	Suuret ääriarvot	Värähtelevä	Leikkautuu ääriarvoihin	Taso muuttuu jaksolla	Suhteellinen hajonta suuri tai pieni	Tasomaisia muutoksia	Löytyy samankaltaisia	Keskiarvo on nolla	Keskiarvo negatiivinen	Osa arvoista negatiivisia
10 s	60481	1168,3	1	42	25	32	6	2	3	2	29	5	0	0
1 min	10081	78,1	1	5	26	24	5	7	5	11	47	1	1	0
10 min	1008	3,1	0	5	20	7	5	4	5	1	48	1	1	1
1 h	168	0,3	0	5	0	0	0	5	7	1	48	1	1	1
8 h	21	0,3	0	5	0	0	0	8	11	0	82	1	1	1

Taulukosta aluksi nähdään, että näytteiden määrän kasvaessa laskennan suoritus aika ei kasva samassa suhteessa vaan se kasvaa selvästi enemmän. Tulostuksessa oleva jatkuva värähtely näkyy kymmenen sekunnin aikatasolla sekä minuutin aikatasolla. Mittauksen jatkuvan värähtelyn taajuus on niin korkea, että siirryttäessä kymmenen minuutin aikatasoon, mittausten keskiarvotuksen aiheuttama alipäästösuodatus suodattaa tämän värähtelyn pois.

Puuttuva tieto on kaikissa muissa aikatasoissa sama, paitsi kymmenen sekunnin aikatasossa. Viidessä kaavion mittauksista positionimi oli vaihtunut ja loppuissa mittauksissa, jotka saavat puuttuva tieto -havainnon vain kymmenen sekunnin aikatasolla, ei prosessitietokantaan tallennu kymmenen sekunnin tietoa. Suurissa ääriarvoissa ja värähtelyissä aikavälin keskiarvoituksen aiheuttama alipäästösuodatus tiputtaa tuloksia. Loput taulukossa esitetyt testit joko muuttuvat mittauspisteiden mukaan tai pysyvät melkein vakiona. Samankaltaiset mittaukset lisääntyvät merkittävästi kahdeksalla tunnilla, koska näytteiden määrä on niin pieni.

Aikatazon valinnalla eli siis datapisteiden määrällä on merkitystä analyysin tekemisessä. Se, että halutaanko tutkia pidempiaikaisia trendejä vai lyhyemmän aikavälin ilmiöitä, määrittää mikä aikaväli tulisi valita. Kyseisessä testissä, jos värähtelyitä ei haluta tarkastella, riittää kymmenen minuutin aikataso. Kymmenen sekunnin aikataso ei anna merkittävää lisäarvoa analyysille verrattuna minuutin aikatasoon, ellei haluta tutkia alle minuutin värähtelyitä. Kymmenen sekunnin aikatazon laskennan suoritus aika kuitenkin kasvaa huomattavasti.

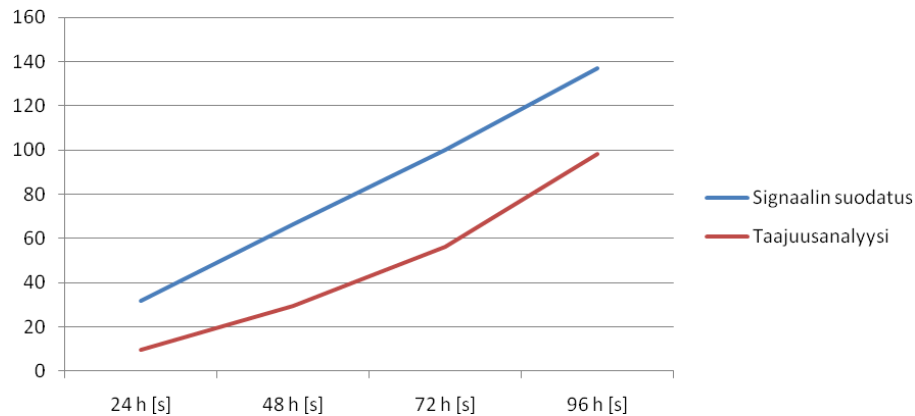
5.2 Eri menetelmien laskennan vaikutus suoritus aikaan

Lisäosan toimivuutta ja nopeutta testattiin myös laskentaan käytetyn suoritusajan suhteen. Käyttämällä prosessorin antamaa kellonaikaa voidaan seurata eri laskutoimituksiin kuluva laskenta-aikaa. Valittiin analysointi varten malli, joka sisältää 747 mittausta. Aikatasoksi valittiin minuutti, koska halutaan löytää myös matalataajuisempia värähtelyitä. Analysoidaan mittaukset aikaväleillä 24, 48, 72, 96 tuntia. Kaikki aikavälit on valittu samalta tasaisen tuotannon jaksolta.

Taulukko 4. Analyysien suoritusajat. Analyysien suoritus aika sekunteina, kun aikaväleiksi on valittu 24, 48, 72 ja 96 tuntia tasaisen tuotannon jaksolta.

	24 h [s]	48 h [s]	72 h [s]	96 h [s]
Signaalin suodatus	31,61	66,27	100,06	137,20
Taajuusanalyysi	9,67	29,44	56,44	98,00
Korrelaatio	0,78	0,98	1,19	1,39
Ääriarvot	0,30	0,67	0,94	1,31
Dynamiikka	0,36	0,66	0,75	1,02
Alkumääritykset	0,25	0,44	0,63	0,83
Suhteellinen hajonta	0,19	0,36	0,58	0,83
Signaalin taso vaihtuu	0,17	0,48	0,58	0,78
Sisältää NAN	0,20	0,42	0,50	0,55
Hajonta on nolla	0,06	0,14	0,23	0,48
Tasomaisia muutoksia	0,11	0,30	0,33	0,48
Nouseva tai laskeva	0,06	0,16	0,22	0,31
Arvo vaihtunut 2-20	0,05	0,11	0,13	0,16
Puuttuva tieto	0,03	0,06	0,08	0,13
Osa arvoista negatiivisia	0,02	0,03	0,05	0,06
Arvo on nolla	0,00	0,00	0,02	0,05
Keskiarvo negatiivinen	0,02	0,02	0,02	0,05
Yhteensä	43,87	100,53	162,72	243,62

