



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MATTI MÄKITALO  
SÄÄTÖPIIRIEN SYSTEMAATTISEN SUORITUSKYKYTYÖKALUN  
KEHITYS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Vilkkonen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
9. elokuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**MATTI MÄKITALO:** Säättöpiirien systemaattisen suorituskykytyökalun kehitys  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 62 sivua  
Heinäkuu 2017  
Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Prosessien hallinta  
Tarkastaja: professori Matti Vilkkö

Avainsanat: Säättöpiirin suorituskyky, oskillointi, signaalianalyysi

Teollisuuden prosesseja ohjaavat automaatiojärjestelmät ja niiden komponentit ovat mahdollistaneet kompleksisten kokonaisuuksien hallinnan. Tuotantotasojen kasvun, energia- ja ympäristöystävällisyyden myötä myös automaatiojärjestelmän toimintaan on alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota. Muuttuneiden olosuhteiden tai vääränlaisen suunnittelun tuloksena automaatiojärjestelmä ei välttämättä toimi suunnitellulla tavalla. Heikko suorituskyky vaikuttaa yksittäisten säättöpiirien kautta koko prosessin tehokkuuteen ja se tulisi havaita, jotta kunnossapitotoimenpiteet ja kehitys osataan kohdistaa oikein. Teollisuuden prosessien tehokas ylläpito ja kehitys vaativat parempaa tilannetietoisuutta automaatiojärjestelmän toiminnasta.

Tämän työn tavoitteena on kehittää säättöpiirien suorituskykytyökalu, jonka avulla voidaan havaita historiatietokantaan tallennetun datan perusteella kohteet, joissa on ongelmia ja joihin panostamalla on mahdollista parantaa prosessin toimintaa ja ennaltaehkäistä tulevia vikoja. Säättöpiirien suorituskykytyökalun ominaisuudet toteutetaan perustuen kaupallisiin ohjelmistoihin, tutkimustuloksiin ja prosessihenkilökunnan havaintoihin. Suorituskykytyökaluun toteutettaviksi tarkasteltaviksi suureiksi valitaan asetusarvon seuranta, asetusarvon muutokset, ohjauksen saturaatio, ohjauksen vaihtelu, oskillointi ja säätimen tilan tarkkailu. Säättöpiirien suorituskyky arvioidaan laskettujen ominaisuuksien perusteella. Suorituskykytyökalu toteutetaan osaksi Wedge prosessidiagnostiikkajärjestelmää. Toteutettua suorituskykytyökalua testataan Boliden Harjavallan yhdellä rikkihappotehtaalla ja tulokset käydään läpi prosessihenkilökunnan kanssa niiden validoimiseksi.

Toteutetun suorituskykytyökalun avulla kyetään löytämään suuresta kokonaisuudesta sellaiset säättöpiirit, joiden toiminnassa on ongelmia. Suorituskykytyökalun avulla on myös mahdollista havaita toteutettujen kehitystoimenpiteiden vaikutus säättöpiirin suorituskykyyn. Suorituskykytyökalun käyttöönotto uudessa kohteessa vaatii prosessituntemusta ja tulosten tarkastelussa prosessituntemuksen merkitys kasvaa. Toteutetun suorituskykytyökalun tuloksista prosessituntemusta omaava henkilö kykenee näkemään kohteet, joiden kehittämisellä on suurin merkitys kokonaisprosessin toimintaan. Toteutettu suorituskykytyökalu täyttää sille asetetut vaatimukset ja sen toimintaa olisi järkevä kehittää ja laajentaa myös muihin prosesseihin.

## ABSTRACT

**MATTI MÄKITALO:** Development of systematic control loop performance monitoring tool

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 62 pages

July 2017

Master's Degree Programme in Automation Technology

Major: Process Control

Examiner: Professor Matti Vilkkö

Keywords: Control loop performance, oscillation, signal analysis

Automation systems and their components have made control of complex industrial process possible. Demand of higher production rates, energy efficiency and environmental issues have created a need for more accurate examination of how the automation system is working. Changed conditions or wrong kind of design may lead to unwanted operation by the automation system. Poor control performance in a single control loop may affect to the overall efficiency of the process. Poorly performing control loops should therefore be noticed so required maintenance and improvements are focused correctly. Effective use of industrial processes requires improving of situational awareness of control loop performance.

The goal of this work is to develop control loop performance monitor that can detect and inform its user of poorly performing control loops. Resources can then be allocated more effectively to develop poorly performing control loops and to prevent upcoming failures. Features of the control loop performance monitor are chosen by exploring commercially available control loop performance monitors, surveys and with the help of experienced staff. The examined features of the developed control loop performance monitor are set point tracking, set point changes, saturation of control output, variation of control output, oscillation and control loop mode. Control loop performance is calculated based on those features. Control loop performance monitor is developed over existing process diagnostic system called Wedge. Developed tool is tested and the results are analysed at sulfuric acid plant at Boliden Harjavalta.

With the developed control loop performance monitor, it was possible to find poorly performing control loops from the set of control loops at the sulfuric acid plant. It was also possible to detect performance improvement in a control loop that was examined and developed earlier. Knowledge of the process is needed when commissioning the control loop performance monitor and it is in significant role when analyzing the results. Experienced staff member can detect the most critical control loops in aspect of comprehensive performance. Developed control loop performance monitor meets the objectives that where set up and based on the results it would be worthwhile to improve and expand it to other processes.

## ALKUSANAT

Diplomityö tehtiin yhteistyössä Insta Automation Oy:n ja Boliden Harjavallan kanssa vuoden 2017 tammi-kesäkuussa. Kiitos molemmille yrityksille mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta sekä yhteistyöstä.

Erityisen kiitoksen ansaitsee työn ohjaaja diplomi-insinööri Kalle Jokinen. Kallen prosessi- ja järjestelmätuntemus sekä halu auttaa helpottivat työn etenemistä hetkinä, jolloin ongelmia ilmeni. Kiitoksen ansaitsee myös työn tarkastaja professori Matti Vilkkö. Mattia haluan kiittää diplomityöhön liittyvien neuvojen lisäksi myös opintojen aikana saaduista neuvoista ja laadukkaasta opetuksesta. Kiitoksen ansaitsevat myös muut projektiin tavalla tai toisella osallistuneet henkilöt.

Opintojen loppusuoralla lienee paikallaan myös kiittää vanhempiani, perhettäni ja läheisiä ystäviäni saamastani tuesta opintojeni aikana. Saamani tuki ja luottamus ovat olleet korvaamattomia. Kiitos.

Eurajoella, 30.7.2017

Matti Mäkitalo

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tausta .....	1
1.2	Tutkimuskysymys ja tavoitteet.....	2
1.3	Metodit .....	3
1.4	Työn sisältö .....	4
2.	METODIT.....	5
2.1	Säätöpiiri .....	5
2.1.1	Mittalaite .....	6
2.1.2	Säädin.....	6
2.1.3	Toimilaite .....	9
2.1.4	Rakenne.....	11
2.2	Säätöpiirin suorituskyky.....	13
2.3	Diskreetti signaalianalyysi .....	16
2.3.1	Datan tallennus.....	16
2.3.2	Tilastolliset ominaisuudet .....	19
2.4	Signaalin suodatus.....	21
2.5	Oskilloinnin tunnistus .....	23
2.5.1	Kirjallisuus .....	23
2.5.2	Empirical Mode Decomposition .....	26
3.	TYÖKALUN TOTEUTUS.....	31
3.1	Kaupalliset ohjelmistot.....	31
3.1.1	Control Station PlantESP .....	31
3.1.2	Honeywell CPM Lite .....	32
3.2	Ominaisuudet .....	34
3.2.1	Säätimen tila.....	34
3.2.2	Asetusarvomuutokset .....	35
3.2.3	Säätimen kategoria .....	35
3.2.4	Saturaatio .....	36
3.2.5	Oskillointi.....	36
3.2.6	Ohjauksen vaihtelu.....	39
3.2.7	Asetusarvon seuranta .....	40
3.2.8	Suorituskyvyn tila .....	40
3.3	Toteutus.....	41
4.	SUORITUSKYKYTYÖKALUN TESTAUS.....	45
4.1	Tarkasteltava prosessi .....	45
4.2	Tulokset.....	48
4.3	Jatkokehityskohteet .....	56
5.	YHTEENVETO .....	58
	LÄHTEET.....	60

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACF	Autocorrelation function
A/D-muunnos	Analogia-digitaali-muunnos
BOHA	Boliden Harjavalta
CPM	Control Performance Monitor
CSS	Cascading Style Sheet
DCT	Discrete Cosine Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
EMD	Empirical Mode Decomposition
FIR	Finite Impulse Response
HTML	Hypertext Markup Language
IAE	Integrated Absolute Error
IIR	Infinite Impulse Response
IMF	Intrinsic Mode Function
KLT	Karhunen-Loève-Transform
MAE	Mean Absolute Error
MV	Manipulated Variable
PCS	Process Control System
PID	Proportional-Integral-Derivative
PV	Process Variable
RHT	Rikkihappotehdas
SP	Set Point
$a_i$	Suotimen kerroin
$b_i$	Suotimen kerroin
$C_{xy}$	Kovarianssi
$G_x$	Siirtofunktio
$k_c$	Proportionaalivahvistus
$N$	Diskreetin signaalin näytteiden määrä
$N_s$	Suotimen asteluku
$N_f$	Fourier-muunnoksen näytteiden määrä
$t$	Aika
$\Delta t$	Näytteenottovälin pituus
$\tau_d$	Derivointiaika
$\tau_i$	Integrointiaika
$\mu_x$	Odotusarvon estimaatti
$u_x$	Säätimen ulostulo
$\vartheta$	Variaatiokerroin
$x(k)$	Diskreetti signaali
$x(t)$	Jatkuva signaali
$y_s$	Asetusarvo
$\delta_x^2$	Varianssin estimaatti
$\delta_x$	Keskihajonnan estimaatti
$\rho_{xy}$	Normeerattu kovarianssi

# 1. JOHDANTO

Tietoisuuden lisääntyminen ja teknologian kehitys ovat muuttaneet toimintatapojamme ja tavoitteitamme monella tavalla. Koventuneen kilpailun johdosta monien yritysten tuotantotavoitteet ovat kasvaneet huomattavasti. Samaan aikaan toiminnan ympäristöystävällisyyteen ja ihmisten terveyteen on monilla aloilla alettu keskittyä huomattavasti aikaisempaa enemmän. Tuotannon tulisi siis olla sekä taloudellista, tehokasta että ympäristöystävällistä. Teollisuudessa ajattelutapojen muutos on alkanut näkyä muun muassa tavoitteina paremmista työolosuhteista, alentuneista päästöistä sekä tehokkaammasta tuotannosta. Automaatio on osaltaan luonut mahdollisuuden näiden tavoitteiden täyttämiseen. Toiminnassa on alettu myös entistä enemmän huomioida alentuneen tehokkuuden, laadun heikkenemisen ja tuotantokatkojen aiheuttamien taloudellisten tappioiden merkityksellisyyttä.

Teollisuuden tuotantoprosessit ovat nykypäivänä suurilta osin automatisoituja. Prosessien laajuuden ja monimutkaisten rakenteiden takia niiden operoiminen tehokkaasti ilman toimivaa automaatiojärjestelmää olisi nykypäivänä mahdotonta. Vastuu tehokkuudesta on siis osaltaan siirtynyt pois ihmisiltä automaatiojärjestelmille. Prosessien yleistä toimintaa valvoo ihminen, mutta automaatiojärjestelmän komponenttien tarkempi tarkastelu jää vähemmälle. Tehokkaan toiminnan ylläpidon ja kehityksen vuoksi olisikin tärkeää tarkastella aktiivisesti myös sitä, miten automaatiojärjestelmät suoriutuvat tehtävästään.

## 1.1 Tausta

Teollisuuden prosesseja hallitaan automaatiojärjestelmien avulla. Prosessien tehokkuuden näkökulmasta automaatiojärjestelmän tärkeimmät komponentit ovat prosessinohjausjärjestelmät sekä kenttälaitteet. Prosessinohjausjärjestelmät sisältävät säätöpiirejä. Säätöpiirit saavat mittaustietoja kenttälaitetason antureilta ja ohjaavat saamansa tiedon perusteella kenttälaitetason toimilaitteita. Toimilaitteen, kuten venttiilin, asentoa muuttamalla pyritään vaikuttamaan prosessin fysikaalisiin muuttujiin, kuten virtaukseen. Ideaalisessa tilanteessa anturilta saatava mittaustieto vastaa täydellisesti tarkasteltavan muuttujan todellista arvoa sekä muuttujalle asetettua asetusarvoa.

Todellisuudessa säätöpiirien toimintaan vaikuttavat kuitenkin erilaiset häiriöt. Häiriöitä säätöpiirin toimintaan aiheuttavat muun muassa mittausvirhe- ja kohina, toimilaitteiden epälineaarisuudet sekä säätimien sopimaton viritys. Häiriöiden ansiosta säätöpiirin kyky saattaa ja säilyttää tarkasteltava fysikaalinen muuttuja haluttuun arvoon heikkenee. Kun säätöpiiri ei enää suoriudu tehtävästään riittävän hyvin, voidaan sen suorituskyvyn sanoa olevan heikko.

Häiriöiden vaikutus säätöpiirin suorituskykyyn on vaikea, ellei mahdoton, poistaa kokonaan. Esimerkiksi mittaussignaalit sisältävät aina mittaustulosta vääristävää kohinaa. Suurimpaan osaa häiriöistä voidaan kuitenkin pyrkiä vaikuttamaan ja niiden vaikutus prosessiin minimoida. Tällaisia häiriölähteitä ovat muun muassa kuluneet säätöventtiilit, joiden epälineaarisuus saattaa aiheuttaa oskillointia säädettävään suureeseen. Toinen esimerkki häiriölähteistä joihin voidaan vaikuttaa, ovat huonosti viritetyt tai rakenteeltaan väärin toteutetut säätimet. Olosuhteiden, kuten tuotantotason tai venttiilin kunnan muutosten vuoksi hyvinkin suunniteltujen ja toteutettujen säätöpiirien suorituskyky voi ajan kuluessa laskea.

Häiriöiden aiheuttamat vaihtelut prosessisuureissa pakottavat toimimaan kauempana suureille määritetyistä raja-arvoista. On myös mahdollista, että säätöpiiri ei kykene saavuttamaan sille asetettua asetusarvoa. Tämän vuoksi häiriöiden vaikutus saattaa näkyä yksittäisten säätöpiirien toiminnan kautta niin tuotettavan lopputuotteen laadussa kuin prosessin tehokkuudessaakin. Huomioitavaa on myös oskilloinnista aiheutuva toimilaitteiden tarpeeton kuluminen. Edellä mainituista syistä häiriölähteiden paikantaminen ja vaikutusten minimoiminen mahdollisimman nopeasti pienentää niiden aiheuttamia taloudellisia tappioita.

Teollisuuden automaatiojärjestelmissä säätöpiirejä voi olla satoja tai jopa tuhansia. Koska säätöpiirit toimivat automaattisesti, ei niissä esiintyviä häiriöitä aina havaita. Häiriöitä voi olla myös hankala hahmottaa prosessidatasta paljaalla silmällä. Pahimmassa tapauksessa häiriöiden aiheuttamat ongelmat huomataan vasta tuotannon tehokkuuden tai lopputuotteen laadun heikennyttyä. Säätöpiirien määrän ollessa suuri, ongelmatilanteessa häiriölähteen paikantaminen on työlästä ja aikaa vievää. Edellä mainituista syistä prosessi ei välttämättä toimi parhaalla saavutettavissa olevalla tavalla. Oli kyse sitten tehokkuuden tai lopputuotteen laadun heikkenemisestä, aiheutuu säätöpiirien huonosta suorituskyvystä taloudellisia tappioita.

## 1.2 Tutkimuskysymys ja tavoitteet

Säätöpiirien suorituskyvyn nykytila tulisi pyrkiä havaitsemaan automaattisesti, jotta kunnossapitotoimenpiteet osataan kohdistaa ja ajoittaa oikein. Ongelma kuitenkin on, miten säätöpiirien suorituskykyä voidaan arvioida? Mitkä tunnusluvut kuvaavat suorituskykyä? Miten oskillointi voidaan tunnistaa? Miten suorituskykyanalyysin tulokset voidaan esittää selkeästi?

Työn tavoitteena on kehittää työkalu, jonka avulla prosessista saatavilla olevan datan perusteella voidaan tehokkaasti arvioida säätöpiirien suorituskykyä. Työkalun avulla pitää pystyä käytön aikana tarkastelemaan eri säätöpiirien toimintaa häiritsemättä prosessia. Kehitetyn suorituskykytyökalun tulee toimia niin, että sen suorittaminen vaatii käyttäjältään mahdollisimman vähän vaivaa ja tietämystä prosessista. Työkalun avulla tulee myös olla mahdollista tarkastella suurta joukkoa säätöpiirejä kerralla. Työkalun tarkoitus on



siis auttaa käyttäjänsä kohdistamaan mahdolliset kunnossapitotoimenpiteet oikein ja nopeasti.

### 1.3 Metodit

Säätöpiirien suorituskyvyn monitorointiin on kehitetty ja sovellettu useita erilaisia menetelmiä. Monet yritykset kuten Metso, Siemens ja Honeywell ovat kehittäneet oman työkalunsa säätöpiirien suorituskyvyn monitorointiin. Esimerkiksi Siemens CPM- (Control Performance Monitoring) työkalu toimii osana SIMATIC PCS 7 prosessinohjauksjärjestelmää, mahdollistaen hyvin monipuolisen tarkastelun ja datan saatavuuden. [1-3]

Koska säätöpiirien suorituskykyä voidaan arvioida useilla eri tavoilla, eri toimijat ovat valinneet niistä kohteeseensa parhaiten soveltuvat ja hyödyllisimmiksi kokemansa. Useista kehitetyistä suorituskykytyökaluista löytyy kuitenkin muun muassa seuraavat tarkkailtavat asiat

- Keskihajonta
- Säädin manuaalilla/automaatilla
- Asetusarvon muutosten määrä
- Arvo saturoitunut
- Oskilloinnin tunnistus

Eryteisesti oskilloinnin tunnistamisesta on tehty lukuisia tutkimuksia. Säätöpiirin oskillointi voi johtua muun muassa säätimen sopimattomasta virityksestä tai laitteisto-ongelmasta, kuten säätöventtiilin epälineaarisuudesta. Oskilloivat säätöpiirit lisäävät energiankulutusta, raaka-aineiden käyttöä sekä saattavat aiheuttaa vaihtelua lopputuotteen laadussa.[4] Oskilloivien säätöpiirien tunnistaminen on siis tärkeää, jotta kunnossapitotoimenpiteet osataan kohdistaa oikein ja ajoissa.

Vuonna 1995 Hägglund esitteli IAE (Integrated Absolute Error) -lukuun perustuvan oskilloinnin tunnistus-menetelmän. Ajatuksena esitetyssä menetelmässä on laskea erosuureen itseisarvon integraali nollakohdan ylitysten välillä. Jos integraalin arvo ylittää sille asetetun raja-arvon määritetyllä tarkastelujaksolla tarpeeksi monta kertaa, luokitellaan säätöpiiri oskilloivaksi. Esitetty menetelmä vaatii säätöpiirikohtaisten rajojen määrittämiseen tuntemusta säädettävistä systeemeistä. [4] Samaa menetelmää on käytetty myös myöhemmässä tutkimuksessa [5], jossa esitellään myös oskilloinnin alkuperän etsimiseen tarkoitettuja menetelmiä. Tämän jälkeen on kehitetty lukuisia erilaisia menetelmiä oskilloinnin tunnistamiseen, kuten autokorrelaatiofunktioon perustuvat [6-8], EMD:oon (Empirical Mode Decomposition) perustuvat [9, 10], sekä diskreettiin kosinimuunnokseen perustuvat [11, 12] menetelmät. Näiden lisäksi on kehitetty myös lukuisia muita menetelmiä. Oskilloinnin tunnistaminen onkin herättänyt huomattavaa mielenkiintoa viimeisten 20 vuoden aikana. Eryteisesti diskreettiin kosinimuunnokseen ja EMD:oon perustuvia menetelmiä on alettu kehittää. Menetelmien etuna on se, että ne voidaan suorittaa pelkän

mittausdatan perusteella eivätkä ne vaadi säätöpiirikohtaista parametrisointia. Kehitettyjen menetelmien tarkoitus onkin ollut vastata haasteeseen satojen säätöpiirien suorituskyvyn tarkkailun mahdollistamisesta. Suuri osa esitetyistä metodeista vaatii prosessidatan lisäksi myös muuta tietoa. Koska työn tavoitteena on luoda työkalu suurelle määrälle säätöpiirejä, tulee käyttäjän määrittämiä säätöpiirikohtaisia parametreja olla mahdollisimman vähän.