Taulukosta nähdään, että signaalin suodatus ja taajuusanalyysien laskeminen vie eniten suoritus aikaa. Kuvassa 29. on esitetty signaalin suodatuksen ja taajuusanalyysin vaatimat laskenta-ajat kuvaajina. Nähdään, että taajuusanalyysin laskenta-aika lisääntyy epälineaarisesti näytemäärän lisääntyessä. Mitä enemmän näytteitä, sen kauemmin laskenta kestää. Tämä vastaa toisessa luvussa esitettyjä teorioita FFT:n laskenta-ajoista. Huomioitavaa on, että taajuusanalyysi sisältää myös jatkuvat värähtelyt -havainnoinnissa käytetyn piikkien tunnistuksen ajan ja siis lisää taajuusanalyysin laskenta-aikaan lineaarisuutta.

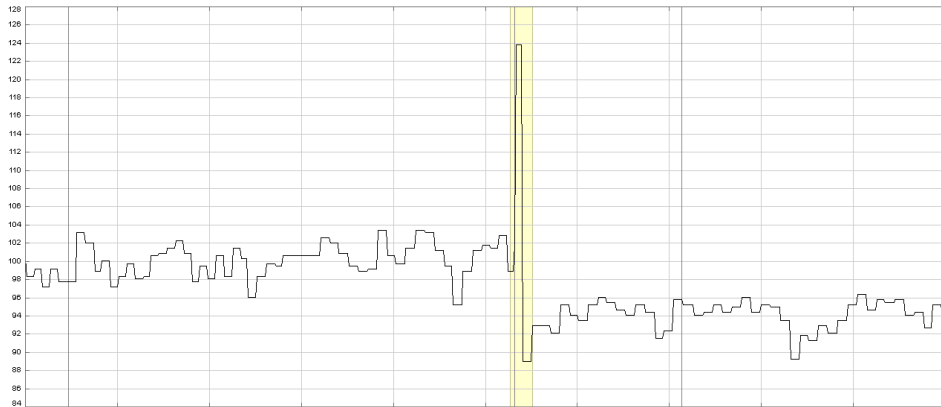


Kuva 29. Signaalin suodatus kasvaa lineaarisesti näyttemäärän kasvaessa. Signaalien taajuusanalyysien laskenta-aika ei kasva lineaarisesti vaan tarvittava laskenta-aika lisääntyy näyttemäärän lisääntyessä.

Aikaisemmasta testistä nähdään, että kun näyttemäärä kymmenkertaistui, kokonaislaskenta-aika kertaantui noin kahdellakymmenelläviidellä. Tästä testistä samaa johtopäätöstä ei voida tehdä. Tuloksista ja kokemuksesta voidaan kuitenkin sanoa, että noin kymmentuhannen näytepisteen analysointi noin sadasta mittauksesta kestää hieman yli minuutin. Kymmenen tuhatta näytepistettä vastaa viikkoa minuutin aikatasolla. Suoritus-aika riippuu myös analyysiä suorittavan tietokoneen nopeudesta ja muusta kuormasta.

5.3 Ongelma integraatin lopputuotteen laadussa

Testataan luotua työkalua tehdasympäristössä ja hyödynnetään sitä ongelmassa, joka on ilmennyt sellu- ja paperitehtaan toiminnassa jo pidempään, eikä sille ole löytynyt selvää syytä. Ongelma ilmenee lopputuotteen laatumittauksen tason vaihtumisena kun siirrytään välillä toiseen lajiin ja palataan takaisin. Kuvassa 30. on esitetty laatumittaus, missä ongelma ilmenee. Tällainen laadussa tapahtuva tason muutos ei ole toivottavaa.

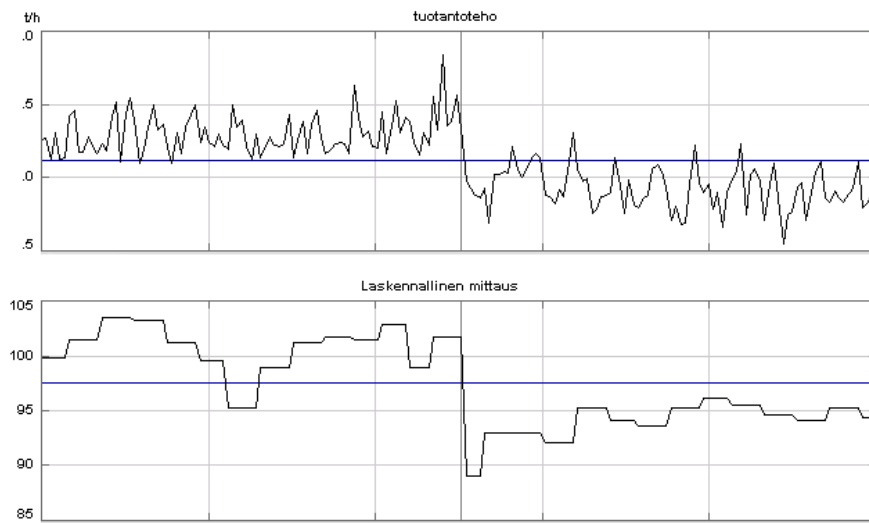


Kuva 30. Kuvassa on lopputuotteen laatumittaus. Mittausalue on viisi päivää, mutta siitä on rajattu pois se aika, jolloin on ajettu toista lajia. Poistetun aikavälin kohta on keltaisella korostetun alueen sisällä. Signaalin taso tippuu lajin vaihtamisen takia noin viisi prosenttia.

Tuntemattomasta syystä laatu tippuu tavoitearvosta noin viisi prosenttia ja tämä syy pitäisi saada selville. Syy ongelmaan voi johtua lopputuotteen tuotannosta tai muutoksista käytetyssä raaka-aineessa. Analysoidaan sekä lopputuotteen tuotannon, että raaka-aineen tuotannon signaalit.

5.3.1 Lopputuotteen valmistusprosessi

Tarkastellaan aluksi lopputuotteen valmistusprosessia käyttämällä prosessin tärkeimpiä mittauksia, jotka on valittu prosessi-insinöörin tietämyksellä Wedgen malliin. Rajataan tutkittava aikaväli siten, että se jakautuu tasan kahteen osaan. Vasemmalla on esitetty aikaväli, jolloin laatumittaus on tavoitteessa ja oikealla on aikaväli, jossa laatu on laskenut tavoitteesta. Kuvassa 31. on esitetty valitun aikavälin tuotantoteho, joka on vakio, ja laatumittaus, jossa tapahtuu noin viiden prosentin tason tippuminen.



Kuva 31. Ongelmallisen aikavälin, joka sisältää tasomuutoksen, tuotantoteho ja laatumittaus. Tuotantotehossa tason muutos on hyvin pieni, joten tuotantoa voidaan pitää vakiona valittuna aikavälinä.

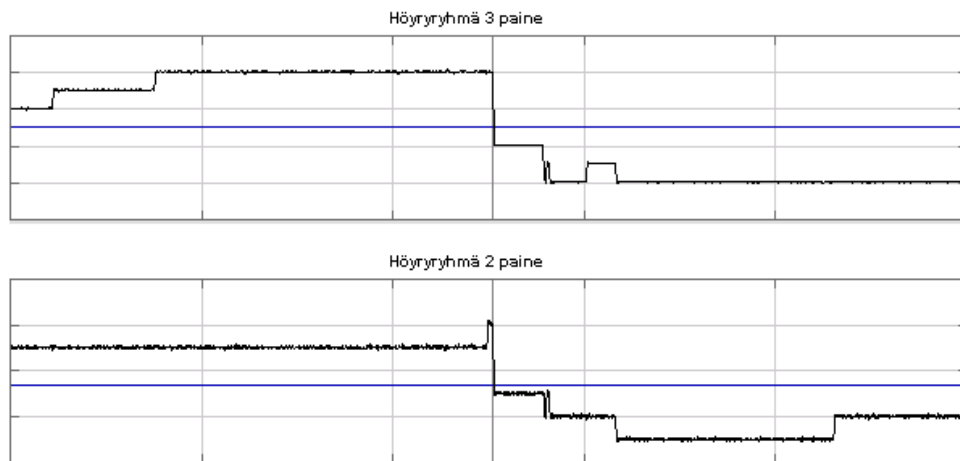
Tutkitaan, mitä prosessissa muuttuu ennen ja jälkeen keltaisen korostuksen. Ajetaan automaattinen signaalien analysointi, jonka havainnot on esitetty kuvassa 32. Yhteensä analysoitavia signaaleita on valittuna 157, joista sata mittausta sai jonkun havainnon testeissä. Näistä sadasta mittauksesta 26 mittauksessa oli puuttuvaa mittausdataa, eli ne sisältävät NaN:in, joten niille ei ole tehty kaikkia testejä.

Signaalia (157)	Havainnoidut (100)	Informaatiota (75)
Mittaukset (15)	 Suuret ääriarvot (2)  Värähtelevä (2)  Leikkautuu ääriarvoihin (2)	 Keskiarvo negatiivinen (1)  Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (1)  Löytyy samankaltaisia (8)
Säädöt (20)	 Suuret ääriarvot (6)  Värähtelevä (2)  Taso muuttuu jaksolla (2)	 Tasomaisia muutoksia (1)  Löytyy samankaltaisia (14)
Laskennalliset (13)	 Suuret ääriarvot (1)  Värähtelevä (3)  Leikkautuu ääriarvoihin (1)  Taso muuttuu jaksolla (3)	 Nouseva tai laskeva (1)  Tasomaisia muutoksia (1)  Löytyy samankaltaisia (6)
Muut (109)	 Jatkuva värähtely (1)  Puuttuva tieto (1)  Sisältää NaN (26)  Suuret ääriarvot (15)  Värähtelevä (13)  Leikkautuu ääriarvoihin (3)  Taso muuttuu jaksolla (6)	 Keskiarvo negatiivinen (21)  Nouseva tai laskeva (1)  Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (7)  Tasomaisia muutoksia (6)  Vakiotasolla (1)  Löytyy samankaltaisia (45)  Keskiarvo on nolla (1)

Kuva 32. Automaattisen signaalien analysoinnin antamista tuloksista päästään helposti käsiksi signaaleihin, joissa ilmenee tarkastelujaksolla muutoksia. Löydettyjen muutosten kautta päästään käsiksi mahdollisiin laatuongelman syihin.