Kuten kehitettyjen menetelmien monipuolisuudesta voidaan päätellä, ei ole yhtä oikeaa tapaa tarkastella säätöpiirien suorituskykyä. Vuonna 2015 tehdyn tutkimuksen mukaan suorituskykytyökalujen käyttäjille hyödyllisimmiksi ominaisuuksiksi osoittautuivat toimintatilan tilastot, kuten asetusarvomuutosten määrä ja se, onko säätimet kytketty manuaalille [13]. Koska suorituskykytyökalujen käyttäjien aika ja ymmärrys ovat rajallisia, tulee tulosten esitysmuodon yksinkertaisuuteen ja selkeyteen pyrkiä panostamaan myös tätä työtä tehdessä.

## **1.4 Työn sisältö**

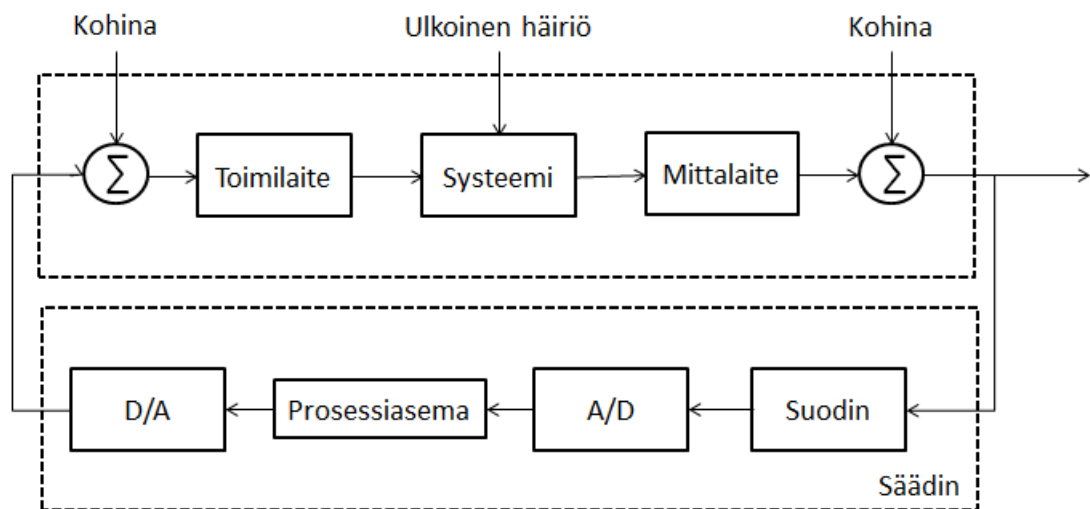
Työ on jaettu viiteen osioon. Toisen osion alussa esitellään säätöpiirien perusrakenne sekä yleisimmät ongelmat. Lisäksi osiossa käsitellään signaalin perusominaisuudet ja niiden tallennus tietokantaan. Toisen osion keskeinen asia on suorituskykytyökalun kehityksessä käytettyjen menetelmien esittely. Kolmannessa osiossa perehdytään kehitetyn suorituskykytyökalun toteutukseen ja ominaisuuksiin. Neljännessä osiossa tutustutaan suorituskykytyökalun tuloksiin tarkasteltavassa prosessissa, tarkastellaan asetettujen tavoitteiden täyttymistä sekä pohditaan mahdollisia jatkokehityskohteita. Viidennessä eli viimeisessä osiossa kootaan työn tulokset yhteenvetoon.

## 2. METODIT

Tähän kappaleeseen on koottu selostus säätöpiirien toiminnan perusteista sekä tavoista analysoida säätöpiirin suorituskykyä. Kappaleen tavoitteena on luoda kattava teoreettinen perusta säätöpiirien suorituskykyökalun implementointiin.

### 2.1 Säätöpiiri

Säätöpiiri voidaan yksinkertaistettuna ajatella koostuvan toimilaitteesta, säädettävästä prosessista, mittalaitteesta sekä säätimestä. Takaisinkytketyn säätöpiirin perusrakenne esitetään kuvassa 1.



**Kuva 1.** Säätöpiirin rakenne. (muokattu lähteestä [14])

Takaisinkytketty säätöpiiri siis mittaa tarkasteltavan prosessin tilaa (process variable, PV), vertaa sitä tavoiteltuun tilaan (set point, SP), laskee tarvittavat korjaustoimenpiteet perustuen säätöalgoritmiin ja toteuttaa lasketut toimenpiteet (manipulated variable, MV). Prosessilla tarkoitetaan tässä työssä mitä tahansa dynaamista systeemiä, jonka jotakin suuretta halutaan säätää. Esimerkiksi säiliö, jonka pinnankorkeutta halutaan säätää, on prosessi.

Ideaalisessa tilanteessa, jossa säätöpiiriin ei kohdistu rajoitteita eikä satunnaisia häiriöitä, säätöpiirin suorituskyky voitaisiin toteuttaa halutunlaiseksi pelkästään säätöalgoritmia muuttamalla. Todellisuudessa säätöpiirin eri komponentteihin kohdistuu kuitenkin erilaisia rajoitteita ja häiriöitä, joiden olemassaolo rajoittaa säätöpiirin suorituskykyä. Tarkastellaan eri komponenttien rajoituksia ja niiden vaikutuksia, jotta ymmärretään paremmin mistä tekijöistä säätöpiirin suorituskyky muodostuu.

### 2.1.1 Mittalaite

Mittalaitteella tarkoitetaan laitetta, jonka avulla tarkasteltavan suureen arvo pyritään selvittämään. Yleisimpiä teollisuudessa mitattavia suureita ovat muun muassa pinnankorkeus, lämpötila ja tilavuusvirtaus. Mittalaite ajatellaan tässä työssä koostuvan kahdesta elementistä, anturista sekä signaalin muokkaimesta. Anturi on kosketuksissa prosessiin ja se tuottaa signaalin, joka on verrannollinen mitattavaan suureeseen. Signaalin muokkain nimensä mukaisesti muokkaa anturin signaalin sopivaksi jatko-prosessointiin. [15]

Mittalaitteilla on omat rajoitteensa siitä, miten hyvin niiden avulla saadaan selville tutkitavan suureen todellinen arvo. Mittalaitteen systemaattisia ominaisuuksia ovat muun muassa vaihteluväli, lineaarisuus, herkkyys, hystereesi ja erottelukyky. Vaihteluvälillä tarkoitetaan anturin sisään- ja ulostulojen minimi- ja maksimiarvoja. Lämpötila-anturin vaihteluväli sisääntulossa voi olla esimerkiksi  $-50-100^{\circ}\text{C}$  ja ulostulossa  $4-20\text{mA}$ . Tällöin kyseisellä mittalaitteella ei ole mahdollista havaita vaihteluvälin ulkopuolelle jääviä lämpötilan arvoja.

Lineaarisuudella tai epälineaarisuudella tarkoitetaan sitä, muuttuuko anturin ulostulo vaihteluvälillään lineaarisesti vai epälineaarisesti. Ideaalisen anturin ulostulo on lineaarinen, mutta todellisuudessa ulostulo on ainakin joissain määrin epälineaarinen. Epälineaarisuuden ollessa vaihteluvälillä vähäistä, voidaan ulostulo ajatella lineaariseksi. Jos epälineaarisuus on merkittävää, voidaan epälineaarisuudesta aiheutuvaa virhe pyrkiä poistamaan korjauskertoimella. Molemmissa tapauksissa mittaukseen aiheutuu epävarmuutta.

Herkkyydellä kuvataan anturin ulostulon muutoksen suhdetta sisääntulon muutokseen. Lineaarisella anturilla herkkyys on vaihteluvälillä vakio, kun taas epälineaarisella anturilla herkkyys vaihtelee. Anturissa ilmenee hystereesiä, jos tietyllä sisääntulon arvolla ulostulon arvo riippuu siitä, kasvaako vai pieneneekö sisääntulo. Erottelukyky taas kertoo pienimmän mitattavan muutoksen suuressa, joka mittalaitteella on havaittavissa.

Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi mittalaitteen toimintaan saattavat vaikuttaa myös muut tekijät, kuten ympäristön lämpötila, ilmanpaine ja mekaaninen kuluminen. Joka tapauksessa mittaamiseen sisältyy aina epävarmuutta. Mittaustulos on täten aina arvio mitattavan suureen todellisesta arvosta. [15]

### 2.1.2 Säädin

Nykypäivän automaatiojärjestelmät on pääosin toteutettu hajautetusti. Itse säätimet on toteutettu digitaalisesti prosessiasemiin. Säätimen digitaalisen toteutuksen vuoksi mittalaitteilta saapuva analoginen mittaussignaali tulee diskretoida ennen sen käsittelyä ja jälleen muuttaa analogiseksi ennen toimilaitetta. Analogi-digitaali-muunnoksista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 2.3.

Teollisuuden käytetyin säädinratkaisu on PID- (Proportional-Integral-Derivative) säädin. Vuonna 2000 tehdyn tutkimuksen [16] mukaan 97 % asetuseroseurantaan käytetyistä säätimistä perustuvat PID-algoritmiin. Se ei kuitenkaan ole ainut teollisuudessa esiintyvä säädin, vaan myös muita säädinratkaisuja on käytössä. Yksi nopeimmin yleistyvistä säädinratkaisuista on malliprediktiiivinen säädin, jonka toiminta perustuu nimensä mukaisesti säädettävän prosessin dynamiikkaa kuvaavaan malliin. Koska kuitenkin valtaosa säädinratkaisuista perustuu PID-algoritmiin, käsitellään sen ominaisuudet lyhyesti.

PID-säädin koostuu nimensä mukaisesti kolmesta osasta. Ideaalisen diskreetin PID-säätimen eri osioiden ulostulot  $u_p$ ,  $u_i$  ja  $u_d$  ajanhetkellä  $k$  voidaan esittää muodossa

$$u_p(k) = k_c(y_s(k) - y(k)), \quad (1)$$

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \frac{k_c}{\tau_i}(y_s(k) - y(k))\Delta t, \quad (2)$$

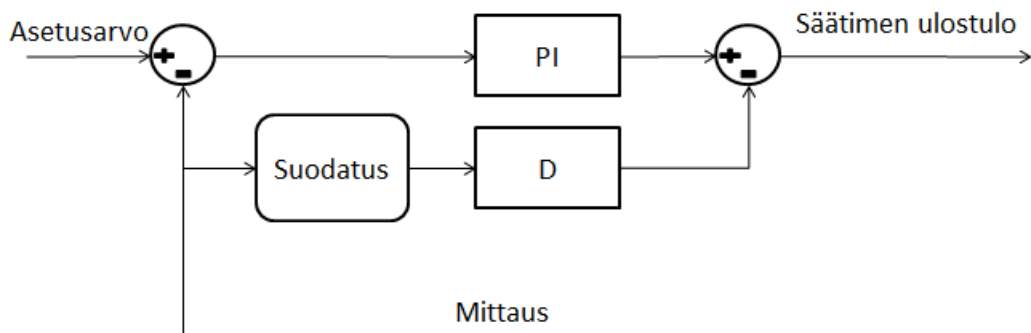
$$u_d(k) = k_c\tau_d \frac{(y_s(k)-y(k))-(y_s(k-1)-y(k-1))}{\Delta t}, \quad (3)$$

joissa  $y$  on mittaussignaali,  $y_s$  on asetuservo,  $k_c$  on säätimen proportionaalivahvistus,  $\tau_i$  on integrointiaika,  $\tau_d$  on derivointiaika ja  $\Delta t$  on näytteenottovälin pituus. PID-säätimen ulostulo  $u$  saadaan summaamalla erillisten osioiden ulostulot

$$u(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_d(k). \quad (4)$$

[17]

PID-säätimen toteutuksesta on kuitenkin edellä mainitun tavan lisäksi monia muita variaatioita. Esimerkiksi Valmet DNA-automaatiojärjestelmässä PID-säädin on toteutettu kuvan 2 esittämällä tavalla [18].



**Kuva 2.** PID-säädin,  $D$ -termi mittauksesta. (muokattu lähteestä [18])

Ottamalla säätimen derivointi-osan sisääntulo erosuureen sijaan mittauksesta saavutetaan tiettyjä etuja säätimen toiminnassa. Tällä tavoin toteutetun PID-säätimen ulostuloksi saadaan

$$u(k) = k_c(e(k) + \frac{1}{\tau_i}(e(k)\Delta t) + \frac{\tau_d(y(k)-y(k-1))}{\Delta t}), \quad (5)$$

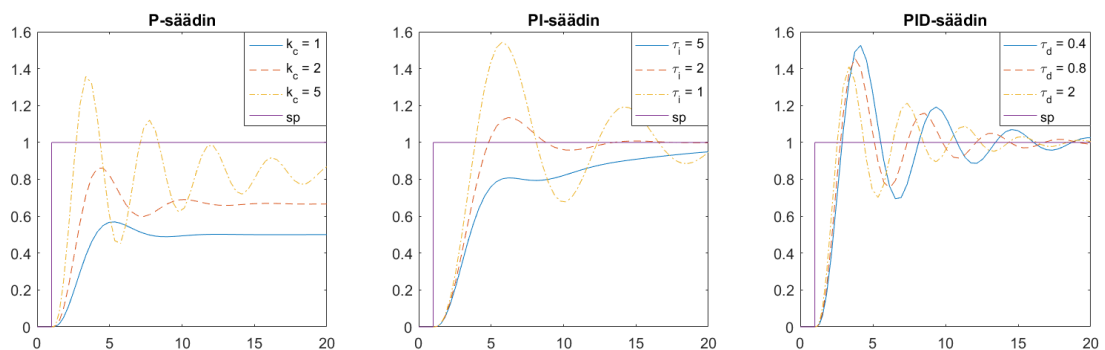
jossa  $e(k) = y_s(k) - y(k)$ . Asetusarvon ja mittauksen erotusta kutsutaan nimellä eroosuure. Asetusarvon muutokset aiheuttavat perinteisesti toteutetun PID-säätimen derivointi-osan ulostulossa nopeita muutoksia. Kun derivointi-osan sisääntulo otetaan mittauksesta, ei asetuseron muutos näy niin suurena muutoksena derivointi-osan sisääntulossa, kuin se näkyisi, jos sisääntulona olisi eroosuure.

Koska derivointiosan ulostulo perustuu sisääntulon muutosnopeuteen, saattaa myös mitaussignaalin kohina aiheuttaa toivomattomia muutoksia säätimen ulostuloon. Derivointiosalla on toisin sanoen suuri vahvistus korkeille taajuuksille. Tästä syystä derivointiosalle syötettävä signaali tulee tarpeen mukaan suodattaa. Valmet DNA:han toteutettu PID-lohko sisältää mahdollisuuden suorittaa derivointi-osan sisääntulolle 1.asteen alipäästösuodatus valitulla aikavakiolla. [18]

Esitellyistä PID-säätimen osioista voidaan käyttötarpeen mukaan käyttää vain osaa. Yleisin PID-säätimen muoto teollisuudessa onkin PI-säädin, jossa derivoiva osuus on jätetty pois käytöstä. Yhtäläillä muita osioita voidaan yhdistää tarpeen mukaan.

PID-säätimen viritysparametrit ovat yhtälöissä 1-3 esitetyt proportionaalivahvistus, integrointi-aika sekä derivointiaika. Säätimen viritysparametrien määrä on sama kuin käytössä olevien osioiden määrä. Viritysparametrien valinnalla voidaan vaikuttaa siihen, miten PID-säätimen ulostulo käyttäytyy sisääntulon suhteen. Säätimen viritykseen on monia tapoja, joista tunnetuin lienee Ziegler-Nichols – menetelmä. [17] Viritysparametrien vaikutuksen havainnollistamiseksi kuvassa 3 esitetään yksinkertaisen prosessin yksikköaskelevaste eri viritysparametreilla. Säädettävän esimerkkiprosessin siirtofunktio on muotoa

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}. \quad (6)$$



**Kuva 3.** PID-säätimen viritysparametrien vaikutus. (muokattu lähteestä [14])

Kuvassa 3 esitetyt yksikköaskelevasteet on saatu muuttamalla viritysparametrien arvoja. P-säätöä tarkasteltaessa on muutettu säätimen proportionaalivahvistusta. PI-säädintä tarkasteltaessa proportionaalivahvistus on pidetty vakiona ( $k_c = 1$ ) ja integrointi-aikaa on

muutettu. PID-säädintä tarkasteltaessa sekä proportionaalivahvistus ( $k_c = 2.5$ ) että integrointiaika ( $\tau_i = 1 \frac{2}{3}$ ) on pidetty vakioina ja vain derivointiaikaa on muutettu. Muutettujen viritysparametrien arvot on merkitty kuvaan 3.

P-säädön yksikköaskelvasteista huomataan, että prosessi ei saavuta sille asetettua asetusarvoa. Asetusarvon ja prosessin ulostulon erotusta tasapainotilanteessa kutsutaan nimellä pysyvän tilan virhe. Proportionaalivahvistuksen kasvaessa pysyvän tilan virhe pienenee, mutta ulostulo alkaa värähdellä. Proportionaalivahvistuksen kasvattaminen saattaa johtaa epästabiliin säätöön.

Lisäämällä P-säätöön integrointi saadaan aikaan PI-säädin. Kuvasta 3 huomataan, että integraattorin lisääminen poistaa pysyvän tilan virheen. Integrointiajan pienentäminen nopeuttaa vastetta, mutta myös lisää värähtelyä. Derivointiosan lisääminen vaimentaa värähtelyä, mutta liian suurilla derivointiajoilla säädön suorituskyky heikkenee. Todellisessa järjestelmässä viritysparametrien lisäksi prosessiin vaikuttavat myös monet muut tekijät, joten parametrien valinnan vaikutuksia ei voida täysin yleistää.

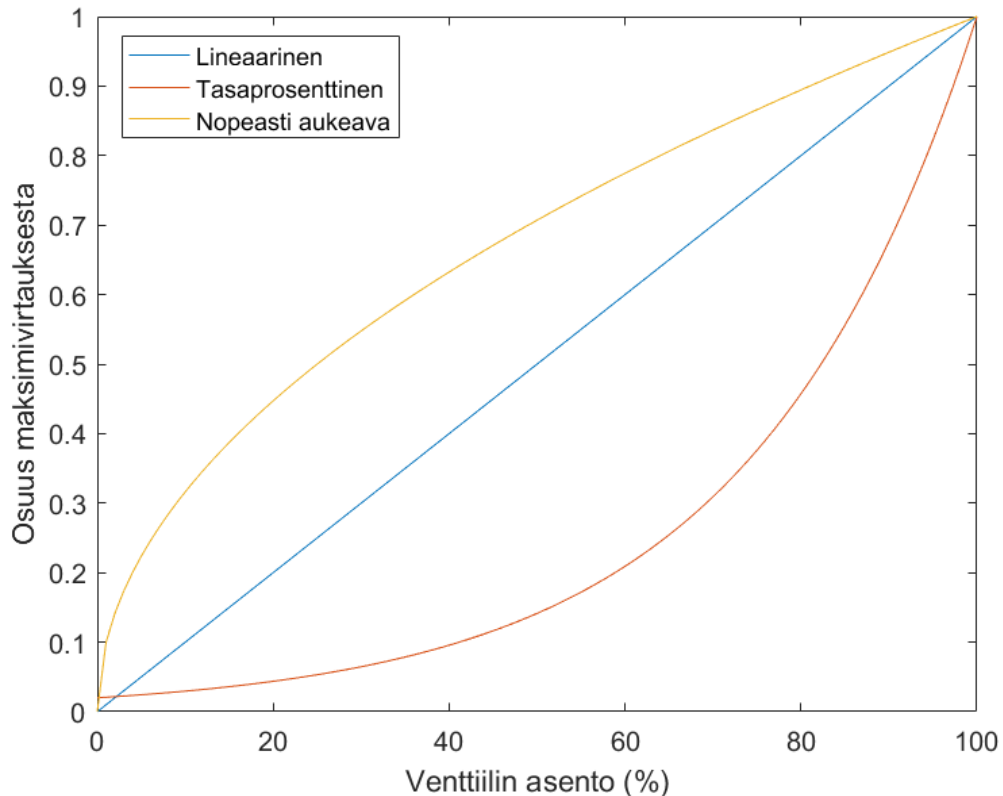
### 2.1.3 Toimilaite

Toimilaite on laite, jolla vaikutetaan joko suoraan tai välillisesti prosessin tarkasteltavaan tilaan. Suurin osa teollisuuden toimilaitteista on säätöventtiilejä, joiden avulla vaikutetaan aineen virtaukseen. Muita yleisesti käytössä olevia toimilaitteita ovat muun muassa pumput, puhaltimet, moottorit ja lämmitysvastukset. Koska säätöventtiili on selvästi käytetyin toimilaite, perehdytään sen toimintaan osana säätöpiiriä tarkemmin.