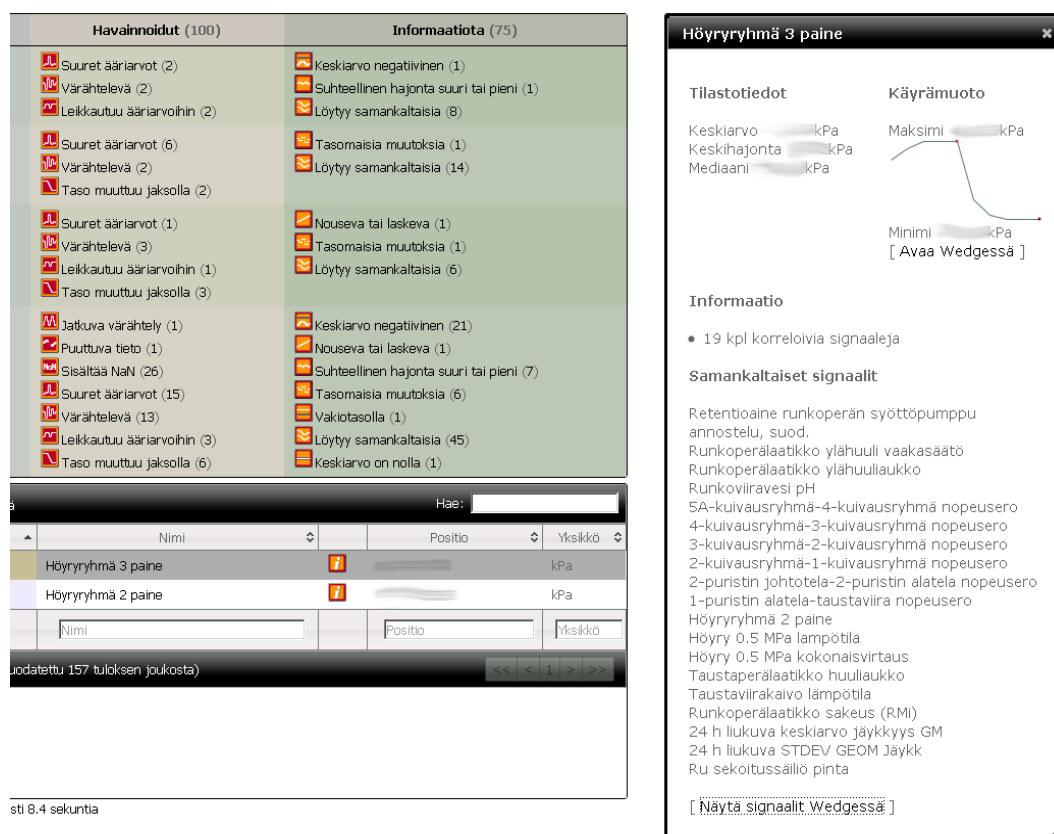
Jos etsitty ongelma on lopputuotteen valmistuksessa, on todennäköisesti joku tuotannon asetuksista jäänyt välillä ajetun lajin asetukselle. Kun tarkastellaan kahden eri mittausjakson välistä eroa ja halutaan löytää eroavaisuuksia näiden välillä, on testi, jossa verrataan signaalien alkupään ja loppupään signaalien tasojen eroja, erinomainen havainnointiväline kertomaan mahdollisesta muutoksesta. Myös suuret ääriarvot -testi kertoo kahden jakson välillä tapahtuvasta tason vaihtumisesta.

Tutkimalla signaaleita, joissa taso muuttuu jaksolla, löydetään kaksi signaalia, joissa on suuri ero kahden ajon välillä. Löydetty signaalit ovat esitetty kuvassa 33. Signaalien tasojen ero on toisessa yli ja toisessa hieman alle kymmenen prosenttia.



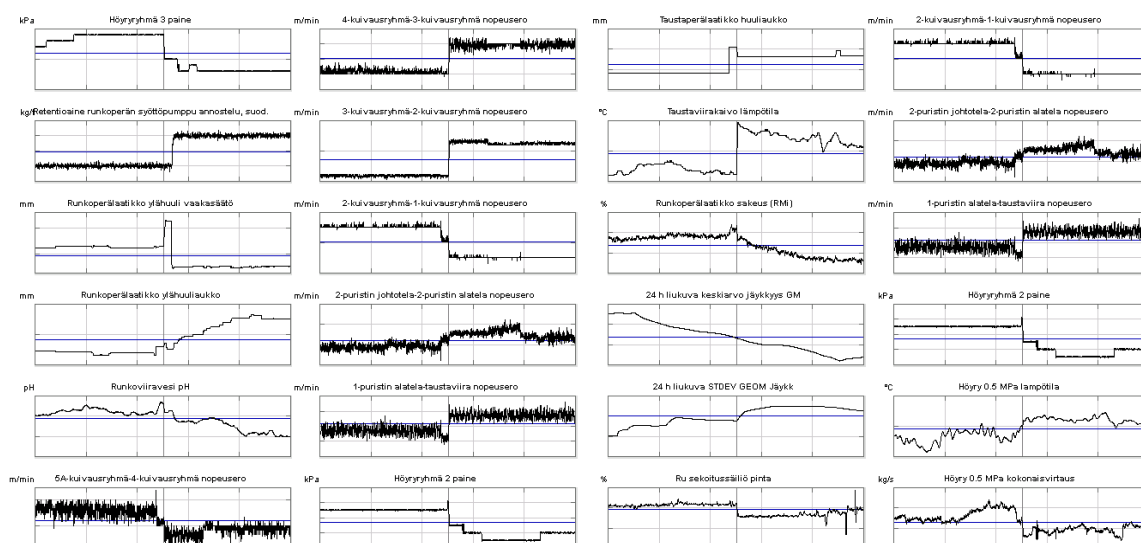
Kuva 33. Analyysin avulla löytyi nopeasti kaksi mittausta, joissa on merkittävä ero. Paine-ero mittauksissa on noin kymmenen prosenttia.

Nyt tiedetään ainakin kaksi mittausta, missä vika voi olla. Jos vika ei ole suoraan näissä mittauksissa, voidaan käyttää hyväksi samankaltaisia mittauksia. Ylätaulusta valitsemalla taso muuttuu jaksolla -havainnot, alatauluun päivittyvät kyseiset havainnot. Kuvakkeesta, jossa on i, saadaan infoikkuna halutusta signaalista ja ikkunan sisällä on listattuna kaikki samankaltaiset signaalit. Luettelon jälkeen on linkki, josta saa avattua kaikki samankaltaiset signaalit, eli kaikki signaalit, jotka korreloivat hyvin keskenään. Infoikkunan näkymä on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Alataulun kuvakkeesta, jossa on *i*, saadaan avattua signaalin infoikkuna. Ikkunaan on listattuna kaikki samankaltaiset signaalit ja niiden alapuolelta linkistä saa avattua kaikkien signaalien kuvaajat Wedgeen.