Säätöventtiili koostuu sekä toimilaitteesta että asennoittimesta. Lisäksi kokoonpano sisältää tarpeen vaatiessa muuntimen, joka muuttaa säätimeltä saapuvan signaalin toimilaitteelle sopivaan muotoon, kuten paineeksi. Eri komponenttien toiminta vaikuttaa täten säätöventtiilin suorituskykyyn. Erityisesti toimilaitteen epälineaarisuudet aiheuttavat haasteita säätöpiirin suorituskyvyn ylläpitoon. Epälineaarisuuksia venttiilissä aiheuttavat muun muassa kuollut alue, hystereesi ja ns. stick-slip-ilmio. Kuolleella alueella tarkoitetaan säätöventtiilin tapauksessa sitä aluetta, jolla asennoittimen sisääntulo ei aiheuta muutosta venttiilin asentoon. Kuollut alue saattaa aiheutua esimerkiksi kitkasta tai venttiilin mekaanisista ominaisuuksista, kuten välyksestä. Hystereesiä esiintyy säätöventtiilissä, jos venttiilin asentoon tietyllä ohjaussignaallilla vaikuttaa se, onko signaali kasvava vai laskeva. Stick-slip-ilmio taas johtuu kitkan vaihtelusta venttiilin liukupintojen välissä, aiheuttaen näin venttiilin liikkeeseen epäjatkuvuutta, vaikka ohjaussignaali olisikin jatkuva.

Edellä mainittujen toivomattomien epälineaarisuuksien lisäksi myös säätöventtiilin ominaiskäyrä voi olla epälineaarinen. Ominaiskäyrällä tarkoitetaan sitä, miten venttiilin läpi

kulkeva virtaus muuttuu venttiilin asentoa muutettaessa. Venttiilin ominaiskäyrä suunnitellaan ominaisuuksiltaan yleisimmin joko lineaariseksi, tasaprosenttiseksi tai nopeasti aukeavaksi. Erilaisten venttiilien ominaiskäyrät on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Venttiilin ominaiskäyrä. (muokattu lähteestä [19])

Nimetyistä ominaiskäyristä epälineaarisia ovat sekä tasaprosenttinen että nopeasti aukeava. Tasaprosenttisella ominaiskäyrällä tarkoitetaan sitä, että venttiilin läpi kulkeva virtaus kasvaa prosentuaalisesti saman verran toimipisteestä riippumatta. Nopeasti aukeavan venttiilin läpivirtaus sen sijaan kasvaa nopeasti pienillä venttiilin asennon muutoksilla, varsinkin toiminta-alueen alussa. Tällaisen venttiilin vahvistus on suuri, jonka takia se ei useimmiten ole soveltuva säätöventtiiliksi. Nopeasti aukeavia venttiilejä käytetään yleisesti on-off-sovelluksissa.

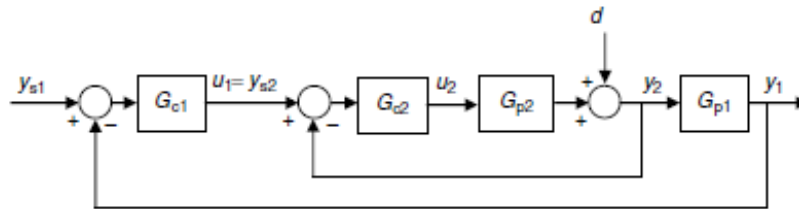
Edellä mainitut ominaiskäyrät ovat esimerkki venttiilin valmistajien ilmoittamista ominaiskäyristä. Ne pätevät silloin, kun paine-ero venttiilin yli on vakio ja venttiilin läpi kulkeva aine on kokoonpuristumatonta. Todellisuudessa kuitenkin paine-ero venttiilin yli vaihtelee ja aineet ovat kokoonpuristuvia. Tästä syystä venttiilien ominaiskäyrät todellisissa prosesseissa eroavat ilmoitetuista ominaiskäyristä. Täten venttiili, jolle on suunniteltu lineaarinen ominaiskäyrä, ei välttämättä tuota lineaarisinta ominaiskäyrää todellisessa prosessissa. Venttiilin valinnassa tulisi huomioida säädettävän prosessin ominaisuudet ja tehdä valinta perustuen todellisessa prosessissa saavutettavaan ominaiskäyrään. [19]



## 2.1.4 Rakenne

Kuvassa 1 esitetyn takaisinkytketyn säätöpiirin perusrakenteen lisäksi säätöpiiri voidaan toteuttaa myös muilla tavoin. Yleisimpiin variaatioihin perinteisestä takaisinkytkennästä kuuluvat sarja- eli kaskadisäätö sekä perinteinen takaisinkytkentä yhdistettynä myötäkytkentään.

Kaskadisäädössä perinteiseen takaisinkytkentään yhdistetään toinen takaisinkytkentäsil-  
mukka. Tyypillinen kaskadisäädön rakenne esitetään kuvassa 5.



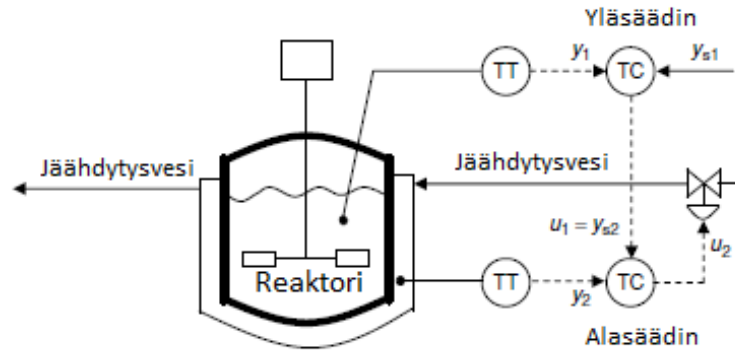
*Kuva 5. Kaskadisäädön rakenne. [17]*

Kuvassa 5  $y_{s1}$  on yläsäätimen  $G_{c1}$  asetusarvo,  $u_1$  on yläsäätimen ulostulo,  $y_{s2}$  on aläsäätimen  $G_{c2}$  asetusarvo,  $u_1$  on aläsäätimen ulostulo,  $d$  on häiriö,  $y_2$  on prosessin  $G_{p2}$  mitattu tila ja  $y_2$  on prosessin  $G_{p1}$  mitattu tila. Yläsäätimen ulostulo on aläsäätimen asetusarvo, eli  $u_1 = y_{s2}$ .

Kaskadisäätöä käytetään häiriöiden tehokkaamman kompensoinnin saavuttamiseksi. Jotta kaskadisäädön toteuttaminen on perusteltua, tulee seuraavien ehtojen täyttyä:

- Prosessin  $G_{p2}$  tarkasteltava tila on mitattavissa
- Häiriö vaikuttaa nopeammin prosessin  $G_{p2}$  ulostuloon kuin prosessin  $G_{p1}$  ulostuloon.
- Prosessin  $G_{p2}$  dynamiikka on riittävän nopea kompensoimaan häiriötä

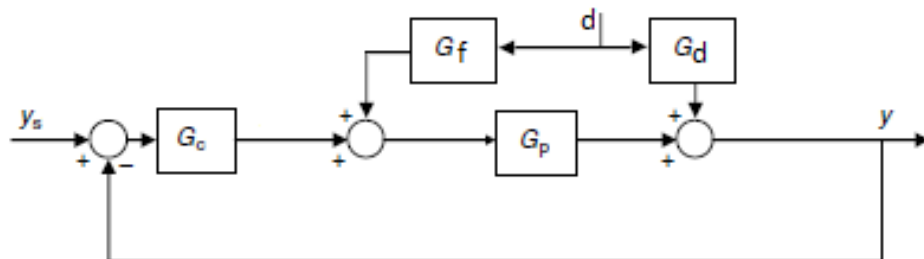
Kaskadisäädön havainnollistamiseksi esitetään reaktorin lämpötilan kaskadisäätö. Käsiteltävä prosessi ja säätörakenne esitetään kuvassa 6. Esimerkin reaktorissa tapahtuu eksoterminen reaktio, josta vapautuvaa lämpöä pyritään jäähdytysveden avulla siirtämään pois reaktorista.



**Kuva 6.** Lämpötilan kaskadisäätö. (muokattu lähteestä [17])

Kuvassa 6 esitettyssä lämpötilasäädössä säädetävinä tiloina ovat sekä reaktorin lämpötila että jäähdytysveden lämpötila jäähdytysvaipassa. Kaskadisäädön tarkoituksena on kompensoida sisään menevän jäähdytysveden lämpötilavaihtelut ennen kuin se vaikuttaa reaktorin lämpötilaan. Jäähdytysveden lämpötilavaihtelut näkyvät nopeammin jäähdytysvaipan kuin reaktorin lämpötilassa ja ohjauksella  $u_2$  voidaan nopeasti vaikuttaa jäähdytysvaipan lämpötilaan. Täten toteutettu kaskadisäätö täyttää sille asetetut vaatimukset ja saavutetaan parempi häiriön kompensointi kuin perinteisellä takaisinkytkennällä. [17]

Yhdistetyn myötä- ja takaisinkytkennän rakennetta havainnollistetaan kuvassa 7.



**Kuva 7.** Myötäkytkennän lohkokaavio. (muokattu lähteestä [20])

Kuvassa 7 siirtofunktio  $G_d$  kuvaa häiriön vaikutusta prosessin ulostuloon ja  $G_f$  on myötäkytkennän siirtofunktio. Myötäkytkennän tarkoitus on poistaa tai vähentää mitattavissa olevan häiriön vaikutus säädetävään suureeseen. [20] Mitattavissa oleva häiriö voi olla esimerkiksi sivuvirtaus säiliöön tai ympäristön lämpötila. Tilanteessa, jossa ulkoisten häiriöiden vaikutusta säädetävään suureeseen ei kyetä perinteisellä takaisinkytkennällä kompensoimaan riittävästi tuleekin selvittää, voidaanko häiriö mitata ja kompensoida myötäkytkennällä. Kustannusnäkökulmasta ajatellen tulee huomioida mahdollisten muutosten aiheuttamat kulut ja verrata niitä saavutettaviin etuihin.

## 2.2 Säättöpiirin suorituskyky

Säättöpiirin suorituskyky on sen kaikkien komponenttien suorituskykyjen summa. Sen lisäksi siihen vaikuttavat säädettävä prosessi, muut säättöpiirit, ympäristötekijät ja mahdollisesti monet muut seikat. Ideaaliset tavoitteet säättöpiirin suorituskyvyille ovat

- Suljettu systeemi on stabiili
- Tehokas häiriöiden kompensointi
- Nopea, mutta pehmeä vaste asetusarvon muutoksille
- Pysyvän tilan virheen eliminointi
- Ohjaukset maltillisia
- Säättöpiiri ei ole herkkä muutoksille

Kaikkien edellä mainittujen tavoitteiden saavuttaminen samanaikaisesti ei ole kuitenkaan käytännössä mahdollista. Eri tavoitteiden saavuttaminen vaatii säättöpiirin suorituskyvyltä erilaisia ominaisuuksia, jotka osaltaan heikentävät toisten tavoitteiden saavuttamista. Tästä syystä säättöpiirille saavutettu suorituskyky on aina jonkinlainen vaihtokauppa eri tavoitteiden välillä. Usein esimerkiksi tehokas häiriöiden kompensointi ja nopea vaste asetusarvon muutoksille vähentää säättöpiirin kykyä sietää muutoksia ja saattaa aiheuttaa voimakkaita ohjauksen muutoksia. Sama pätee myös toisinpäin, eli säättöpiirin kyky sietää muutoksia heikentää usein häiriöiden kompensointikykyä sekä hidastaa vastetta asetusarvon muutoksissa. Säättöpiirien suorituskyvyn arviointi onkin aina jossain määrin säättöpiirikohtaista. Käsitellään seuraavaksi esitetyt ideaaliset tavoitteet ja niihin liittyvät tunnusluvut tarkemmin. [21]

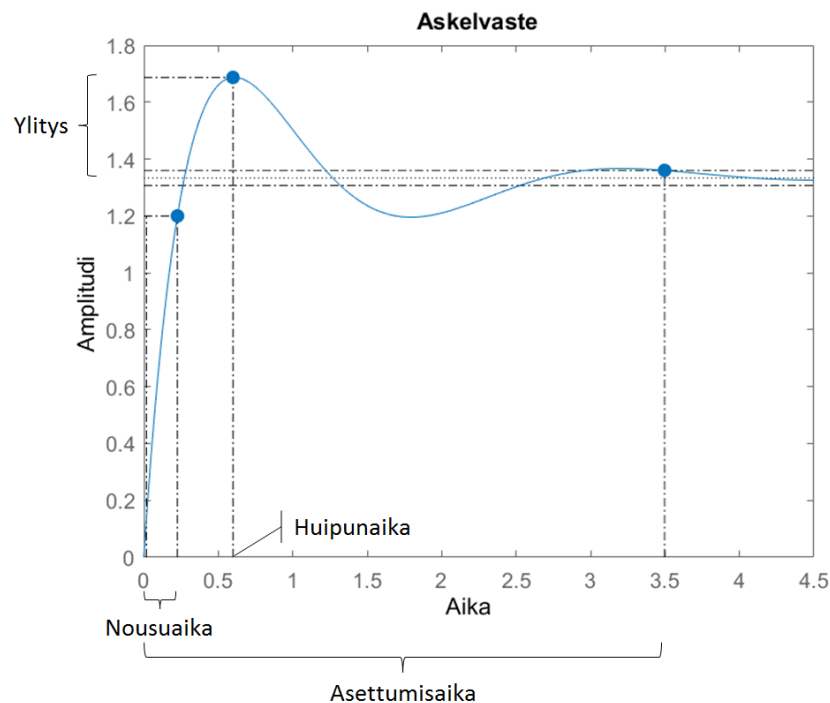
Rajoittamattoman lineaarisen systeemin voidaan sanoa olevan stabiili, jos sen vaste on rajoitettu kaikilla rajoitetuilla sisääntulon arvoilla. Muussa tapauksessa systeemi on epästabiili. Rajoittamattomalla lineaarisella systeemillä tarkoitetaan tässä tapauksessa sellaista ideaalista tilannetta, jossa systeemin sisään- ja ulostuloja ei rajoita mikään fyysikaalinen rajoite. Rajoitetulla sisääntulolla tarkoitetaan sitä, että sisääntulon arvot pysyvät rajoitetulla välillä. [21]

Todellisessa systeemissä on kuitenkin olemassa rajoitteita ja epälinearisuuksia, joista huolimatta suljetun systeemin tulee olla stabiili. Huomioitavia rajoitteita ovat muun muassa fyysikaaliset rajoitteet, kuten virtaus säätöventtiilin läpi. Käytännössä säätöventtiilin läpi voi siis kulkea vain rajoitettu virtaus. Toinen huomioitava asia on todellisen systeemin mahdolliset epälinearisuudet. Epälinearisuudet aiheuttavat sen, että vaikka systeemi olisi stabiili jossakin toimintapisteessä, se voi olla epästabiili jossakin toisessa toimintapisteessä. Suljetun systeemin stabiilius koko toiminta-alueella on koko prosessin turvallisuuden, tehokkuuden ja toimivuuden kannalta erittäin tärkeää. Epälinearisuuksista aiheutuu myös se, että suljetun systeemin dynamiikka muuttuu toimintapisteen mukaan. Tästä aiheutuu, että epälineaarisen systeemin säätö lineaarisella säätöratkaisulla

tuottaa toimintapisteestä riippuvan vasteen. Epälineaaristen systeemien säätöön onkin kehitetty monenlaisia säätöratkaisuja, joista osa perustuu lineaarisiin ja osa epälineaarisiin säätöratkaisuihin.

Häiriöiksi luokitellaan niin sisäiset kuin ulkoisetkin häiriöt. Sisäisiä häiriöitä ovat muun muassa mittauskohina ja muu signaaliin summautunut kohina. Ulkoisia häiriöitä ovat esimerkiksi ympäristön lämpötilan muutokset, materiaalin koostumuksen vaihtelut ja muiden säätöpiirien aiheuttamat värähtelyt. Osaa häiriöistä voidaan mitata ja täten pyrkiä kompensoimaan esimerkiksi myötäkytkennällä. Osaa häiriöistä ei sen sijaan ole mahdollista mitata tai mittausjärjestelmän toteutus niihin ei ole taloudellisesti kannattavaa. Tällaisten häiriöiden kompensoinnista tulee pyrkiä suoriutumaan mahdollisimman hyvin toteutettavan säätöratkaisun avulla.

Säätöpiirin suorituskykyä asetusarvon muutoksissa voidaan kuvata erilaisin tunnusluvuin. Käytetyimmät tunnusluvut perustuvat askelmaisen sisääntulon aiheuttaman ulostulon arviointiin. Tunnetuimmat askelvasteen tunnusluvut ovat nousuaika, huipunaika, asettumisaika sekä ylitys. Tunnusluvut esitetään kuvassa 8.



**Kuva 8.** Askelvasteen tunnusluvut.

Nousuajalla tarkoitetaan aikaa, joka säätöpiirin ulostulolla kuluu kasvaessaan 10–90% loppuarvostaan. Huipunajalla tarkoitetaan ajanhetkeä, jolloin säätöpiirin ulostulo saa suurimman arvonsa. Asettumisaika on aika, joka säätöpiirin ulostulolla kestää saavuttaa asetusarvo pysyvästi. Asetusarvon saavuttamiselle on asettumisaajan laskennassa annettu yleisesti rajat, joiden sisällä ulostulon tulee olla, jotta se voidaan luokitella saavuttaneen asetusarvon. Rajat ovat yleisesti luokkaa  $\pm 2\%$ . Ylityksellä tarkoitetaan prosentuaalista

asetusarvon ylitystä. [21] Ideaalisessa tilanteessa edellä mainitut tunnusluvut saavat mahdollisimman pieniä arvoja. Kuitenkin tässäkin tilanteessa kyse on usein vaihtokaupasta eri ominaisuuksien välillä. Esimerkiksi asettumisajan lyhentäminen saattaa kasvattaa ylitystä. Tavoitteet ovat tältäkin osalta siis prosessikohtaisia.

Pysyvällä tilalla tarkoitetaan tässä tapauksessa tilaa, jossa systeemiin ei vaikuta ulkoisia häiriöitä ja jossa prosessin ulostulo on ehtinyt asettua loppuarvoonsa. Pysyvän tilan virhe on havainnollistettu kuvassa 3. Pysyvän tilan virheen eliminointi on yleisimmin toteutettu lisäämällä takaisinkytkettyyn säätöpiiriin integroiva termi. Pysyvän tilan virheen eliminointi on säädettävän prosessin kannalta tärkeä ominaisuus.