Kuvassa 35. on höyryryhmä 3 paine -mittauksen kanssa samankaltaisten mittausten kuvaajat. Huomioitavaa on, että prosessin osasta analysoidaan vain 157 prosessi-insinöörien tietämyksellä valittua, prosessin kannalta tärkeää mittausta. Analyysiä voitaisiin laajentaa valitsemalla enemmän prosessin signaaleita ja ajamalla analyysi uudestaan.



Kuva 35. Mittauksen, jonka epäillään olevan yhteydessä etsittävään ongelmaan, kuvaaja ja löydettyjen samankaltaisten mittausten kuvaajat.

5.3.2 Raaka-aineen valmistusprosessi

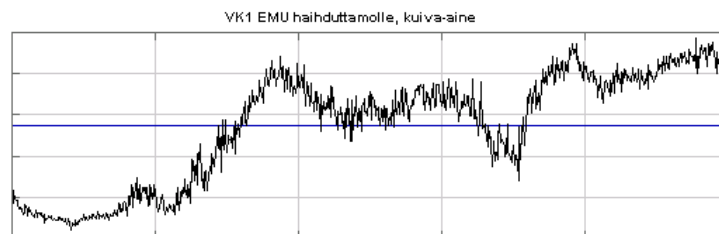
Koska on epäily, että laatuongelman voisi aiheuttaa myös raaka-aine, tutkitaan lisäksi raaka-aineen tuotantoprosessin mittaukset. Ajetaan automaattinen signaalien analysointi tuotantoprosessin alkuosaan. Valitaan tuotannosta 193 mittausta. Valinta tehdään taas prosessin asiantuntijoiden tekemästä Wedge-mallista, jonka sisältämällä mittauksilla on vaikutusta lopputuotteeseen.

Aikaväliksi valitaan tasaisen tuotannon jakso. Jakso alkaa aikaisemmin kuin lopputuotteen analyysissä ja päättyy aikaisemmin. Ennen aikavälin päätöstä on lopputuotteen lajivaihdos, jossa myös laatu tippuu, tapahtunut. Analyysin tulos on esitetty kuvassa 36.

Signaalia (193)	Havainnoidut (95)	Informaatiota (109)
Mittaukset (92)	<ul style="list-style-type: none"> Suuret ääriarvot (27) Värähtelevä (5) Leikkautuu ääriarvoihin (1) Taso muuttuu jaksolla (9) 	<ul style="list-style-type: none"> Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (4) Tasomaisia muutoksia (2) Löytyy samankaltaisia (53)
Säädöt (33)	<ul style="list-style-type: none"> Suuret ääriarvot (10) Värähtelevä (1) Taso muuttuu jaksolla (2) 	<ul style="list-style-type: none"> Keskiarvo negatiivinen (2) Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (4) Tasomaisia muutoksia (1) Löytyy samankaltaisia (12) Keskiarvo on nolla (1)
Laskennalliset (52)	<ul style="list-style-type: none"> Sisältää NaN (3) Suuret ääriarvot (20) Värähtelevä (8) Taso muuttuu jaksolla (3) 	<ul style="list-style-type: none"> Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (3) Tasomaisia muutoksia (3) Vakiotasolla (2) Löytyy samankaltaisia (32) Keskiarvo on nolla (3)
Muut (16)	<ul style="list-style-type: none"> Puuttuva tieto (3) Suuret ääriarvot (3) Värähtelevä (1) Taso muuttuu jaksolla (4) 	<ul style="list-style-type: none"> Keskiarvo negatiivinen (1) Suhteellinen hajonta suuri tai pieni (3) Tasomaisia muutoksia (3) Löytyy samankaltaisia (6)

Kuva 36. Kuvankaappaus, jossa on raaka-ainetuotannon mittauksista tehdyn analyysin tulokset.

Analyysin perusteella raaka-aine tuotanto näyttäisi toimivan hyvin. Havaintojen avulla löytyy muun muassa mittaus, jonka suhteellinen hajonta on hyvin pieni. Löydetty mittaus on prosessille oleellinen ja hyvin pieni hajonta kertoo mittalaiteongelmasta. Tämä havaittu virheellinen mittaus ei kuitenkaan vaikuta lopputuotteen laatuongelmaan.



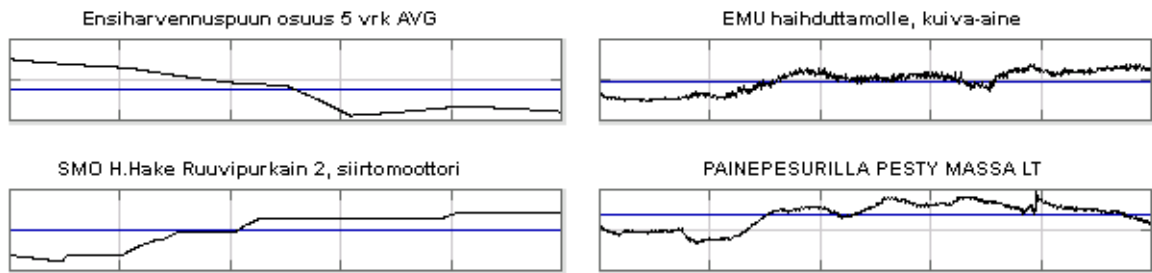
Kuva 37. Analyysillä löydetty mittaus, jossa hajonta on hyvin pieni signaalin tasoon nähden. Kuvan pystyakselin asteikko on desimaaleja ja sinisellä merkitty keskiarvo on suuri.

Taso muuttuu jaksolla -testillä löydetään kuvan 38. mittaukset, joissa on merkittäviä tasomuutoksia. Erityisesti huomio kiinnittyy EP-tornin massan lämpötilan tippumiseen. Mittauksista myös havaitaan pitkäkö katko massa-analyysin mittauksessa.



Kuva 38. Analyysin paljastamat signaalit, joissa on merkittävä tasomuutos.

Saaduista tuloksista EP-tornin lämpötila vaikuttaisi mittauksella, jolla voisi olla suurin vaikutus raaka-aineen laatuun. Tarkistetaan sen kanssa korreloivat mittaukset avaamalla mittauksen infoikkuna.



Kuva 39. EP-tornin massan lämpötilan kanssa korreloivat mittaukset.

EP-tornin kanssa korreloivat mittaukset eivät ole prosentuaaliselta vaihtelultaan niin suuria, että ne vaikuttaisivat laatuongelmaan. Itse EP-tornin lämpötilan lasku on huomattava, mutta sen avulla ei voida yksiselitteisesti selittää ongelmaa. Todennäköisesti EP-tornin lämpötilalla ja lopputuotteen laadun muutoksella ei ole mitään yhteyttä toisiinsa. Tarvittaessa analyysia voisi laajentaa valitsemalla suurempi mittausjoukko jos olisi aihetta epäillä laatuongelman johtuvan raaka-ainetuotannosta.

5.3.3 Lopputulos

Luodun Wedgen lisäosan avulla lopputuotteen laatuongelma pystyttiin hyvin nopeasti löytämään suuresta määrästä signaaleista ne, joilla voi olla vaikutusta laatuun. Lopputuotteen prosessin mittausten analysoinnin laskenta-aika oli 8,4 sekuntia ja siinä ajassa analysoitiin 157 mittausta. Analyysitulokset löytävät ongelmasignaaleja ja säästävät aikaa kun tarvitsee keskittyä vain niihin signaaleihin, joista löytyy havaintoja. On siis selvää, että luodun lisäosan avulla saadaan merkittävää hyötyä suurista signaalimääristä analysoitaessa. Lisäosan avulla ongelman mahdollisia aiheuttajia löydettiin noin tunnissa. Tähän tuntiin sisältyy ohjelman käynnistäminen, ongelman toteaminen ja siihen pureutuminen sekä myös tulosten raportointi tehtaalle.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa teollisuusprosessien signaalit luokitellaan matemaattisin keinoin. Tämän tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin selkeä havaintojen esittäminen, jatkokäsittelyn helppous ja hyvä suorituskyky. Työn yhteydessä luotiin helposti muokattava ja laajennettava työkalu, johon on helppo lisätä uusia matemaattisia testejä.

Testausosiossa käyty lopputuotteen laatuongelman ratkaisutehtävä kuvaa hyvin luodun lisäosan tehoa ja kuinka se nopeuttaa ongelmien ratkaisun löytämistä. Vaikka testissä keskityttiin vain kahden eri tuotantohetken vertailuun, antaa testattu todellinen tilanne hyvän kuvan siitä, kuinka tehokkaasti ongelmalliset signaalit löytyivät. Tapausta käsiteltäessä löydettiin muidenkin havaintojen kautta mittauksia, joihin huomio kiinnittyi. Lisäosan käyttäminen lisää prosessissa tapahtuvien ilmiöiden ymmärrystä ja helpottaa vikojen ja ongelmien löytämistä.

Testeissä tehdyt suorituskykyanalyysit osoittavat, että työkalun laskennan suorituskyky on hyvä, joten sillä pystytään analysoimaan hyvinkin suuria mittaus- ja näytemääriä. Teoriaosassa esitetyt taajuusanalyysin aritmeettisten operaatioiden määrät pitävät kuitenkin paikkansa ja näytemäärän kasvaessa laskentaa kuluva aika ei kasva lineaarisesti, joten lisäosalla on raja mittauksissa ja näytemäärässä. Testeissä onnistuttiin ajamaan noin kolmentuhannen mittauksen analyysijä. Suuremmissa mittausmäärissä laskenta onnistui hyvin, mutta tuloksia ei tullut näkyville. Yksinkertaistamalla käyttöliittymää, mahdollistettaisiin suurempien tulosjoukkojen esittäminen, mutta silloin kärsisi käytettävyydestä.

Työkalun käytössä on tärkeää, että käyttäjä osaa valita tarkoitukseen ja aikaväliin sopivan aikataason. Korkeataajuisia värähtelyitä tutkittaessa ei voida valita sellaista aikatasoa, joka alipäästösuodattaa signaalin ja hävittää korkeataajuiset värähtelyt. Toisaalta taas jos halutaan tutkia kuukausien tai vuosien aikaväliä eli siis suurempaa kokonaiskuvaa

prosessista, kannattaa valita suurempi aikataso. Kun aikaväli ja aikataso valitaan järkevästi, pysyy suoritus aika nopeana.

Myös testi, jossa verrattiin tuloksia eri aikatasoilla, osoittaa hyvin kuinka eri menetelmät toimivat, mahdollisuuksien rajoissa, eri aikatasoilla suuresti tuloksia muuttamatta. Testi osoitti myös sen, että usein riittää pidempikin aikataso kuin sekunti tai kymmenen sekuntia vielä luotettavien tulosten saamiseksi.

Yksi iso kokonaisuus lisäosassa on värähtelyiden tunnistaminen. Tunnistus tunnistaa hyvin kaikki signaalin tasoon nähden määritetyn viiden prosentin ylittävät värähtelyt. Taajuusanalyysin tekeminen keskiarvolla ja hajonnalla suhteutettuun signaalin mahdollistaa hyvin erilaisten signaalien samanarvoisen havainnoinnin. Taajuusanalyysin valinta värähtelyiden havaitsemiseksi osoittautui hyväksi.

Aikaisemmin ei ollut käytössä työkalua, jolla voitaisiin havainnoida prosessissa olevia jatkuvia värähtelyitä. Työssä ei tutkittu jatkuvien värähtelyiden syitä ja seurauksia. Olisi mielenkiintoista tutkia kuinka esimerkiksi prosessin alkupäässä oleva jatkuva värähtely vaikuttaa koko prosessin toimintaan.

Suuret ääriarvot -havainnoinnin merkitystä ja SPC:n laajentamista laadun mittauksista koko prosessiin ei testattu. Tutkimuksessa jäi selvittämättä kuinka paljon esimerkiksi selluntuotannon prosessia saisi parannettua jos SPC-ajattelu laajennettaisiin kaikkiin mittauksiin. Työkalu mahdollistaa prosessin paremman seurannan ja myös sen parantamisen kun tiedostetaan paremmin ongelmat prosessissa.