Ohjauksien säilyttäminen maltillisina on käytettävien toimilaitteiden kannalta oleellinen vaatimus. Erityisesti ohjauksen muutosnopeuteen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Toimilaitteiden mekaanisten rakenteiden vuoksi niissä esiintyy muun muassa kulumista ja kitkaa. Kuluminen on osaltaan väistämätöntä, mutta kiinnittämällä huomiota ohjauksen käyttäytymiseen, voidaan kulumista ja täten kunnossapitotarvetta pyrkiä vähentämään. Nopeat ja jatkuvat ohjauksen muutokset muun muassa säätöventtiilissä saattavat kuluttaa venttiiliä huomattavan paljon. Teollisuuden jatkuvien prosessien säädössä ei aina ole mahdollista huoltaa kenttälaitteita kesken tuotannon, joten huonostikin toimivan kuluneen säätöventtiilin huolto saattaa venyä seuraavaan riittävän pitkään huoltokatkoon. Tämä taas johtaa väistämättä heikentyneeseen säätöpiirin suorituskykyyn.

Viimeinen tavoite säätöpiirin suorituskyvyllä on, ettei se saisi olla herkkä muutoksille. Muutoksilla tarkoitetaan esimerkiksi toimintapisteen muutosta, tiedostamattomia häiriöitä tai prosessiolosuhteen muutoksia. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että mittalaitteiden tulee kyetä toimimaan riittävän laajalla alueella, toimilaitteiden mahdollistaa riittävä vaikutus prosessiin ja säädin tulee olla suunniteltu niin, että suljettu systeemi täyttää sille asetetut vaatimukset muutoksista huolimatta.

Kuten edellä mainituista vaatimuksista huomataan, ovat ne suurilta osin kvalitatiivisia. Tämä johtuu siitä, että säätöpiirin suorituskyvyllä on mahdoton antaa yleispäteviä numeerisia tunnuslukuja, joiden mukaan säätöpiirien suorituskyky voitaisiin luokitella. Säätöpiirin tavoiteltu toiminta on siis hyvin tapauskohtaista. Kuten mainittu, todellisuudessa kaikkien edellä mainittujen tavoitteiden täyttäminen samanaikaisesti on mahdotonta. Tästä syystä on tapauskohtaista mitkä tavoitteista saavat suurimman painoarvon. Tuotannon kriittisimpien säätöpiirien toiminnan kannalta saattaa olla taloudellisesti kannattavaa painottaa asetuservon seurantaan liittyviä vaatimuksia ja sallia ohjaukselle suurempia vaihteluja. Tämä saattaa lisätä toimilaitteiden kunnossapidon tarvetta, mutta saavutettuihin tuotannon hyötyihin nähden toiminta on kannattavaa. Vähemmän kriittisiin säätöpiireihin taas voidaan sallia enemmän vaihtelua asetuservon seurantaan ja näin ollen vähentää toimilaitteiden kulutusta ja kunnossapidon tarvetta. Oleellista säätöpiirien suorituskyvyn kannalta onkin se, että se täyttää sille asetetut vaatimukset.

Kuten säätöpiirien komponenttien tarkastelussa havaittiin, ei kerran saavutettuja suorituskykytavoitteita voida pitää itsestään selvyytenä tulevaisuudessa. Tähän vaikuttavat niin muuttuvat olosuhteet, laitteiden kuluminen, tuotantotasojen kasvu ja niin edelleen. Tästä syystä säätöpiirien suorituskyvyn kannalta tärkeää onkin havaita suorituskyvyn heikkenemiset ja mahdolliset kohteet, joissa suorituskykyä voidaan parantaa ja joissa suorituskyvyn parantamisella saavutetaan merkittäviä taloudellisia hyötyjä.

## 2.3 Diskreetti signaalianalyysi

Tämän työn tavoitteena on kehittää työkalu säätöpiirien suorituskyvyn arviointiin, jotta tarvittavat kunnossapitotoimenpiteet osataan kohdistaa oikein ja nopeasti. Suorituskykytyökalun toiminnot perustuvat säätöpiirien toiminnasta kerättyyn dataan. Tässä kappaleessa käsitellään datan tallennus tietokantaan, signaalin tilastolliset ominaisuudet sekä signaalin suodatus työn suorittamisen vaatimassa laajuudessa.

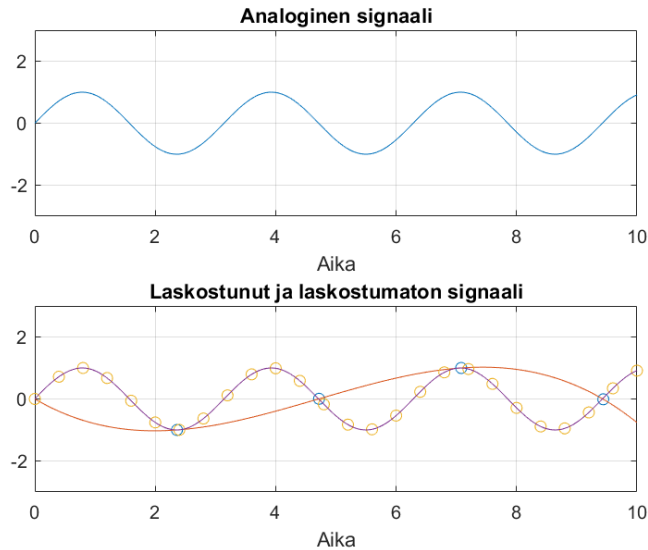
### 2.3.1 Datan tallennus

Tässä työssä signaalien analysointi perustuu tietokantaan tallennettuihin historiatietoihin. Jotta mittaussignaali voidaan tallentaa digitaaliseen tietokantaan, tulee se ensinnäkin muuttaa analogisesta digitaaliseen muotoon. Koska tietokannat sisältävät satoja, elleivät tuhansia mittaussignaaleja pitkältä aikaväliltä, vaativat ne hyvin paljon tallennuskapasiteettia. Kapasiteetin säästämiseksi data saattaa olla järkevä pakata ennen tallennusta. Käsitellään seuraavaksi analogia-digitaali-muunnoksen ja pakkaamisen vaikutukset signaalin ominaisuuksiin.

Analogia-digitaali-muunnos, lyhyesti A/D-muunnos, muuttaa nimensä mukaisesti analogisen signaalin digitaaliseksi signaaliksi. Muunnos voidaan yksinkertaistettuna ajatella tapahtuvan niin, että aikajatkuvan signaalin arvo tallennetaan tietyin väliajoin, jolloin syntyy diskreetti signaali. Tallennettujen arvojen väliin syntyy näytteistyksestä johtuen epäjatkuvuuskohtia. Epäjatkuvuuskohdan pituus riippuu siitä, kuinka usein analogiasignaalin arvo tallennetaan digitaalisignaaliin. Epäjatkuvuuskohdan pituus lyhenee näytteenottotaajuuden kasvaessa.

Näytteenottotaajuuden valinnalla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka korkeat taajuudet alkuperäisestä analogisignaalista säilyvät muunnettuun digitaalisignaaliin. Nyquistin näytteenottoteoreeman mukaan näytteenottotaajuuden tulee olla vähintään kaksi kertaa korkeampi kuin tarkasteltavan signaalin korkein taajuus, jotta alkuperäisen signaalin kaikki taajuuskomponentit säilyvät muuttumattomina. Todellisuudessa suositetaan tätäkin korkeampia näytteenottotaajuuksia, jotta digitaalisignaali vastaa mahdollisimman tarkasti analogisignaalia niin amplitudiltaan kuin taajuudeltaan. [15]

Liian alhainen näytteenottotaajuus aiheuttaa laskostumista. Laskostuminen ilmiönä on havainnollistettu kuvassa 9.



**Kuva 9.** Laskostuminen (mukaillen lähdettä [15])

Laskostumisen ansiosta tarkasteltavan analogisen signaalin korkeat taajuudet eivät säily A/D-muunnoksen johdosta muuttumattomina, vaan näyttäytyvät digitaalisignaaliassa todellista taajuutta matalampina taajuuksina. Kuvassa 9 näytteet alkuperäisestä signaalista on kuvattu erivärisin ympyröin. Keltaisilla ympyröillä merkityt näytteet on saatu korkeammalla näytteenottotaajuudella kuin sinisillä ympyröillä merkityt näytteet. Interpoloimalla eri näytteenottotaajuuksilla saavutetut datapisteet, huomataan, että vain korkeammalla näytteenottotaajuudella saavutetaan alkuperäistä signaalia vastaava signaali. Matalammalla näytteenottotaajuudella interpoloidun signaalin taajuus on tässä tapauksessa noin puolet alkuperäisen signaalin taajuudesta.

Toinen A/D-muunnoksen yhteydessä tapahtuva häviöllinen ilmiö on kvantisointi. Kvantisointi tarkoittaa yksinkertaistettuna sitä, että analogisignaaliasta näytteenottotaajuudella saadut arvot pyöristyvät, eivätkä näin säily alkuperäisinä. Pyöristymisen määrään voidaan vaikuttaa A/D-muuntimen resoluutiolla. Korkea resoluutio vähentää pyöristyksestä aiheutuvaa virhettä. Resoluutiolla tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä, kuinka monta bittiä A/D-muuntimella on käytössä analogisen sisääntulon ilmaisemiseksi digitaalisesti. [15]

Edellä mainituista syistä A/D-muunnettu signaali ei vastaa täysin alkuperäistä analogista signaalia. A/D-muunnoksen aiheuttaman vääristymän vaikutus tarkasteltavaan digitaalisignaaliin tulee digitaalisignaalia analysoidessa ottaa huomioon. Näytteenottotaajuuden ja A/D-muuntimen resoluution valinnalla voidaan kuitenkin vaikuttaa syntyneen digitaalisignaalin laatuun.

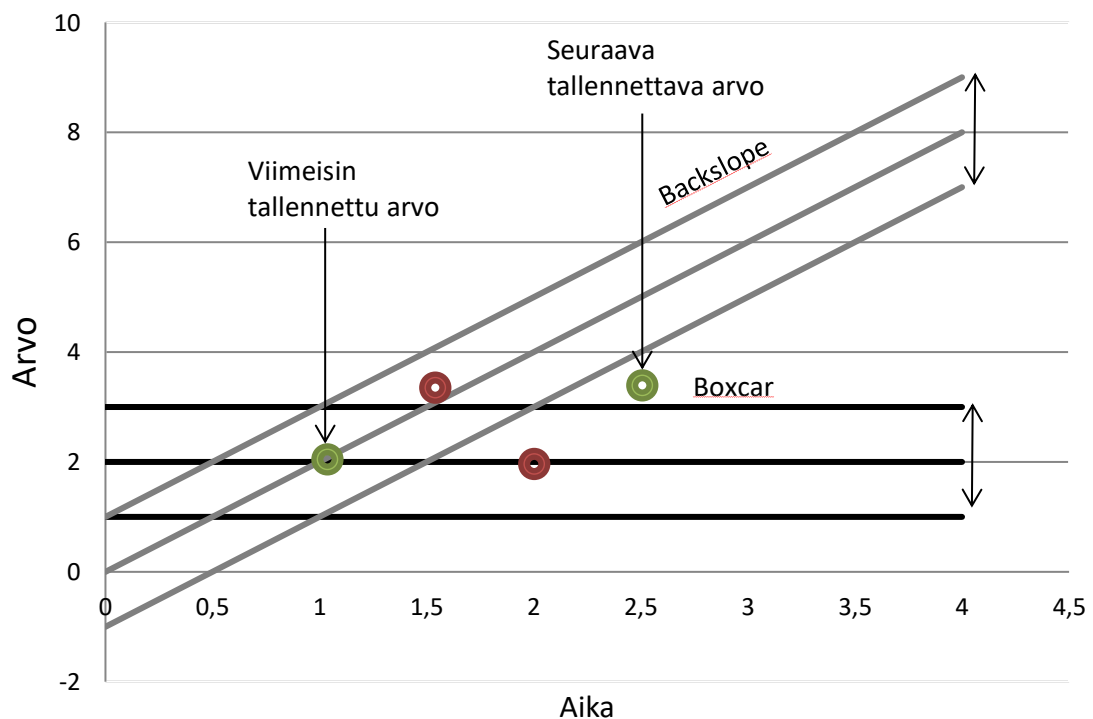
A/D-muunnettua signaalia ei kuitenkaan usein tallenneta sellaisenaan tietokantaan. Kapasiteetin säästämiseksi digitalisoitu signaali pakataan valitulla algoritmilla ennen tallennusta. Myös pakkaus on A/D-muunnoksen tavoin häviöllinen toimenpide, jossa osa sig-

naalin sisältämästä informaatiosta menetetään. Pakkaustapoja on kehitetty erilaisten signaalien, kuten äänen, kuvan ja mittaussignaalien pakkaamiseen. Tässä työssä käsitellään lyhyesti Valmet DNA:ssa käytössä olevan Aspen Infoplus.21 historiatietokannan käyttämät pakkaustavat. Pakkaustapoja on käytössä kolme: muokattu Boxcar-Backslope algoritmi, askeltava pakkaus sekä tekstipakkaus. [18]

Muokattu Boxcar-Backslope algoritmi päättää neljän eri kriteerin pohjalta tallennetaanko mittalaitteelta saapuva data tietokantaan vai ei. Ensimmäinen tarkistettava kriteeri on saapuvan datan laatu. Datan laadulle on Aspen Infoplus.21 historiatietokannassa määritetty 73 erilaista statusta. Statukset on jaettu kolmeen eri laatutasoon: hyvä, tarkastettava ja huono. Datan statuksen muuttuessa sen vanha sekä uusi arvo tallennetaan historiatietokantaan. Esimerkiksi mittalaitteen rikkoutuminen aiheuttaa statuksen muutoksen. Tarkempi listaus statuksien merkityksestä löytyy lähteestä [18].

Toinen saapuvalla datalle tehtävä testi on kuluneen ajan-testi. Tämä testi tehdään, jos saapuvan datan laatu-testi ei jo aiheuttanut datan tallennusta tietokantaan. Kuluneen ajan-testissä verrataan viimeisimmän tallennetun datapisteen ja uuden datapisteen ajan erotusta. Jos aikaväli kasvaa määritettyä aikaväliä pidemmäksi, tallennetaan tietokantaan viimeisimpää datapistettä edeltänyt datapiste. Tällöin historiatietokantaan tallennettujen datapisteiden aikaväli pysyy määritettyjen rajojen sisällä.

Kolmatta ja neljättä testiä havainnollistetaan kuvassa 10. Kolmas testi on nimeltään boxcar-testi ja neljäs nimeltään backslope-testi.



**Kuva 10.** Boxcar-Backslope (muokattu lähteestä [19])



Boxcar-testissä tarkistetaan, onko uuden datapisteen arvo tiettyjen käyttäjän asettamien rajojen sisällä verrattuna edelliseen tallennettuun arvoon. Backslope-testissä taas tarkistetaan, onko uuden datapisteen arvo tiettyjen käyttäjän asettamien rajojen sisällä verrattuna uuden datapisteen odotettuun arvoon. Datapisteen odotettu arvo lasketaan ekstrapoloimalla edellisten tallennettujen datapisteiden välille muodostettu suora. Jos tarkasteltavan datapisteen arvo ei kuulu kummankaan testin joukkoon, se tallennetaan historiatietokantaan.

Käytettäessä askeltavaa pakkausta, historiatietokantaan tallennetaan uusi datapiste, jos datapisteen arvo on määritetyn maksimipoikkeaman ulkopuolella tai tallennukselle määritetty maksimiaikaväli ylittyy. Poikkeamaa ja aikaväliä tarkastellaan jälleen suhteessa edelliseen tallennettuun datapisteeseen. Askeltavassa pakkauksessa historiatietokantaan tallennetut datapisteet yhdistetään suoran sijasta askelmaisesti.

Tekstipakkaus on käytössä tekstin tallennukseen. Tekstiä ei tallenneta tietokantaan, jos se pysyy muuttumattomana. Tekstipakkauksessa on kuitenkin käytössä samankaltainen aikavälin tarkastelu kuin aikaisemmissakin pakkausmenetelmissä. Eli muuttumattomanakin pysyvä teksti tallennetaan uudelleen tietokantaan, jos tallennusten aikaväli on kasvamassa määritettyä raja-arvoa suuremmaksi. [18]

Historiatietokantaan tallennettu data on tämän työn puitteissa se data, jonka perusteella säätöpiirien suorituskyky pyritään selvittämään. Analogisignaaleille suoritettu diskretointi ja pakkaus hävittävät esitetyllä tavalla osan signaalin sisältämästä informaatiosta. Koska kyseiset toimenpiteet ovat datan tehokkaan tallentamisen mahdollistamiseksi välttämättömiä, tulee selvittää, voidaanko historiatietokantaan tallennettua dataa käyttää tehokkaasti ja luotettavasti säätöpiirien suorituskyvyn arviointiin.

### 2.3.2 Tilastolliset ominaisuudet

Mittaussignaalit voidaan jaotella deterministisiin ja stokastisiin. Deterministinen signaali syntyy sellaisesta järjestelmästä, johon ei vaikuta satunnaistekijöitä. Jos taas järjestelmä sisältää satunnaiskomponentteja, signaali on stokastinen. Kuten aikaisemmin on todettu, mittaussignaaleja tarkasteltaessa signaali on lähes poikkeuksetta stokastinen. Prosessiin vaikuttavia satunnaiskomponentteja sisältäviä tekijöitä ovat muun muassa häiriöt ja mitauskohina. Edellä mainituista syistä tässä työssä keskitytään nimenomaan stokastisten signaalien analysointiin.

Mittaussignaalien analysointi voidaan toteuttaa ainakin kolmessa tasossa: amplitudi-, aika-, ja taajuustasossa. Eri tasoissa suoritettavat tarkastelut paljastavat eri piirteitä tarkasteltavasta signaalista. Tästä syystä säätöpiirien suorituskykyanalyysin kannalta on tärkeä tarkastella signaaleja monipuolisesti. Säätöpiirin suorituskyvyn arvioinnin kannalta mielenkiintoisia mittaussignaalin tilastollisia suureita ovat muun muassa keskiarvo, keskihajonta, varianssi sekä auto- ja ristikorrelaatio.

Stokastisen signaalin odotusarvon  $E[x]$  estimaatti rajatulla aikavälillä lasketaan yhtälöllä

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k), \quad (6)$$

jossa  $N$  on näytearvojen määrä ja  $x(k)$  on signaalin  $x$  arvo ajanhetkellä  $k$ . Diskreeteille signaaleille pätee

$$k = nT, \quad n \in \mathbb{N}, \quad (7)$$

jossa  $T$  on näytteenottovälin pituus. Keskiarvon estimaatti antaa kuvan signaalin tasosta tarkastellulla aikavälillä. Keskiarvon estimaatin tulisi täten vastata mahdollisimman tarkasti säädettävälle suurelle asetettua vakio-asetusarvoa. Varianssin  $E[(x - \mu_x)^2]$  estimaatti saadaan laskettua yhtälöllä

$$\delta_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x(k) - \mu_x)^2. \quad (8)$$

Varianssin estimaatin avulla saadaan käsitys siitä, kuinka paljon mittaussignaalin arvot keskimäärin vaihtelevat keskiarvosta. Varianssin ollessa pieni, mittaussignaalin arvot keskittyvät lähelle keskiarvoa. Mittaussignaalin arvojen jakoutuessa tasaisemmin laajemmalle välille varianssi kasvaa. Mittaussignaalin keskihajonnan  $E[x - \mu_x]$  estimaatti saadaan yhtälöllä

$$\delta_x = \sqrt{\delta_x^2}. \quad (9)$$

Keskihajonta kuvaa varianssin tavoin sitä, kuinka paljon signaalin arvot keskimäärin poikkeavat keskiarvosta. Keskihajonnan etuna varianssiin nähden on sen helpompi tulkinta. Keskihajonnan yksikkö on sama kuin tarkasteltavalla signaalilla, kun taas varianssin yksikkö on tarkasteltavan signaalin yksikön neliö.