Työssä onnistuttiin löytämään yleisesti toimivia menetelmiä havainnoida signaaleja. Hyvin yksinkertaisillakin analyysimenetelmillä, yhdessä kehittyneempien menetelmien kanssa, pystytään nopeuttamaan signaalien analysointia huomattavasti. Haaste löytää prosessin

virheitä riippumatta mittauksen tasosta ja suureesta, ratkaistiin poistamalla signaalin taso ja suure tilastomatematiikan keinoin.

Valitut kirjastot, joita lisäosan toteutuksessa käytettiin, antoivat mahdollisuuden luoda dynaaminen ja helposti lähestyttävä työkalu. Lisäosan ohjelmoinnissa päästiin tavoitteisiin. Lisäosasta tuli helposti laajennettava ja se onnistuttiin liittämään Wedgen toimintaan hyvin. Mahdollisuus avata havainnoidut signaalit yhdessä Wedgen ikkunassa helpottaa jatkoanalyysin tekemistä merkittävästi.

6.1 Jatkokehityskohteet

Vaikka lisäosa toimii hyvin Wedgen kanssa, ei mittausten valintaa mallista onnistuttu saamaan toimimaan. Mahdollisuus saada mallin mittaus valituksi lisäosasta käsin olisi helpottanut varsinkin sellaisten mallien analyysiä, joissa on paljon mittauksia. Nyt jos halutaan valita mittaus, pitää se etsiä Wedgen hakutoiminnoilla tai etsiä ja valita se mallista käsin.

Lisäosan Wedge-ikkuna voidaan tulostaa, kenelle se on mahdollista, tai kuvankaappauksen avulla voidaan ikkuna liittää dokumenttiin tai sähköpostiin. Wedgeen avautuvat mittausten kuvaajat saa leikattua ja liitettyä. Olisi hyvä saada toiminnallisuus, joka mahdollistaisi havainnointitulosten viemisen Excel, CSV tai PDF -muodossa. Tällöin tuloksia voisi helpommin jakaa muille ja arkistoida.

Jatkuvien värähtelyiden havaitsemismenetelmä löytää jatkuvia värähtelyitä tehokkaasti. Menetelmää voisi kuitenkin vielä yrittää kehittää. Jatkuvat värähtelyt -havainnointi riippuu hyvin paljon piikkien tunnistuksessa käytetyistä parametreista ja löydettyjen taajuuksien pyöristämisestä. Menetelmää voisi yrittää parantaa käyttämällä erilaista jakaumaa scaleogrammin laskemisessa. Sellaista, josta jatkuvat värähtelyt pystyttäisiin havaitsemaan.

Työssä tutkittiin signaaleja Waveletin avulla vain yhdellä jakaumalla. Jos jatkuvat värähtelyt saataisiin esiin scaleogrammissa, piikkien tunnistus toimisi paremmin paremman taajuusresoluution takia.

Analyyseihin voisi lisätä testin, joka etsisi mittauksia, joilla on suuri hajonta mutta ei yhtä suurta taajuutta. Signaali on vahvistettu ja samalla satunnainen kohina on vahvistunut. Tällainen mittaus voi indikoida mittarin kunnosta, johtuvasta häiriöstä tai väärin asennuksesta. Tähän voisi kehittää testin, jossa ylipäästösuodatetun signaalin hajonta olisi yli viisi prosenttia, mutta spektrogrammi tai FFT ei anna yhtään taajuutta, joka olisi merkittävä.

6.2 Tulevaisuuden automaatiojärjestelmä

Työn aikana todettiin, että on paljon tietoa, jota ei ole saatavilla Wedgeen ja joka mahdollistaisi uusia prosessin automaattisia analysointimenetelmiä. Koska prosessin tieto on hajallaan eri systeemeissä ja järjestelmissä, ei esimerkiksi prosessin säätöarvoihin päästä käsiksi. Värähtelevä -havainnon kautta voidaan löytää värähteleviä säätöjä, mutta muuten säätöjen käsittely on tehtävä muualla.

Säätöjen analysointiin tarvittaisiin myös tieto eri prosessivaiheiden kausaalisuudesta eli syy-seuraus-suhteesta ja säädön toteutuksesta. Kausaalisuustiedosta olisi myös prosessin ymmärryksen kannalta merkitystä. Tällä hetkellä voidaan päätellä mittauksen positionimen numeroinnista mitä mittauksia ympärillä voisi olla. Käytännössä syy-seuraus-suhteita etsittäessä tarvitaan prosessikaavio.

Tulevaisuuden automaatiojärjestelmässä kaikki tehtaan prosessiin liittyvä tieto on kerätty yhteen paikkaan. Järjestelmässä olisi tallennettu nykyisten signaalien tietojen lisäksi myös niin sanottua metadataa, josta saadaan tietoon kausaalisuudet, mitä säädetään, mihin

säätöihin signaali vaikuttaa sekä minkälainen säätö on käytössä ja mitkä ovat säädön parametrit. Myös säätimen tila olisi hyvä saada tietoon. Tilatiedon signaali on nykyisinkin olemassa, mutta sitä ei usein tallenneta prosessitietokantaan.

Lisäksi metadatan olisi hyvä sisältää tiedon siitä, miten signaalin tulisi käyttäytyä tuotannon muuttuessa ja mitkä olisivat signaalin tilastolliset optimiarvot kun tuotanto toimii täydellä teholla. Tällöin voitaisiin lisätä automaattista prosessin havainnointia merkittävästi.

Metadatan lisääminen olisi mahdollista lisätä nykyisiin tehdastietokantoihin, mutta sen lisääminen vaatisi suuren työmäärän selvittää koko prosessin toiminta aina hakkeen määrästä lopputuotteen laadun mittauksiin. Helppointa olisi jos nämä tiedot otettaisiin talteen jo tehtaita suunniteltaessa, koska silloin tarvittava tieto on parhaiten saatavilla piirustuksissa, malleissa ja simuloinneissa.