Työssä suunniteltavan säätöpiirien suorituskykytyökalun tarkoitus on helpottaa heikosti toimivien säätöpiirien havaitsemista. Keskihajonta ja varianssi eivät ole suoraan käyttökelpoisia suureita eri säätöpiirien suorituskyvyn vertailuun. Varianssi voi olla kahdessa mittaussignaalin sama, mutta jos toisen mittaussignaalin keskiarvon estimaatti on esimerkiksi 2 ja toisen 100, on varianssin merkittävyys suhteessa paljon suurempi ensimmäisessä säätöpiirissä. Tästä syystä vertailussa käytetään variaatiokerrointa, joka lasketaan yhtälöllä

$$\vartheta = \frac{\delta_x}{\mu_x}. \quad (10)$$

Variaatiokerroin on siis keskihajonnan ja keskiarvon suhde. Koska kyseisten suureiden yksiköt ovat samat, variaatiokerroimesta tulee yksikötön. Kyseinen ominaisuus helpottaa eri säätöpiirien vertailua keskenään.

Signaaleja voidaan aika- ja amplituditasossa verrata toisiinsa muun muassa kovarianssin avulla. Kahden signaalin välinen kovarianssi lasketaan yhtälöllä

$$C_{xy} = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)]. \quad (11)$$

Kovarianssi on siis signaalien poikkeamien tulon odotusarvo. Kovarianssi voidaan normeerata välillä  $[-1,1]$  jakamalla saatu kovarianssi signaalien keskihajontojen tulolla

$$\rho_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (12)$$

Normeerattua kovarianssia kutsutaan korrelaatiokertoimeksi. Signaalien välinen yhteneväisyys kasvaa korrelaatiokertoimen itseisarvon lähestyessä arvoa 1. Korrelaatio voi etumerkistä riippuen olla joko positiivista tai negatiivista. Korrelaatiota ja korrelaatiokerrointa tarkastellessa tulee huomioida, että korreloimattomuus ei välttämättä tarkoita sitä, että signaalit olisivat toisistaan riippumattomia. [22]

## 2.4 Signaalin suodatus

Signaalin suodatuksella pyritään erottamaan signaalista käyttötarkoituksen kannalta oleelliset ominaisuudet. Esimerkiksi mittaussignaalia tarkasteltaessa saattaa olla tarpeellista vaimentaa mittauksesta aiheutunutta korkeataajuisia mittauskohinaa. Suotimet voidaan signaaleiden tavoin jakaa analogisiin sekä diskreetteihin. Koska tässä työssä käsitellään diskreettejä signaaleja, keskitytään myös suotimien diskreettiin toteutukseen ja suunnitteluun. Suotimella voidaan tarkoittaa myös muuhun kuin signaalin taajuussisältöön vaikuttavia signaalin muokkaimia. Tässä kappaleessa suotimella tarkoitetaan kuitenkin juuri sellaisia diskreeteille signaaleille suoritettavia laskutoimituksia, jotka muokkaavat niiden taajuussisältöä.

Diskreetit eli digitaaliset suotimet voidaan edelleen jakaa niiden ominaisuuksien pohjalta lineaarisiin sekä epälineaarisiin suotimiin. Epälineaarisen suotimen sisääntulon ja ulostulon suhde ei käyttäydy lineaarisesti. Esimerkki epälineaarista suotimesta on liukuvan mediaanin suodin. Liukuvan mediaanin suotimen ulostulo on sisääntulona saadun diskreetin signaalin mediaani valitun aikaikkunan sisällä. Epälineaarisia digitaalisuotimia käsitellään esimerkiksi lähteessä [23].

Lineaariset digitaalisuotimet voidaan jakaa niiden impulssivasteen perusteella kahteen tyyppiin: äärellisen impulssivasteen FIR (finite impulse response) -suotimiin sekä äärettömän impulssivasteen IIR (infinite impulse response) -suotimiin. Valinta näiden kahden välillä riippuu käyttötarkoituksesta sekä suotimen tavoitellusta taajuusvasteesta. Käytännössä FIR-suodin mahdollistaa lineaarisen vaihesiirron päästökaistalla, kun taas IIR-suotimen vaihesiirto on myös päästökaistalla epälineaarinen. Jos käyttökohteessa ei vaadita

lineaarista vaihesiirtoa päästökaistalle, on perusteltua valita IIR-suodin. IIR-suotimen estokaistan vahvistus on tasaisempi kuin vastaavan asteluvun omaavalla FIR-suotimella. Täten IIR-suotimen toteutus onnistuu pienemmällä määrällä parametreja ja muistia. [24]

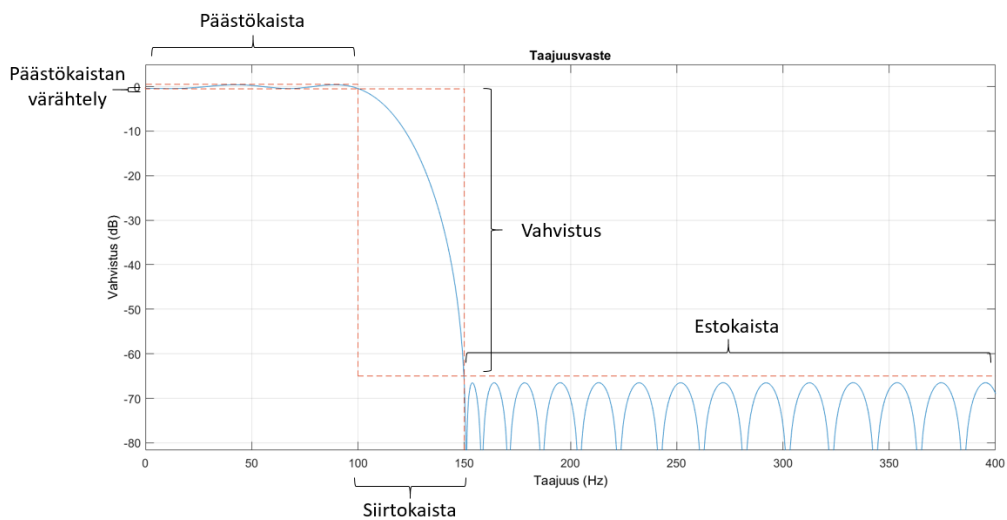
Lineaaristen digitaalisuotimien differenssiyhtälö on muotoa

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N_s} b_i v(n-i) - \sum_{i=1}^{N_s} a_i y(n-i), \quad (13)$$

jossa  $N_s$  on suotimen asteluku,  $a_i$  ja  $b_i$  ovat suotimen kertoimet,  $v$  on suotimen sisääntulo ja  $y$  on suotimen ulostulo. FIR-suotimessa kerroin  $a_i = 0$ . Differenssiyhtälö voidaan esittää myös siirtofunktiomuodossa

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^{N_s} b_i z^{-i}}{\sum_{i=1}^{N_s} a_i z^{-i}}. \quad (14)$$

Suotimen differenssiyhtälön kertoimien  $a_i$  ja  $b_i$  valinnalla pyritään muodostamaan suotimen vaste halutun kaltaiseksi. Suodin voidaan suunnitella joko alipäästö, kaistanpäästö, kaistanesto tai ylipäästösuotimeksi. Alipäästösuodin läpäisee suunniteltua raja-taajuutta alemmat taajuudet ja suodattaa korkeammat taajuudet pois. Kaistanpäästösuodin sen sijaan läpäisee kahden rajataajuuden väliin jäävät taajuudet ja suodattaa muut taajuudet. Kaistanestosuodin taas suodattaa taajuudet suunniteltujen rajataajuuksien väliltä. Ylipäästösuodin läpäisee suunniteltua rajataajuutta korkeammat taajuudet. Alipäästösuotimen taajuusvaste sekä suunnittelussa tarvittavat parametrit on esitetty kuvassa 11.



**Kuva 11.** Alipäästösuotimen taajuusvaste. (muokattu lähteestä [24])

Ideaalisen suotimen vahvistus päästökaistalla on 0dB ja estokaistalla  $-\infty$ dB. Lisäksi ideaalisen suotimen siirtokaistan leveys on 0. Ideaalinen suodin ei kuitenkaan ole kausaalinen, joten sellaista ei voida käytännössä toteuttaa. Toteutettavan suotimen suunnittelussa tuleekin ottaa tarkasti huomioon siltä vaaditut ominaisuudet. Käyttötarkoitukseensa liian

kompleksinen suodin kuormittaa tarpeettomasti muistia ja sen suunnittelu vie aikaa. Salimalla päästö- ja estokaistoille vahvistukseen pientä värähtelyä sekä siirtokaistalle tarvittava leveys, suodin on mahdollista suunnitella myös käytännössä. [24]

## 2.5 Oskilloinnin tunnistus

Oskilloinnilla tarkoitetaan jaksollista värähtelyä. Oskillointi kasvattaa säädettävän suureen keskihajontaa, joka saattaa johtaa huonompilaatuihin lopputuotteeseen, suurempiin hylkäysmääriin, kasvaneeseen energiankulutukseen sekä alentuneeseen tuotannon tehokkuuteen [7]. Tästä syystä tuotannon tehokkaan toiminnan ja taloudellisuuden kannalta on tärkeää tunnistaa oskilloivat säätöpiirit. Normaalitilanteessa oskilloinnin tunnistamisella voidaan selvittää kohteet, joissa kunnossapitotoimenpiteillä voidaan parantaa yksittäisen säätöpiirin ja täten kokonaisprosessin suorituskykyä. Tilanteessa, jossa kokonaisprosessin suorituskyky on jo heikentynyt, voidaan oskilloinnin tunnistamisella pyrkiä rajaamaan mahdolliset ongelman aiheuttajat.

Lähteessä [7] on määritetty, että teollisuuden toteutettavan oskilloinnin tunnistusmenetelmän tulisi täyttää seuraavat ehdot:

- Pelkästään mittaussignaalin käyttö ilman tai vähäisellä prosessituntemuksella
- Robusti korkeataajuiselle mittauskohinalle ja häiriöille
- Kyky havaita useita ja ajoittaisia oskilloivia taajuuksia
- Kyky toimia automaattisesti

Tässä kappaleessa on tarkoitus perehtyä tarkemmin kirjallisuudessa esitettyihin metodeihin ja esitellä toteutettavaan suorituskykyökaluun valittu metodi yksityiskohtaisesti. Kirjallisuudessa esitettyjä muita oskilloinnin tunnistamiseen käytettyjä metodeja esitellään siitä syystä, että ne ovat käyttökohteesta riippuen vartenotettavia vaihtoehtoja. Tarkastelu luo siis perustan menetelmän valinnalle myös muihin käyttökohteisiin.

### 2.5.1 Kirjallisuus

Oskilloinnin tunnistamiseen käytettyjä menetelmiä on kehitetty melko paljon viimeisten 20 vuoden aikana. Kehitetyt menetelmät perustuvat merkittävässä määrin taajuustasossa suoritettavaan mittaussignaalin tarkasteluun, mutta myös aikatazon menetelmiä on kehitetty.

Ensimmäisiä oskilloinnin tunnistamiseen kehitettyjä menetelmiä on Hägglundin artikkelissa [4] vuonna 1995 esittelemä IAE-lukuun perustuva menetelmä. Mittaussignaalin IAE-luku lasketaan yhtälöllä

$$IAE = \int_{t_{i-1}}^{t_i} |e(t)| dt, \quad (15)$$

jossa  $t_{i-1}$  ja  $t_i$  ovat nollakeskiarvoisen mittaussignaalin peräkkäisten nollakohdan ylitysten ajankohdat. Säättöpiirin toimiessa hyvin, nollakohdan ylitysten aikaväli on lyhyt ja erosuureen itseisarvo on pieni. Täten säättöpiirin toimiessa hyvin myös IAE-luku pysyy pienenä. IAE-luvun ylittäessä määritetty raja-arvo, voidaan sanoa, että säättöpiiriin kohdistuu häiriö. Raja-arvo  $IAE_{lim}$  voidaan laskea esimerkiksi yhtälöllä

$$IAE_{lim} = \frac{2a}{\omega_u}, \quad (16)$$

jossa  $a$  on oskilloinnin amplitudille asetettu raja ja  $\omega_u$  on systeemin rajataajuus. Raja-arvon  $IAE_{lim}$  valinta on kompromissi sen suhteen, kuinka usein häiriöt havaitaan ja kuinka usein raja ylittyy, vaikka häiriötä ei olisikaan. Useimmiten systeemin rajataajuutta ei tunneta, jolloin vaihtoehtoinen tapa laskea raja-arvo on käyttää yhtälöä

$$IAE_{lim} = \frac{2a}{\omega_i}, \quad (17)$$

jossa

$$\omega_i = \frac{2\pi}{\tau_i}, \quad (18)$$

jossa  $\tau_i$  on yhtälössä (2) esitelty PID-säätimen integrointiaika.

Oskilloinnin tunnistaminen toteutetaan tarkastelemalla raja-arvon  $IAE_{lim}$  ylitysten taajuutta. Jos tarkasteltavassa aikavälissä  $T_{sup}$  oskilloinnin raja-arvo  $IAE_{lim}$  ylittyy määritettyä raja-arvoa useammin, luokitellaan signaali oskilloivaksi. Tarkastelun aikaväli  $T_{sup}$  voidaan määrittää yhtälöllä

$$T_{sup} = 50\tau_i. \quad (19)$$

Raja-arvon ylitysten määräksi Hägglund ehdottaa arvoa  $n_{lim} = 10$ .

Esitelty menetelmä sisältää useita käyttäjän määrittämiä raja-arvoja. Systeemin rajataajuus ei useimmiten ole tiedossa, joten menetelmää käyttäessä joudutaan turvautumaan säätimen integrointiajan käyttöön. Jos säädin on huonosti viritetty, ei integrointiaikaa käyttämällä saada aikaan järkevää raja-arvoa. Koska oskillointi saattaa johtua juuri säätimen sopimattomasta virityksestä, ei viritysparametrien käyttö raja-arvoja määritettäessä ole välttämättä hyvä ratkaisu. Menetelmä myös olettaa oskilloinnin tapahtuvan systeemin rajataajuudella. Tämä ei kuitenkaan välttämättä pidä paikkansa, vaan esimerkiksi venttiilin epälineaarisuuksista johtuva oskillointi voi tapahtua myös muilla taajuuksilla. [4] IAE-lukuun perustuvaa menetelmää käsitellään myös lähteessä [7].

Useat oskilloinnin tunnistusmenetelmät käyttävät hyväkseen signaalin autokorrelaatiota. Yksi autokorrelaatiofunktioon perustuvista menetelmistä on Thornhill et al. vuonna 2003 artikkelissa [6] esittelemä menetelmä. Menetelmän tavoitteena on pyrkiä havaitsemaan

signaalista usealla taajuudella tapahtuva oskillointi, oskilloinnin jaksonaika sekä voimakkuus kullakin oskillointitaajuudella. Jos oskillointi ei rajoitu yksittäiseen säätöpiiriin vaan näyttäytyy myös muissa säätöpiireissä, voidaan jaksonajan tarkastelulla yhdistää säätöpiirejä toisiinsa ja täten löytää oskilloinnin alkuperä helpommin. Oskilloinnin voimakkuuden tarkastelu antaa mahdollisuuden keskittyä vain voimakkaiden oskillointien eliminointiin, jättäen vaikeat oskilloinnit vähemmälle huomiolle.

Oskilloinnin tunnistaminen autokorrelaatiofunktioista perustuu siihen, että signaalin autokorrelaatiofunktio oskilloi samalla taajuudella kuin alkuperäinen signaali. Täten autokorrelaatiofunktion nollakohdan ylityksistä voidaan laskea oskilloinnin keskimääräinen jaksonaika. Jos kuitenkin signaali sisältää oskilloivia komponentteja useilla taajuuksilla, eivät autokorrelaatiofunktion nollakohdan ylitykset ole säännöllisiä. Tästä syystä tarkasteltava signaali tulee suodattaa ennen autokorrelaatiota. Lähteessä [6] suodattimien rajataajuudet eri signaaleille on määritetty tarkastelemalla signaalin taajuusspektriä manuaalisesti.

Suodatetun signaalin autokorrelaatiosta lasketaan nollakohdan ylitysten ajat, joiden avulla saadaan oskilloinnin jaksonajan estimaatti sekä jaksonajan keskihajonta. Jos jaksonajan keskihajonta on pienempi kuin kolmasosa jaksonajan estimaatista, luokitellaan signaali oskilloivaksi lasketulla jaksonajalla. Oskilloinnin voimakkuus lasketaan normalisoidusta tehosppektristä.

Jos oskilloinnin tunnistus halutaan toteuttaa suurelle määrälle mittaussignaaleja, ei manuaalinen taajuusspektrin tarkastelu ole tehokas vaihtoehto suodattimien parametrien valinnassa. Lisäksi mittaussignaalin sisältämän kohinan vuoksi tehosppektristä laskettu oskilloinnin voimakkuus sisältää myös kohinan voimakkuuden, jos kohinaa esiintyy kyseisellä taajuudella. Esitelty menetelmä vastaa siis haasteisiin useiden oskillointitaajuuksien löytämisessä sekä oskilloinnin jaksonajan ja voimakkuuden määrittämisessä, mutta mittaussignaali-kohtaisten suodatusparametrien manuaalinen määrittäminen hankaloittaa menetelmän automatisointia suurelle määrälle säätöpiirejä.

Edellä kappaleessa 2.4.2 esiteltävän oskilloinnin tunnistusmenetelmän [10] kanssa 2010-luvulla kilpailevaksi ratkaisuksi on tullut artikkelissa [11] esitetty diskreettiin kosinimuunnokseen (DCT) perustuva menetelmä. Ennen vuosikymmenen vaihdetta Huang, Jelali ja Horch [7] esittivät automatisoidun oskilloinnin tunnistamisen sadoista säätöpiireistä tulevaisuuden tutkimushaasteeksi. Diskreettiin kosinimuunnokseen perustuvan menetelmän yksi päätavoitteista on ollut vastata tähän haasteeseen.

Artikkelissa [11] esitetyn diskreettiin kosinimuunnokseen perustuvan menetelmän perusidea on erottaa signaalin eri taajuuskomponentit DCT:n avulla ja tarkastella erotettujen taajuuskomponenttien nollakohdan ylitysten säännöllisyyttä. Diskreetti kosinimuunnos on diskreettiin Fourier-muunnokseen (DFT) ja Karhunen-Loève-muunnokseen (KLT)

verrattavissa oleva signaalin muunnos, jonka avulla diskreetti signaali voidaan esittää eri-taajuuksien kosinifunktioiden summana. Suorituskyvyltään DCT vastaa enemmän Karhunen-Loève-muunnosta kuin diskreettiä Fourier-muunnosta, koska DFT jakaa signaalin kompleksisiin osiin, sisältäen informaation sekä vahvistuksesta että vaiheesta. Diskreetti kosinimuunnos tuottaa reaalilukuisen vasteen, hävittäen signaalin vaiheinformaation.

DCT-menetelmässä signaalin taajuuskomponentit erotetaan nimensä mukaisesti diskreetillä kosinimuunnoksella. Diskreetti kosinimuunnos signaalille  $x(nh)$  näytteenottovälillä  $h$  ilmaistaan yhtälöllä

$$y(k) = w(k) \sum_{n=1}^N x(nh) \cos \frac{\pi(2n-1)(k-1)}{2N}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (20)$$

jossa  $N$  on näytteiden määrä ja

$$w(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & k = 1 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & 2 \leq k \leq N \end{cases} \quad (21)$$

Signaalin jako eri taajuuskomponentteihin on toteutettu DCT-menetelmässä tarkastelemalla kosinimuunnetun signaalin keskihajontaa. Yleisesti voidaan sanoa, että signaali oskilloi, jos sen teho on joillain taajuuksilla merkittävästi muita taajuuksia suurempi. Koska mittaussignaali sisältää usein laajalle taajuusalueelle jakautunutta kohinaa, luokitellaan menetelmässä oskilloiviksi taajuuksiksi ne, joiden kosinimuunnoksen itseisarvo on vähintään kolme kertaa suurempi kuin sen keskihajonta. Ne arvot, joiden itseisarvo on tätä rajaa pienemmät, korvataan arvolla 0. Signaalin suodatus, eli oskilloivien taajuuskomponenttien erotus, voidaan nyt tehdä erottelemalla syntyneestä signaalista positiiviset arvot omiksi segmenteikseen. Erilliset segmentit palautetaan aikatasoon diskreetin kosinimuunnoksen käänteismuunnoksella

$$x(nh) = \sum_{k=1}^N w(k)y(k) \cos \frac{\pi(2n-1)(k-1)}{2N}, \quad n = 1, \dots, N. \quad (22)$$

Jokainen käänteismuunnettu segmentti sisältää nyt oskilloivaksi luokitellun taajuuden alkuperäisestä signaalista. Käänteismuunnettujen segmenttien nollakohdan ylityksiä tarkastelemalla voidaan laskea oskilloinnin jaksonajan keskiarvo ja keskihajonta. Jos jaksonajan keskihajonta on pienempi kuin kolmasosa jaksonajan keskiarvosta, luokitellaan signaali oskilloivaksi lasketulla jaksonajalla.

## 2.5.2 Empirical Mode Decomposition

Artikkelissa [10] esitetty oskilloinnin tunnistusmenetelmä perustuu EMD- (Empirical Mode Decomposition) algoritmiin. Algoritmin avulla mittaussignaalista erotetuille IMF:lle (Intrinsic Mode Function) suoritetaan autokorrelaatio, jonka ominaisuuksista voidaan päätellä muun muassa alkuperäisen signaalin oskilloinnin taajuudet. Oskilloinnin



tunnistusmenetelmä on jaettu neljään osaan, jotka käydään seuraavaksi yksityiskohtaisesti läpi.

Ensimmäisessä osassa tarkasteltavasta signaalista etsitään niin sanotut IMF:t EMD-algoritmin avulla. Jotta funktio täyttää IMF:n määritelmän, tulee sen täyttää seuraavat kaksi ehtoa. Ensinnäkin funktion ääriarvojen ja nollakohdan ylitysten määrä tulee olla sama tai poiketa korkeintaan yhdellä. Toiseksi jokaisella ajanhetkellä tulee päteä ehto, että ääriarvojen kautta kuutiollisella interpoloinnilla yhdistettyjen ”kuorien” keskiarvo on nolla. Kuutiollinen interpolointi suoritetaan siis sekä minimiarvoille että maksimiarvoille, jolloin syntyy ns. kuori varsinaisen signaalin ympärille. Näiden kuorien keskiarvon tulee jokaisella ajanhetkellä olla nolla, jotta funktio täyttää IMF:n määritelmän.

EMD-algoritmin käyttö etenee askel askeleelta seuraavasti:

1. Etsi tarkasteltavan signaalin  $x(t)$  ääriarvot.
2. Luo kuori ääriarvojen välille käyttäen kuutiollista interpolointia.
3. Laske kuorien keskiarvo yhtälöllä  $m(t) = (e_{min}(t) + e_{max}(t))/2$ .
4. Laske signaali  $h(t) = x(t) - m(t)$ . Jos signaali  $h(t)$  täyttää IMF:n määritelmän, jatka vaiheeseen 5. Muussa tapauksessa tee sijoitus  $x(t) = h(t)$  ja iteroi algoritmi aloittaen kohdasta 1.
5. Tallenna signaali  $h(t)$  matriisiin  $d_i(t)$ .
6. Laske residuaali eli jäännösarvo yhtälöllä  $r(t) = x(t) - d_i(t)$ .
7. Jos  $r(t)$  sisältää vähintään kaksi ääriarvoa (yksi minimi ja yksi maksimi), tee sijoitus  $x(t) = r(t)$  ja iteroi algoritmi aloittaen kohdasta 1. Muussa tapauksessa tallenna residuaali trendimatriisiin  $m_L(t)$  ja lopeta algoritmi.

Kun EMD-algoritmi on suoritettu, voidaan alkuperäinen signaali  $x(t)$  esittää muodossa

$$x(t) = m_L(t) + \sum_{i=1}^L d_i(t), \quad (23)$$

jossa  $d_i(t)$  on  $i$ :s tallennettu IMF ja  $m_L(t)$  on jäännöstrendi. Jäännöstrendi voidaan tässä tapauksessa jättää huomioimatta, koska se kuvaa alkuperäisestä signaalista pelkästään monotonisen- tai vakiotrendin.

Toisessa osassa EMD-algoritmeilla löydetyistä IMF:stä pyritään erottamaan oleellimmat. Mittaussignaalin mahdollisesta trendistä ja kohinaisuudesta johtuen EMD-algoritmeilla löydetään usein suurempi määrä IMF:ta kuin todellisuudessa oskilloivia komponentteja on. Tästä syystä olennaisten IMF:den erottaminen kaikista löydetyistä on tärkeää. On osoitettu, että IMF:t ovat miltei ortogonaalisia kuvauksia alkuperäisestä signaalista. Täten oleellisimpien IMF:den tulisi korreloida vahvasti alkuperäisen signaalin kanssa. [25] Jokaiselle löydetylle IMF:lle lasketaan korrelaatiokerroin yhtälöllä

$$\mu_i = \frac{C(\text{signal}, \text{IMF}_i)}{\sqrt{\text{var}(\text{signal})\text{var}(\text{IMF}_i)}}, \quad (24)$$

jossa  $C(signal, IMF_i)$  on alkuperäisen signaalin ja tarkasteltavan IMF:n välinen kovarianssi. Lasketut korrelaatiokertoimet normeerataan yhtälöllä

$$\lambda_i = \frac{\mu_i}{\max(\mu_i)}. \quad (25)$$

Normeeratun korrelaatiokertoimen avulla voidaan erottaa merkittävät IMF:t. Normeeratun korrelaatiokertoimen saadessa arvon yli 0.5, luokitellaan sitä vastaava IMF merkittäväksi. Arvon 0.5 valinta tarkoittaa käytännössä sitä, että IMF:t joiden korrelaatiokerroin on korkeintaan kaksi kertaa pienempi kuin suurimman korrelaatiokertoimen saaneella IMF:llä luokitellaan merkittäväksi. Pienemmän arvon saaneet IMF:t luokitellaan merkityksättömiksi, eli niiden käsittelyä ei enää jatketa.

Korrelaatiotestissä merkityksellisiksi osoittautuneille IMF:lle suoritetaan niin sanottu ”harvuus”-testi. Testi perustuu IMF:den Fourier-muunnokseen. Yksinkertaistettuna Fourier-muunnos muuttaa tarkasteltavan signaalin sinifunktioihin, joilla on eri taajuus ja amplitudi. Fourier-muunnoksen tarkempi selvitys on esitetty muun muassa lähteessä [17]. Testin avulla selvitetään jäljellä olevista IMF:stä ne, joiden taajuusspektri on jakautunut niin, että joillain taajuuksilla signaalin amplitudi on selvästi muita taajuuksia korkeampi. Tällä pyritään poistamaan jäljellä olevista IMF:stä ne, jotka korreloivat alkuperäisen signaalin kanssa johtuen laajalle taajuusalueelle jakautuneesta kohinasta. Vektorin, eli tässä tapauksessa yksittäisen IMF:n Fourier-muunnoksen, voidaan sanoa olevan ”harva” jos suurin osa sen komponenteista ovat nollia ja vain pieni osa saa nollasta poikkeavia arvoja. Erillisten IMF:n harvuusindeksi lasketaan yhtälöllä

$$\text{Harvuusindeksi}(x) = \frac{\sqrt{N_f} - (\sum_{j=1}^{N_f} |x_j|) / \sqrt{\sum_{j=1}^{N_f} |x_j|^2}}{\sqrt{N_f} - 1}, \quad (26)$$

jossa  $N_f$  on IMF:n Fourier-muunnoksen komponenttien lukumäärä ja  $x_j$  on  $j$ :nnen komponentin arvo. Lähteessä [10] on tutkittu harvuusindeksin arvoja erilaisille signaaleille. Tutkimuksen lopputuloksena on päädytty käyttämään harvuusindeksin arvoa 0.5 erottamaan merkittävät IMF:t. IMF:t joiden harvuusindeksin arvo on suurempi kuin 0.5 luokitellaan merkittäviksi ja muiden jatkokäsittely keskeytetään.

Kolmannessa osassa toisesta osasta jäljelle jääneistä IMF:stä lasketaan autokorrelaatiofunktio eli ACF. Autokorrelaatiofunktio kertoo miten hyvin signaali korreloi itsensä kanssa eri viiveillä. Autokorrelaatiofunktio saa arvoja väliltä  $[-1, 1]$ . Etumerkistä riippuen korrelaatio on joko negatiivista tai positiivista. Autokorrelaatiofunktio saa aina arvon 1 viiveen ollessa 0, koska jokainen signaali korreloi itsensä kanssa täysin ilman viivettä. Autokorrelaatiofunktion etuna on se, että jos tarkasteltava signaali on oskilloiva, oskilloi siitä muodostettu autokorrelaatiofunktio samalla taajuudella. Lisäksi autokorrelaatiofunktio valkoiselle kohinalle on teoriassa nolla viiveen ollessa erisuuri kuin nolla. IMF:n autokorrelaatiofunktio voidaan laskea yhtälöllä

$$ACF_i(l) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IMF_i(t) IMF_i(t+l), \quad (27)$$

jossa  $l$  on viive [22]. Autokorrelaatiofunktioista selvitetään niiden nollakohdan ylitykset, joiden avulla voidaan laskea oskilloinnin keskimääräinen jaksonaika. Keskimääräinen jaksonaika  $\bar{T}_p$  lasketaan yhtälöllä

$$\bar{T}_p = \frac{2}{n} \sum_{q=1}^n (t_q - t_{q-1}), \quad (28)$$

jossa  $n$  on tarkasteltavien nollakohdan ylitysten määrä ja  $(t_q - t_{q-1})$  on nollakohdan ylitysten väliin jäävä aika. ACF:sta lasketaan myös nollakohdan ylitysten väliin jäävän ajan keskihajonta  $\sigma_{T_p}$  yhtälön (9) esittämällä tavalla. Keskimääräisen jaksonajan ja keskihajonnan avulla lasketaan säännöllisyysluku  $r$  yhtälöllä

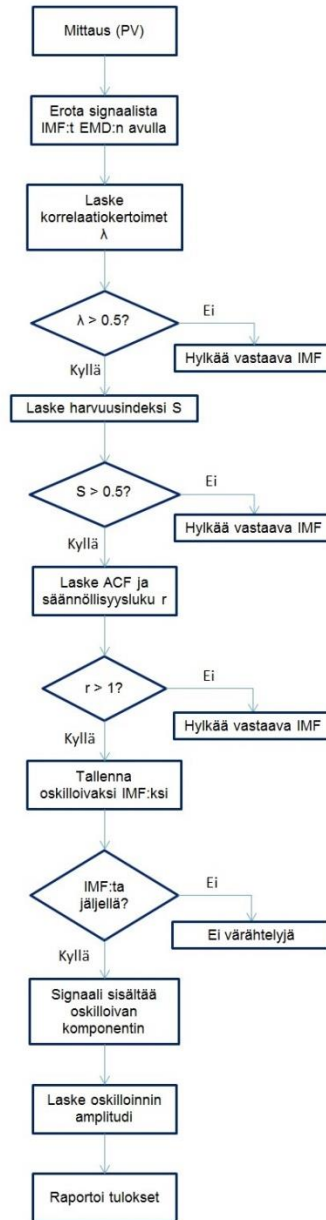
$$r = \frac{\bar{T}_p}{3\sigma_{T_p}}. \quad (29)$$

Säännöllisyysluvun avulla pyritään erottelemaan IMF:t niiden keskihajonnan mukaan. Säännöllisyysluvulle  $r$  on lähteessä [10] käytetty raja-arvoa 1. Ne IMF:t, joiden säännöllisyysluku on suurempi kuin 1, luokitellaan oskilloiviksi.

Neljännessä osassa lasketaan oskilloinnin amplitudi erotettujen IMF:n avulla. Edellä tehtyjen karsintojen perusteella jäljellä olevat IMF:t kuvaavat alkuperäisessä signaalissa olleita oskilloivia komponentteja. Amplitudi saadaan selville Fourier-muuntamalla jäljelle jääneet IMF:t ja laskemalla Fourier-muunnoksen itseisarvojen summat taajuusvälillä

$$\frac{1}{\bar{T}_p + \sigma_{T_p}} \leq \omega_{T_p} \leq \frac{1}{\bar{T}_p - \sigma_{T_p}}. \quad (30)$$

EMD:oon perustuva oskilloinnin tunnistuksen periaate voidaan nyt esittää kuvan 12 esittämällä tavalla.



**Kuva 12.** EMD periaate. (muokattu lähteestä [10])

Lopputuloksena esitetyllä metodilla saadaan selville, onko tarkasteltavassa signaalissa oskilloinniksi luokiteltavia komponentteja. Jos signaali on tehdyn tarkastelun mukaan oskilloiva, saadaan esitetyllä metodilla selville sen taajuus, keskihajonta, säännöllisyysluku sekä amplitudi. Käsiteltyllä metodilla voidaan tunnistaa myös useita eri taajuudella oskilloivia komponentteja, joita alkuperäinen signaali saattaa sisältää.

## 3. TYÖKALUN TOTEUTUS

Toteutettavan työkalun alustaksi valittiin Savcor Wedge prosessidiagnostiikkajärjestelmä. Koska kokonaan uuden ohjelman toteuttamisen kustannukset olisivat olleet verrattain korkeat ja työn laajuus olisi kasvanut sille asetettuja rajoja suuremmaksi, oli alustan valinta perusteltu. Alustan valintaa puolsivat myös useat Wedgen sisältämät ominaisuudet, jotka helpottavat saavutettujen tulosten pohjalta toteutettavaa prosessien tarkastelua. Lisäksi käyttämällä Wedgeä säästytään tiedonsiirron toteuttamiselta, koska Wedge on yhteydessä historiatietokantaan. Tarkempi kuvaus säätöpiirien suorituskykytyökalun toteutuksesta Wedgen lisäosana käsitellään luvussa 3.2. Sitä ennen tarkastellaan lyhyesti kaupallisesti tarjolla olevia suorituskykytyökaluja ja niiden toteutuksia. Tarkastelun tarkoituksena on luoda kuva tarjolla olevista ohjelmistoista ja niiden ominaisuuksista. Muodostuneen kuvan perusteella ymmärretään paremmin mitä ominaisuuksia toteutettavalta työkalulta vaaditaan ja mikä on nykyisten suorituskykytyökalujen taso.

### 3.1 Kaupalliset ohjelmistot

Monet toimijat ovat luoneet oman ohjelmiston säätöpiirien suorituskyvyn monitorointiin. Ainakin Metso, Siemens, Control Station, Honeywell ja ABB tarjoavat tähän tarkoitukseen kehitettyjä ohjelmistoja. Koska ohjelmistot ovat käyttötarkoitukseltaan hyvin samanlaiset, sisältävät ne pitkälti myös samat perusominaisuudet. Tästä syystä ei ole perusteltua käsitellä niitä kaikkia. Lisäksi kaupallisia ohjelmistoja tarkastellessa huomattiin, että niiden toteutuksesta ja toiminnasta on tarjolla hyvin rajoitetusti julkista tietoa. Tässä kappaleessa lyhyesti käsiteltäviksi suorituskykytyökaluiksi valittiin Control Station PlantESP sekä Honeywell CPM (Control Performance Monitor) Lite.

#### 3.1.1 Control Station PlantESP

Control Station PlantESP tukee monipuolisesti tiedonsiirtoa ohjelmiston ja historiatietokannan välillä. Se voidaan liittää historiatietokantaan esimerkiksi OPC-liittymän tai historiatietokannan oman ensisijaisen tiedonsiirtoväylän kautta. Kaupallisessa ohjelmistossa monipuolinen tiedonsiirtomahdollisuus helpottaa ohjelmiston käyttöönottoa ja toteutusta uusille asiakkaille.

Käytetyimpiä suorituskykymittareita PlantESP:ssä ovat:

- Säätvirheen itseisarvon keskiarvo (MAE)
- Ohjauksen jakauma
- Ohjauksen suunnanmuutokset
- Tilan muutokset

- Oskillointi
- Kokonaissuorituskyky
- Aika automaatilla
- Asetusarvon muutokset
- Ohjauksen muutos

Edellä mainittujen käytetyimpien suorituskykymittareiden lisäksi PlantESP sisältää myös muita perusominaisuuksia, kuten varianssin ja keskiarvon laskennan.

Oskillointitarkastelu PlantESP:ssä perustuu mittaussignaalin taajuustarkasteluun. Oskillointi ilmoitetaan todennäköisyytenä, joka saadaan jakamalla mahdollisesti oskilloivan taajuuden teho signaalin kokonaisteholla. Jos jonkin tietyn taajuuden teho suhteessa signaalin kokonaistehoon kasvaa, on signaali sitä todennäköisimmin oskilloiva.

Kokonaissuorituskyvyn laskentaan käytetään käyttäjän määrittämiä raja-arvoja kullekin suorituskykymittarille. Se, mitä suorituskykymittareita kokonaissuorituskyvyn laskentaan käytetään ei julkisesti saatavilla olevista dokumenteista selviä.

Suorituskykytarkastelun lisäksi ohjelmistolla voidaan tulostaa raportti tehdyn tarkastelun tuloksista. Raportin luominen ja tulostaminen mahdollistavat tulosten arkistoinnin ja vertailun. Lisäksi tuloksien jakaminen eri käyttäjien kesken helpottuu. [26]

### 3.1.2 Honeywell CPM Lite

Honeywell CPM Lite on kevyempi versio yrityksen varsinaisesta suorituskykytyökalusta. CPM Lite on mahdollista ottaa käyttöön nopeasti pienellä määrällä konfiguroitavia parametreja. Myös CPM Lite voidaan liittää historiatietokantaan tai automaatiojärjestelmään OPC-liitynnän avulla.

CPM Lite laskee säätöpiirikohtaiset suorituskykymittarit ja ne esitetään käyttäjälle kuvan 13 esittämällä tavalla.



**Kuva 13.** CPM Lite suorituskykymittarit. [3]

Suorituskykymittareiden laskennasta ei Honeywellin julkisissa artikkeleissa kerrota. To- teutettujen laskentojen perusteella säätöpiirit voidaan CPM Litessä lajitella esimerkiksi suorituskyvyn tai mahdollisen ongelman mukaan. Kuvassa 14 säätöpiirit on suodatettu ja lajiteltu oskilloinnin perusteella.

Loop Name	Loop Type	Performance Rating	Diagnosis Note	Oscillation Period
<a href="#">CPM_CAS_SUVL.PIDA</a>	Flow	Good	No action required.	0.97
<a href="#">CPM_EITOSC.PIDA</a>	Flow	Poor	Investigate more usi.	0.99
<a href="#">CPM_IDEAL2.PIDA</a>	Flow	Good	Excessive measuremen.	1.01
<a href="#">CPM_CMPRDATA.PIDA</a>	Flow	Good	Effective service fa. Excessive measuremen.	1.06
<a href="#">CPM_OVTPROP.PIDA</a>	Flow	Fair	Compressed Data, som.	2.32
<a href="#">CPM_CAS_NAS1.PIDA</a>	Flow	Excellent	No action required.	2.41
<a href="#">CPM_NDINT3.PIDA</a>	Flow	Fair	Offset exists suffi.	16667
<a href="#">CPM_NDINT2.PIDA</a>	Flow	Fair	Offset exists suffi.	16667

**Kuva 14.** CPM Lite tulosten esitys.[3]

Kuvasta 14 huomataan, että lajittelun lisäksi CPM Lite tulostaa käyttäjälle piirin tyyppin, suorituskyyarvion sekä diagnostiikkakommentin. Suorituskyky CPM Litessä arvioidaan asteikolla erinomainen, hyvä, kohtalainen ja huono.

Tehdyn tarkastelun pohjalta voidaan CPM Litessä avata säätöpiirikohtainen info-ikkuna. Info-ikkunan sisältö esitetään kuvassa 15.