On muistettava, että jos mittauksista olisi olemassa metadataa, vaatisi se ylläpidon. Jos teollisuusprosesseihin toteutettaisiin automaattisia seurantajärjestelmiä, jotka perustuisivat metadatan käyttöön, huonosti ylläpidetystä metadatasta olisi enemmän haittaa kuin hyötyä.

7 YHTEENVETO

Diplomityössä kehitettiin automaattisia signaalien analysointimenetelmiä ja Wedge-ohjelmaan lisäosa, jolla tulokset esitetään. Työn pyrkimyksenä oli luoda työkalu, joka helpottaa vikojen ja ongelmien löytämistä suuresta määrästä mittauksia ja auttaa niiden ratkaisemisessa.

Teollisuusprosessien tuottamia signaaleja käsiteltiin stokastisina eli satunnaisina signaaleina tilastomatematiikan keinoin. Käsiteltävät signaalit useissa testeissä oli ylipäästösuodatettuja, koska haluttiin poistaa tuotantotason vaihtelut. Värähtelyiden tutkimisessa päädyttiin taajuusanalyysiin, koska työssä rajattiin havainnointien teko valittuun aikatasoon. Samankaltaisten mittausten löytämiseen käytettiin hyväksi korrelaatiota.

Työssä onnistuttiin tekemään työkalu, jonka avulla saadaan analysoitua suuri määrä signaaleita helposti ja nopeasti. Työkalun tulosten esitysmuoto mahdollistaa myös signaalien syvällisemmän tarkastelun. Työkalua testattiin sekä sellu- ja paperiteollisuuden mittauksissa ja analysoitiin työkalun suorituskykyä eri mittaus- ja näytemäärillä. Tutkimuksessa otettiin esimerkiksi ja testiksi todellinen ongelmatilanne lopputuotteen laadussa. Noin tunnin työn jälkeen oli tiedossa useita mittauksia, jotka voivat olla syynä laatuongelmaan.

Analysointi esikäsittelee tiedon niin, että oleelliset signaalit saadaan esille ja mahdollisiin prosessin ongelmiin päästään helposti ja nopeasti käsiksi. Toisin sanoen, työssä onnistuttiin helpottamaan ja nopeuttamaan sen henkilön työtä, joka yrittää ratkaista prosessissa olevia ongelmia.

LÄHDELUETTELO

- (Aumala, 1989) Olli Aumala 1989, ”Mittaustekniikan perusteet”, toinen korjattu painos, Otatieto, ISBN 951-672-106-0, s. 114, 115-119
- (Aumala, 1995) Olli Aumala, Heimo Ihalainen, Heikki Jokinen ja Juha Kortelainen 1995, ”Mittaussignaalien käsittely”, toinen uudistettu painos, Pressus, ISBN 952-9835-16-7, s.3, 74, 105
- (Boashash, 2003) Boualem Boashash 2003, ”Time Frequency Signal Analysis and Processing”, first edition, Elsevier, ISBN 0-08-044335-4, s. 39-40
- (Bonavita, 2006) Nunzio Bonavita, Jaime Caserza Bovero, Riccardo Martini ja Lorenzo De Lorenzo 2006, ”Control performance monitoring: a data-driven approach”, Process and control system performance monitoring, ANIPLA Workshop, Milan, 19 September 2006.
- (Cohen, 1995) Leon Cohen 1995, ”Time-frequency analysis”, Prentice-Hall, ISBN 0-13-594532-1, s. 6
- (Heideman, 1984) M. Heideman, D. Johnson ja C. Burrus 1984, "Gauss and the history of the fast fourier transform", ASSP Magazine, IEEE, vol.1, no.4, pp.14-21, October 1984

- (Ho, 1993) Tony Ho & Christer Henriksson 1993, "Improving product quality in a pulp mill using statistical process control (SPC)", Electrical and Computer Engineering, 1993. Canadian Conference on , vol., no., pp.953-957 vol.2, 14-17 Sep 1993
- (Kuo, 2001) Sen M. Kuo & Bob H. Lee 2001, "Real-Time Digital Signal Processing", John Wiley & Sons, ISBN 0-470-84137-0, s. 181,314,315
- (Mertins, 1999) Alfred Mertins 1999, "Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications", John Wiley & Sons, ISBN 0-471-98626-7, s. 201, 214
- (Oppenheim, 1999) Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer ja John R. Buck 1999, "Discrete-time signal processing", second edition, Prentice-Hall, ISBN 0-13-754920-2, s. 439, 442, 589
- (Proakis, 1996) John G. Proakis & Dimitris G. Manolakis 1996, "Digital Signal Processing - Principles, Algorithms, and Applications", third edition, Prentice-Hall, ISBN 0-13-394289-9, s. 11, 330, 614, 619
- (Pöllänen, 2007) Kati Pöllänen, Riku Pöllänen, Toni Pirhonen ja Olli Pyrhönen 2007, "Metsäklusterin tutkimusverkosto: Metsäteollisuuden prosessien automaation, diagnostiikan ja kunnossapidon tutkimus", Lappeenrannan teknillinen yliopisto, ISBN 978-952-214-458-4, s. 30

- (Thambirajah, 2010) J. Thambirajah, E. Barocio ja N.F. Thornhill 2010, "Comparative review of methods for stability monitoring in electrical power systems and vibrating structures", Generation, Transmission & Distribution, IET , vol.4, no.10, pp.1086-1103, October 2010
- (Vetterli, 1992) Martin Vetterli & Cormac Herley 1992, "Wavelets and Filter Banks: Theory and Design", IEEE transactions on signal processing, vol. 40, no. 9, September 1992, pp. 2207-2232
- (Weller, 2000) Edward F. Weller 2000, "Practical Applications of Statistical Process Control", IEEE software, May/June 2000, pp. 48-55