Loop Information Summary		Loop Metrics Summary		Expert Guidance Help
Loop name	CPM_COMMOSC.PIDA	Oscillation period	6m 8s	
Plant hierarchy	Enterprise/XML files	OP Travel(Per hour)	63.9	
Loop type	Flow	OP Mean(%)	14.08	
Performance rating	poor	Oscillation index	0.2	
Diagnosis	Investigate more using Expert Guidance (f available).	Stiction probability(%)	19.9	
Criticality	Normal	RPI	Value is not calculated	
		CPI	0.42	
<b>Recommended action :</b>				
Check and repair the control valve.				
<b>Comments:</b> When checking the control valve for stiction, make four steps up of 0.5% each followed by four steps down of 0.5% each. There should be a corresponding step in the flow for each step. The root problem could be worn stem packing, worn or dirty positioner or build up of solids around the valve trim. Some sticky valves become stuck valves that can cause a serious incident.				
<a href="#">&lt;&lt; Back</a>				
Please do not use the browser's Back button. Use only the back button provided above.				
<b>Response Summary :</b>				
	<b>Question</b>	<b>Your response</b>		
	What is the impact of the flow variation on the process?	Significant		
	Is there a clear, consistent oscillation in the flow PV?	Yes		
	Perform manual test and choose outcome 1 or outcome 2 based on the result.	Outcome 2		

**Kuva 15.** CPM Lite säätöpiirikohtainen info. [3]

Säätöpiirikohtaiseen info-ikkunaan on koottu säätöpiiristä saatavilla olevat tiedot sekä lasketut suorituskyykymittarit. Näiden lisäksi ohjelmisto kertoo suositeltavia toimenpiteitä suorituskyyvyn parantamiseksi.

## 3.2 Ominaisuudet

Kuten todettu, säätöpiirien suorituskykyökalu toteutetaan prosessidiagnostiikkajärjestelmä Wedgen lisäosana. Wedge sisältää Matlab Runtime ohjelmiston, jonka avulla järjestelmässä voidaan suorittaa Matlab ohjelmointikielellä toteutettuja laskentoja. Wedge mahdollistaakin tarkasteltavien signaalien käsittelyn Matlab Runtime lisäosalla ja tulosten esittämisen HTML/Javascript-muodossa. Käsitellään ensin eri signaaleille toteutetut laskennat, jonka jälkeen esitellään tulosten esittämiseen käytettävä toteutus kappaleessa 3.3.

Säätöpiirien suorituskyvyn arviointiin on tarkasteltavassa kohteessa käytettävissä mitaussignaali, säätimen ulostulo, asetusarvo sekä säätimen tila. Säätimen tila on joko automaatti tai manuaali. Kaikki signaalit ovat tallennettu historiatietokantaan, josta Wedge hakee signaalien tallennetut datapisteet ja yhdistää ne lineaarisella interpoloinnilla. Datapisteiden kautta lineaarisesti interpoloitu signaali on käytettävissä laskennassa.

### 3.2.1 Säätimen tila

Yksinkertaisimpiin laskentoihin kuuluu säätimen tilan tarkastelu. Jos säädin on asetettu manuaalille, ei säätöpiiri kykene toteuttamaan sille asetettuja tavoitteita. Joissain tilanteissa, kuten prosessin ylös-tai alasajossa, voi olla perusteltua asettaa säätöpiiri manuaalille. Normaalisissa tuotannossa säätimien tulisi kuitenkin olla automaattilla.

Jos säätöpiirin toiminta automaattilla ei jostain syystä vastaa sille asetettuja tavoitteita, voi operaattori vaihtaa tilan manuaalille saattaakseen prosessin haluttuun tilaan. Jollei ongelmasta raportoida tai ongelmaa korjata, säädin jää usein manuaalille. Ajan kuluessa prosessista saattaa löytyä useita manuaalilla olevia säätimiä. Manuaalilla olevat säätimet heikentävät prosessin toimintaa ja lisäävät operaattoreiden työmäärää. Kustannusnäkökulmasta voidaan todeta, että kunkin säätöpiirin suunnittelu, testaus ja käyttöönotto ovat aiheuttaneet kustannuksia, jotka on perusteltu esimerkiksi automaatioasteen ja prosessin tehokkuuden kasvulla. Käyttämällä säätimiä manuaalilla hyväksytään samalla investointikustannukset taloudellisina tappioina. Hyväksytään myös se, että olemassa olevan järjestelmän suorituskykyä ei täysin hyödynnetä. Tästä syystä manuaalilla olevat säätimet tulee havaita ja havainnon perusteella selvittää vian syy.

Historiatietokantaan on tallennettu säätimen tilatieto binäärisenä. Tilatiedon ollessa 0, on säädin manuaalilla ja vastaavasti sen ollessa 1, säädin on automaattilla. Tilatiedon keskiarvo lasketaan kaavalla (6). Kun tilatiedon keskiarvo kerrotaan sadalla, saadaan prosentuaalinen aika tarkasteluvälistä, jolloin säädin on automaattilla. Jos tarkastelun perusteella säädin on tarkasteluvälillä enemmän manuaalilla kuin automaattilla, esitetään säätimen tila tarkastelussa manuaaliksi.



### 3.2.2 Asetusarvomutokset

Asetusarvosignaalista lasketaan muun muassa asetusrvon muutosten määrä. Jos säätimen asetusrvoa ei määrää mikään ylempien tason säädin, ei asetusrvoa lähtökohtaisesti tulisi joutua muuttamaan tasaisessa tuotannossa. Jos operaattori joutuu muuttamaan asetusrvoa usein, liittyy säätöpiirin toimintaan usein jokin vika, jota operaattori pyrkii korjaamaan asetusrvoa muuttamalla. Yksittäiseen säätöpiiriin kohdistuva huomio saattaa vähentää operaattorin kykyä tarkastella koko prosessin toimintaa. Tästä syystä kyseiset säätöpiirit tulee havainnoida ja syy asetusrvon muuttamisen tarpeelle selvittää.

Asetusrvomutosten määrä lasketaan asetusrvosignaalista tarkastelemalla signaalin derivaatan muutoksia. Jos signaalin derivaatta on jollakin ajanhetkellä nollasta poikkeava, on tapahtunut asetusrvon muutos. Muutokset tarkastellulla aikavälillä summataan yhteen, jolloin saadaan selville koko tarkasteluajana tehtyjen asetusrvomutosten määrä.

### 3.2.3 Säätimen kategoria

Edellä kappaleessa 3.2.1 mainitun tila-jaottelun lisäksi säätimet jaotellaan vielä kolmeen eri kategoriaan. Kategoriat ovat:

- Kaskadi: Alasäädin
- Kaskadi: Yläsäädin
- Pääsäädin

Historiatietokantaan tallennettujen signaalien perusteella säädin kuuluu ensimmäiseen luokkaan, jos sen ohjauksen yksikkö on prosentti ja sen asetusrvo muuttuu tarkasteluvälillä tiettyä raja-arvoa useammin. Raja-arvoksi asetusrvomutoksille valittiin 50krt/24h. Jos tarkasteluväli on jokin muu kuin 24h, skaalataan raja-arvo suhteessa tarkasteluvälin pituuteen.

Säädin luokitellaan toiseen luokkaan, jos sen ohjauksen yksikkö on jokin muu kuin prosentti. Tällaisen säätimen ulostulo on todennäköisimmin jonkin alemman säätimen asetusrvo.

Säädin luokitellaan viimeiseen luokkaan, jos sen ohjauksen yksikkö on prosentti ja asetusrvomutosten määrä ei ylitä ensimmäiselle luokalle asetettua raja-arvoa. Tällaisen säätimen asetusrvon määrittää perinteisesti operaattori ja ohjaus vaikuttaa suoraan fyysiseen toimilaitteeseen.

Säätimet luokitellaan eri kategorioihin, jotta tietyn tyyppiset säätimet voidaan halutessa suodattaa pois tarkastelusta. Lisäksi osa laskennoista saattaa koskea vain tiettyyn kategoriaan kuuluvia säätimiä.

### 3.2.4 Saturaatio

Kolmas tarkasteltava säätöpiirin suorituskykyyn vaikuttava tekijä on ohjauksen saturoituminen. Saturoitumisella tarkoitetaan säätimen ulostulon ajautumista joko ylä- tai alarajalleen. Esimerkiksi täysin auki tai täysin kiinni oleva venttiili on saturoitunut. Jos ohjaus on saturoitunut ylärajalleen, ei ohjausta luonnollisestikaan ole mahdollista enää kasvattaa. Sama pätee päinvastaisena myös alarajalle. Tällöin tarpeen kasvaessa tai pienentyessä ei säätöpiirillä ole mahdollisuutta vastata muuttuneeseen tilanteeseen. Tällöin säätöpiiri ei myöskään kykene kompensoimaan siihen kohdistuvia häiriöitä. Toisin sanoen takaisinkytkennän vaikutus loppuu, kunnes säädettävä suure palautuu säätöalueelle.

Saturoituminen saattaa rajoittaa tuotantotasoa ja pahimmillaan vaarantaa turvallisuutta. Ideaalisessa tapauksessa säätimen ulostulo on säätöalueen puolivälissä, jolloin säätövaraa on käytössä mahdollisimman paljon. Tehdasta ja sen toimilaitteita suunniteltaessa hyvin mitoitettu toimilaitte saattaa tuotantotasojen kasvaessa jäädä pieneksi. Saturoituminen saattaa johtua myös esimerkiksi väärin mitoitettusta toimilaitteesta tai säätimen sopimattomasta virityksestä. Toisaalta myös laitteiden kuluminen ja linjastojen likaantuminen voi aiheuttaa toimilaitteen saturoitumisen.

Saturaatiotarkastelu rajataan kattamaan vain sellaiset säätöpiirit, joissa ohjauksen ulostulon yksikkönä on prosentti. Sellaiset säätöpiirit, joiden ulostulon yksikkö on jokin muu, syöttävät ohjauksen todennäköisesti jollekin alemman tason säätimelle. Tästä syystä saturaatiotarkastelu rajataan koskemaan vain sellaisia säätöpiirejä, joissa ohjaus vaikuttaa suoraan fyysiseen toimilaitteeseen.

Ohjaus ajatellaan saturoituneeksi, jos sen arvo on suurempi kuin 98 % tai pienempi kuin 2 %. Aika, jolloin ohjaus on saturoitunut, saadaan laskettua säätimen ulostulosignaalista. Saturaatiotarkastelussa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että ohjaukselle on automaatiojärjestelmässä mahdollista määrittää säätöpiirikohtaiset ylä- ja alarajat. Jos sallittu ohjausväli poikkeaa perinteisestä 0-100 % valinnasta, ei tarkastelulla välttämättä huomata kaikkia saturoituneita toimilaitteita. Säätöpiirikohtaiset ohjausrajat olisi mahdollista tallentaa tietokantaan, jolloin saturaatiotarkastelusta tulisi tarkempi. Sovelluskohteessa ohjausrajoja ei kuitenkaan tallenneta tietokantaan eivätkä ne siitä syystä ole käytettävissä.

### 3.2.5 Oskillointi

Säätöpiirin jaksollisen värähtelyn, eli oskilloinnin, tarkastelu toteutettiin kappaleessa 2.5.2 esitetyllä tavalla. Jottei tuotantoon kuuluvia tarkoituksellisia tasonvaihteluja havainnoitaisi jaksollisina värähtelyinä, päätettiin mittaussignaali ylipäästösuodattaa.

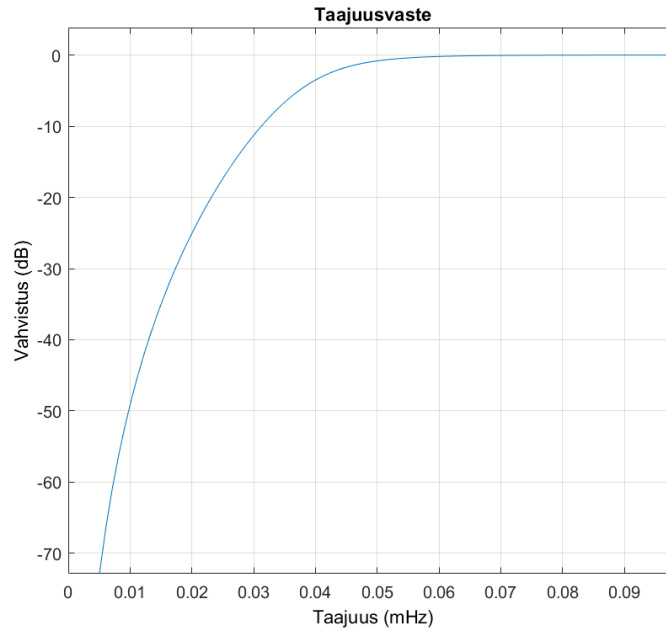
Ylipäästösuodatus päätettiin toteuttaa kappaleessa 2.4 esitetyllä äärettömän impulssivasteen suotimena. Ylipäästösuodatettu signaali on oikeastaan kaistanpäästösuodatettu,

koska diskreetointi ja pakkaus ovat suodattaneet signaalista korkeat taajuudet. Koska Wedgessä on mahdollisuus valita tarkastelujakson lisäksi myös näytteenottoväli, tulee ylipäästösuo-datin suunnitella erikseen jokaiselle näytteenottovälille. Näytteenottovälien vaihto-ehtoina Wedgessä ovat 1 sekunti, 10 sekuntia, 1 minuutti, 10 minuuttia sekä 1 tunti. Koska signaalit ovat pääsääntöisesti tallennettu historiatietokantaan 10 sekunnin näytteenottovälillä, ei Wedgessä 1 sekunnin näytteenottovälin valinta ole perusteltua eikä se paranna tulosten luotettavuutta. Tästä syystä näytteenottovälin minimiksi säätöpiirien suorituskykyä tarkastellessa asetettiin 10 sekuntia. Sen lisäksi 1 tunnin näytteenottovälillä laskennat eivät ole enää luotettavia. Tästä syystä näytteenottovälin maksimiksi asetettiin 10 minuuttia.

Ylipäästösuo-din tulee suunnitella siis näytteenottoväleille 10 sekuntia, 1 minuutti sekä 10 minuuttia. Suotimen suunnittelussa päädyttiin lopputulokseen, että jaksonajaltaan yli 6 tunnin taajuudet halutaan suodattaa. Sen lisäksi suotimen aste haluttiin pitää mahdollisimman alhaisena, jottei laskennasta tulisi raskas. Estokaistan raja-taajuudeksi valittiin 12 tunnin jaksonaikaan vastaava taajuus. Suotimen suunnittelussa päästökaistalle sallitaan 3dB värähtely. Siirtokaistalla vahvistuksen tulee laskea vähintään 20dB.

Analogisten suotimien suunnittelu on laajemmin tutkittu ja dokumentoitu kuin digitaalisten. Tästä syystä yleinen tapa suunnitella digitaalinen suodin on suunnitella se ensin analogisena ja muuttaa se suunnittelun jälkeen digitaaliseen muotoon. Lähteessä [24] käsitellään analogisen suotimen muuntamista digitaaliseksi sekä vertaillaan erilaisten IIR-suotimien taajuusvasteita. Vertailtaessa elliptistä-, Chebyshev-, ja Butterworth-suodinta keskenään, selviää, että Butterworth-suotimen vahvistuksen värähtely esto- sekä päästökaistalla on vähäistä. Lisäksi Butterworth-suotimen avulla saavutetaan tarvittaessa melko kapea siirtokaista suotimen asteluvun säilyessä kohtuullisena.

Butterworth-suotimen suunnittelussa käytetään apuna Matlabin Signal Processing Toolboxin suodinsuunnittelutyökalua. Asettamalla suunniteltavan ylipäästösuo-timen suunnitteluparametrit edellä mainituiksi, saadaan luotua jokaiselle näytteenottotaajuudelle suotimen differenssiyhtälössä (13) esitetyt kertoimet  $a_i$  ja  $b_i$ . Minuutin näytteenottovälille suunnitellun ylipäästösuo-timen taajuusvaste esitetään kuvassa 16.

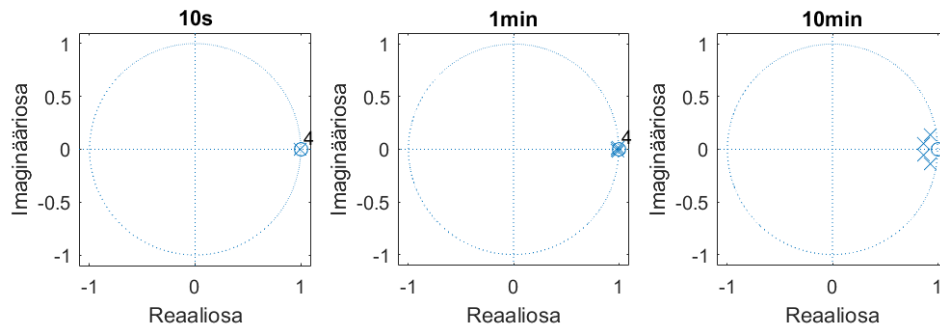


**Kuva 16.** Ylipäästösuotimen taajuusvaste 1min näytteenottovälillä.

Taajuusvaste myös muilla näytteenottoväleillä vastaa hyvin pitkälti kuvassa 10 esitettyä taajuusvastetta. Suodinta suunniteltaessa määritettiin päästökaistan rajataajuudeksi 6 tunnin jaksonaikaan vastaava taajuus, eli n. 0.046 mHz. 12 tunnin jaksonaikaan vastaava estokaistan rajataajuus sen sijaan on n. 0.023 mHz. Toteutuneesta taajuusvasteesta huomataan, että suunniteltu ylipäästösuodin alkaa vaimentaa taajuutta 0.06 mHz matalampia taajuuksia. Kyseinen taajuus vastaa n. 4h 40min jaksonaikaan. Vaikka suotimen vaimennus alkaakin hieman korkeammalla taajuudella kuin oli suunniteltu, täyttää se sille asetetut vaatimukset.

Suotimen vahvistus estokaistan raja-taajuudella on n. -20 dB, eli se vastaa suunnitelmia. Vahvistuksen värähtely päästökaistalla on sen sijaan huomattavasti suunniteltua pienempi. Tarkempi taajuusvasteen tarkastelu paljastaa, ettei vahvistuksessa ole huomattavaa värähtelyä päästökaistalla. Värähtelemätön vahvistus päästökaistalla takaa sen, ettei signaalin ylipäästösuodatus vahvista tai vaimenna mitään päästökaistan taajuuksista.

Ennen suunnitellun ylipäästösuotimen käyttöä tulee varmistua siitä, että se on stabiili. Suotimen stabiiliustarkastelu tulee tehdä kaikille toteutetuille suotimille. Stabiiliustarkastelu toteutetaan tutkimalla muodostettujen suotimien siirtofunktioiden napa-nollakuvia. Toteutettujen suotimien napa-nollakuviot esitetään kuvassa 17.



**Kuva 17.** Suotimien napa-nollakuviot.

Koska kaikkien suunniteltujen suotimien navat ovat yksikköympyrän sisällä, ovat suotimet stabiileja.

Koska Wedgeen toteutettavan lisäosan näytteenottoväleiksi rajattiin edellä mainitut kolme vaihtoehtoa, voidaan suodinsuunnittelun lopputuloksena saadut suotimen differenssiyhtälön parametrit  $a_i$  ja  $b_i$  siirtää käytettäväksi Wedgen Matlab Runtime:ssa. Oskillaatiotarkastelussa selvitetty oskilloivien taajuuksien amplitudit skaalataan vertailun helpottamiseksi suhteessa mittaussignaalin keskiarvon estimaattiin.

### 3.2.6 Ohjauksen vaihtelu

Suorituskykytyökalun avulla haluttiin saada selville myös sellaiset säätöpiirit, joissa ohjauksen arvo vaihtelee tarkasteluvälillä runsaasti. Varsinkin korkeataajuinen ohjauksen arvon vaihtelu voi vaurioittaa toimilaitetta ja johtaa huoltovälin lyhenemiseen. Toisaalta taas vaurioituneita toimilaitteita saattaa olla hankala havaita, jolloin vaurioitunutkin toimilaitte pidetään huoltamattomana tuotannossa. Vaurioitunut toimilaitte ei välttämättä kykene toteuttamaan siltä vaadittuja toimintoja. Saturaatiotarkastelun tavoin myös ohjauksen arvon vaihtelun tarkastelu tehdään vain säätöpiireille, joissa ohjaus vaikuttaa suoraan fyysiseen toimilaitteeseen.

Ohjauksen arvon vaihtelu päätettiin toteuttaa tarkastelemalla ohjauksen kulkemaa ”matkaa” prosentteina tarkasteluvälillä. Ohjauksen kulkema matka lasketaan summaamalla ohjaussignaalin differenssin arvot tarkasteluvälillä. Jos laskettu lopputulos ylittää sille asetetun rajan, tulee säätöpiirin toiminta tarkistaa. Raja-arvoksi valittiin 100%/h. Tarkasteluvälin vaihdeltaessa raja-arvo skaalataan suhteessa tarkasteluvälin pituuteen.

Vaihtoehtoinen ohjauksen vaihtelun tarkastelu toteutettiin tarkastelemalla ohjauksen suunnanmuutosten määrää. Jos ohjauksen suunnanmuutosten määrä on suuri, saattaa toimilaitteeseen kohdistua huomattavaa rasitusta.

### 3.2.7 Asetusarvon seuranta

Asetusarvon seuranta on säätöpiirin yksi tärkeimmistä tehtävistä ja ongelmista. Jollei asetusarvoa kyetä saavuttamaan, saattaa se johtaa tuotannon heikkenemiseen. Jotkin prosessit saattavat tehokkaan toiminnan ylläpitämiseksi vaatia esimerkiksi hyvinkin tarkan lämpötilan. Jollei kyseistä lämpötilaa saavuteta, prosessin tehokkuus laskee. Sama pätee edellisen esimerkin tavoin myös muihin säätöpiireihin.

Säätöpiirin kykyä seurata asetusarvoa arvioidaan vertaamalla mittauksen ja asetusarvon erotusta jokaisella näytteenottohetkellä valitulla tarkastelujaksolla. Erotuksen itseisarvot summataan yhteen ja jaetaan näytteenottohetkien määrällä, jolloin saadaan erosuureen keskiarvo. Jotta tuloksista saadaan vertailukelpoisia, ilmoitetaan erosuureen keskiarvo prosentteina asetusarvon keskiarvosta.

### 3.2.8 Suorituskyvyn tila

Työkalun suorittamien laskutoimitusten merkittävyyttä säätöpiirien kokonaissuorituskyvyn arvioinnissa pyrittiin kartoittamaan mahdollisimman monipuolisesti käyttämällä hyväksi historiatietokantaa. Kuten jo kappaleessa 2.2 todettiin, säätöpiiriltä vaadittava suorituskyky on hyvin yksilöllistä. Tästä syystä yleisesti päteviä rajoja säätöpiirin suorituskyvyn arviointiin on hankala määrittää. Tuloksia tarkastellessa tultiinkin siihen tulokseen, että jos säätöpiirien suorituskyky haluttaisiin arvioida asteikolla: erinomainen, hyvä, kohtalainen, huono, kuten kappaleessa 3.1.2 esitettyssä Honeywell:n CPM työkalussa, tulisi suorituskyvyn laskennassa käytettäville suureille määrittää säätöpiirikohtaiset rajat.

Koska tämän työn puitteissa toteutetun suorituskykytyökalun käyttöönotossa määritettävien parametrien määrä haluttiin säilyttää kohtuullisena, ei säätöpiirikohtaisia rajoja haluttu ottaa käyttöön. Suorituskyvyn arviointi päätettiin toteuttaa vähemmän tiukalla asteikolla: hyvä, seurattava, tarkistettava. Manuaalilla olevien säätimien suorituskykyä ei arvioida edellä mainitulla asteikolla. Säätöpiirien arviointi edellä mainitun asteikon eri pykälille toteutettiin tarkastelemalla kolmea kriteeriä:

- Asetusarvon seuranta
- Jaksolliset värähtelyt
- Ohjauksen vaihtelu

Tehtyjen kokeiden perusteella valittiin raja-arvot jokaiselle kriteerille ja asteikolle. Raja-arvot valittiin taulukon 1 mukaisesti. Taulukossa 1 asetusarvon seurannan yksikkö on säätövirheen keskiarvo prosentteina asetusarvosta, jaksollisen värähtelyn yksikkö on värähtelyn amplitudi prosentteina mittauksen keskiarvosta ja ohjauksen vaihtelun yksikkö on ohjauksen kulkema matka prosentteina.

**Taulukko 1.** Suorituskyvyn arvioinnin raja-arvot.

	Tarkistettava	Seurattava	Hyvä
Asetusarvon seuranta (As)	$As \geq 10\%$	$5\% < As < 10\%$	$As \leq 5\%$
Jaksollinen värähtely (Jv)	$Jv \geq 10\%$	$1\% < Jv < 10\%$	$Jv \leq 1\%$
Ohjauksen vaihtelu (Ov)	$Ov \geq 2400\%/päivä$	-	-

Toteutetun arvioinnin on tarkoitus toimia ohjaavana lähtökohtana suuren säätöpiirimäärän suorituskyvyn tarkastelussa.

### 3.3 Toteutus

Wedge mahdollistaa signaaleille suoritettujen laskentojen esittämisen HTML-dokumenttina. Suoritettujen laskutoimitusten tulokset voidaan siirtää muuttujina HTML-dokumenttiin. Signaaleille toteutetut laskennat voidaan suorittaa joko Wedgen sisältämällä Matlab-lisäosalla tai erillisellä palvelimella. Wedgen sisältämä Matlab-lisäosa sisältää pelkästään Matlab-ohjelmiston peruslaskentakaavat. Palvelimelle peruslaskentakaavojen lisäksi on sovelluskohteessa hankittu Signal Processing Toolbox-kirjasto.

Laskennan suorittamista palvelimella puoltavat monipuolisemmat laskentakirjastot sekä mahdollisuus käyttää laskennassa myös itse toteutettuja Matlab-funktioita. Itse tehtyjä funktioita voidaan tallentaa palvelimelle, jolloin niitä on mahdollista kutsua Wedgen Matlab Runtimen kautta. Tämä ominaisuus olisi helpottanut varsinkin oskilloinnin laskentaan toteutetun scriptin jäsentelyä ja toteutusta.

Laskenta päätettiin toteuttaa kuitenkin paikallisesti Wedgen Matlab-lisäosalla. Kun laskenta toteutetaan paikallisesti, säästytään tiedonsiirrolta Matlab-palvelimen ja käyttäjän välillä. Koska samaa palvelinta käyttävät myös monet muut käyttäjät, vältetään näin myös kasvattamasta palvelimen kuormaa.

Toteutettujen suorituskykylaskentojen tulosten tarkastelu haluttiin säilyttää yksinkertaisena. Tavoitteena oli luoda näkymä, josta laskennan tulokset kullekin säätöpiirille on helposti nähtävillä. Tulosten tarkastelun lisäksi haluttiin myös antaa käyttäjälle mahdollisuus avata säätöpiirikohtaisten signaalien trendit valitulla tarkastelujaksolla. Tämä ominaisuus helpottaa suorituskykyarvioinnin tulosten validointia ja säätöpiirin toiminnan jatkotarkastelua. Trendien luonti käyttäjälle toteutettiin Wedgen oman Javascript-kirjaston avulla.

Koko suorituskykytarkastelun pohjaksi valittiin jQuery Javascript-kirjasto ja sen lisäosa DataTables. DataTables-lisäosa mahdollistaa tulosten esittämisen taulukkomuodossa. Lisäosa sisältää valmiina myös lajittelu- ja haku-ominaisuudet. Lajittelu-ominaisuus mahdollistaa säätöpiirien lajittelun esimerkiksi tietyn suorituskykymittarin mukaan. Tarkastellessa esimerkiksi oskilloivia säätöpiirejä, on mahdollista lajitella säätöpiirit värähtelyn voimakkuuden mukaan. Jos sen sijaan tiedossa on säätöpiiri, jonka toiminnassa saattaa olla ongelmia, voidaan kyseinen säätöpiiri hakea kirjoittamalla piirin tunnus hakukenttään. Haku-ominaisuus mahdollistaa myös erityyppisten säätöpiirien suodatuksen tuloksista.

Koska laskentoja ja tietoa kustakin tarkasteltavasta säätöpiiristä kertyy paljon, myös tiedon organisointi oli syytä ottaa huomioon. Hyvin järjestelty ja selkeä tiedon jäsentely helpottaa muun muassa työkalun jatkokehitystä ja vianetsintää. Säätöpiirikohtaiset tiedot päätettiin siirtää DataTables-lisäosalle matriisina, jonka jokainen rivi sisältää yhden säätöpiirin kaikki tiedot. Koska kaikkia tietoja ei välttämättä ole tarpeellista esittää käyttäjälle, käytettävä lisäosa mahdollistaa myös tarpeettomien tietojen piilottamisen. Vaikka osa tiedoista piilotettaisiin, ovat ne siitä huolimatta tarpeen tullen käytettävissä laskennassa tai palautettavissa näkyviksi. Perusnäköymästä piilotettuja tietoja voidaan myös tuoda näkyviin käyttäjän halutessa esimerkiksi erillisessä ikkunassa. Suorituskykytyökalun ulkonäköä pyrittiin siistimään käyttämällä avoimia CSS- (Cascading Style Sheets) tiedostoja. Toteutetun suorituskykytyökalun aloitusnäköymä on esitetty kuvassa 18.



## Säätöpiirien suorituskykyanalyysi

Säätöpiirejä tarkastettu 91 kappaletta, joista

Manuaalisia 8 kappaletta

Tarkistettavia 37 kappaletta

Seurattavia 24 kappaletta

Hyvin toimivia 22 kappaletta

Trendit								
Mittaus	Ohjaus	Asetusarvo	Man/Auto	Etsi				
Piiri	Seitys	Asetusarvon muutokset ^	Saturaatio (%) ^	Voimakkaimman värähtelyn jaksonaika (min) ^	Voimakkaimman värähtelyn amplitudi/ka. ^	Tyyppi ^	Tila v	INFO
PI-6701.me	R7 PÄÄKÄÄSUPUHALTIMEN SÄÄT	30	0.00	12	0.867	Päissädin	Tarkistettava	Info
TICA-6761.me	R7 LIT HAPPO TUOTEHAPPOSÄIL LPT	0	0.00	19	0.407	Päissädin	Tarkistettava	Info
LIC-6706.me	R7 TUOTEHAPPOSÄILIÖN PINTA	0	6.63	38	0.228	Päissädin	Tarkistettava	Info
OIC-6706.1.me	R7 KT KERT.H VÄKEVYYS (RAJ S)	0	0.00	18	0.138	Päissädin	Tarkistettava	Info
LICA-6704.me	KT KERTOHAPOSÄILIÖ PINTA	0	2.28	18	0.136	Päissädin	Tarkistettava	Info
TICA-6763.me	TUOTEHAPON LPT LS JÄLKEEN	0	0.00	21	0.102	Päissädin	Tarkistettava	Info
LICA-6705.me	R7 LIT KERTOHAPOSÄILIÖ PINTA	0	0.00	19	0.100	Päissädin	Tarkistettava	Info
PDIC-6736.me	RHT 105 C VÄLIVESI PAINE-ERO	0	0.00	166	0.0687	Päissädin	Tarkistettava	Info
TIC-6768.4.3.me	VALIV.LS.EEN	0	0.00	128	0.0614	Päissädin	Tarkistettava	Info
LICA-6702.me	STRIPPAUSTORNI ALASÄILIÖ PINTA	14	99.0	159	0.0554	Päissädin	Tarkistettava	Info

Näytetään rivit 1 - 10 (yhteensä 91)

Näytä/pilota tuloksia

Asetusarvon seuranta

Kehitysehdotuksia suorituskykyanalyysin parantamiseksi voi lähettää osoitteeseen: matti.makitalo@insta.fi

**Kuva 18. Työkalun perusnäky.**

Perusnäkyssä oletuksena on säätöpiirien lajittelu suorituskyky-asteikon mukaan. Kuten mainittu, säätöpiirit voidaan lajitella toteutettuun taulukkoon myös muiden laskettujen ominaisuuksien mukaan. Valitsemalla taulukosta rivi, muuttuvat taulukon yläpuolella olevat ”trendit”-otsikon alla olevat painikkeet aktiivisiksi. Painikkeista on tällöin mahdollista avata valitulla rivillä olevan säätöpiirin trendit näkymän alalaitaan.

Taulukon viimeiseen sarakkeeseen luotiin ”info”-painike, josta saadaan avattua erillinen ikkuna, johon on koottu suorituskyvyn arviointiin käytettävien laskentojen tulokset. Esimerkki info-ikkunasta ja sen sisällöstä on esitetty kuvassa 19.

Piirikohtainen info
<p><b>Asetusarvon seuranta:</b> Säätöpiiri ei seuraa asetusrvoa. Keskimääräinen säätövirhe 10 % asetusrvosta.</p> <p><b>Jaksolliset värähtelyt:</b> Säätöpiirissä voimakasta jaksollista värähtelyä jaksonajalla 19 min.</p> <p><b>Ohjaus:</b> Ohjauksessa voimakasta vaihtelua.</p>

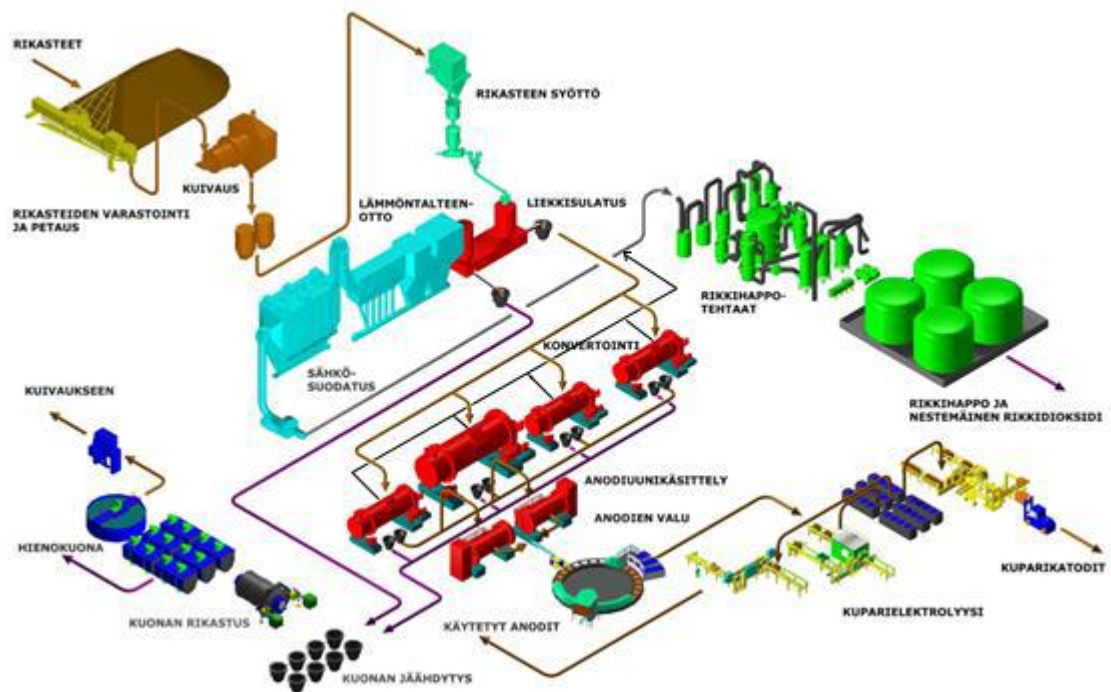
**Kuva 19. Info-ikkuna.**

Info-ikkunan tarkoitus on antaa käyttäjälle ymmärrettävässä muodossa tietoa siitä, miksi kyseinen piiri on luokiteltu suorituskyvyltään sille määritetylle portaalle.

Taulukon alalaitaan sijoitettiin painike, josta on mahdollista lisätä tai poistaa taulukosta ominaisuuksia. Painikkeita on helppo lisätä, joten työkalun kehittyessä uusien ominaisuuksien esittäminen ei sotke perusnäkyä, vaan tulokset saadaan näkyviin haluttaessa.

## 4. SUORITUSKYKYÖKALUN TESTAUS

Suorituskykyökalun sovelluskohteena toimii Boliden Harjavalta Oy (BOHA). BOHA:lla on Satakunnassa kaksi toimipistettä. Harjavallassa sijaitsevassa toimipisteessä sulatetaan kupari- ja nikkelikasteet. Sulatuksen sivutuotteena syntyvästä rikkipitoisesta poistokaasusta valmistetaan rikkihappoa sekä nestemäistä rikkidioksidiä. Kuparintuotannon osaprosessit on esitetty kuvassa 20.



*Kuva 20. Kuparin tuotannon prosessikaavio. [20]*

Toinen BOHA:n toimipiste sijaitsee Porissa. Harjavallassa tuotetut kupariaanodit siirretään junalla Poriin, jossa suoritetaan kupariaanodien puhdistus elektrolyysin avulla. Elektrolyysin sivutuotteena valmistetaan kultaa ja hopeaa. [20]

Insta Automation Oy on vuodesta 2007 saakka toteuttanut BOHA:n alueella erilaisia suunnittelu- ja kunnossapitotehtäviä. Toteutettu säätöpiirien suorituskykyökalu onkin osa yritysten välistä jatkuvaa yhteistyötä.

### 4.1 Tarkasteltava prosessi

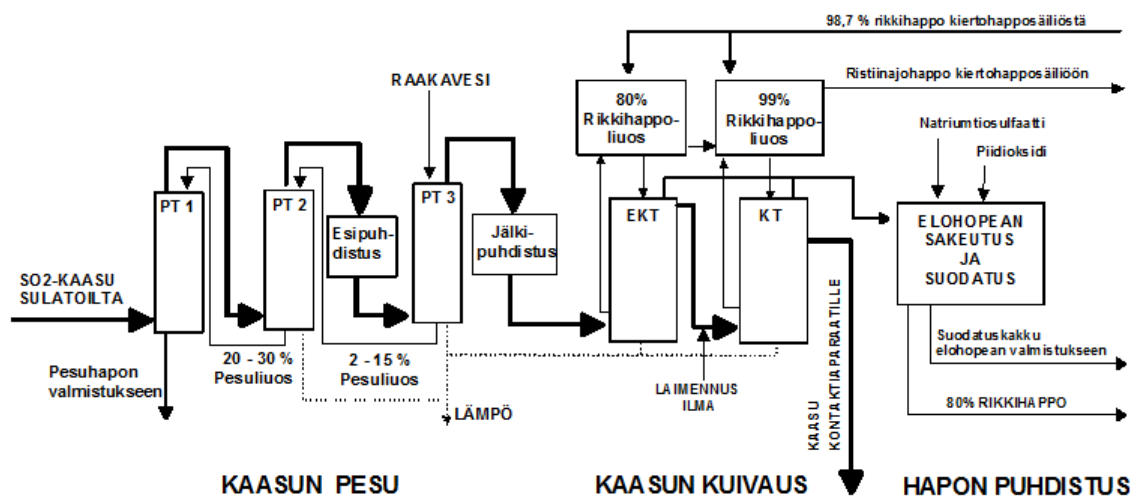
Koska BOHA:n tuotantolaitos on kokonaisuudessaan hyvin kompleksinen kokonaisuus, päätettiin tämän työn puitteissa rajata suorituskykyökalun toteutus yhteen osaprosessiin. Osaprosessiksi valittiin BOHA:n rikkihappotehdas 7 (RHT7). Työkalua suunnitelta-

essa otettiin kuitenkin huomioon myös se, että se on tulevaisuudessa helppo ottaa käyttöön myös muissa osaprosesseissa. Käsitellään lyhyesti rikkihappotehtaan toiminta ja sen komponentit, jotta ymmärretään paremmin sen toimintaan vaikuttavat seikat ja osataan paremmin tulkita suorituskykyökälyn tuloksia.

Rikkihappotehtaan tehtävä on käsitellä sulatusuuneilta ja konverttereilta saapuva rikkipi-  
toinen poistokaasu rikkihapoksi. Sulatusuuneilta saapuva kaasuvirta on melko tasainen. Konvertointi sen sijaan on panosprosessi, jonka takia myös rikkihappotehtaille saapuva kaasukuorma vaihtelee. Kaasujen käsittely rikkihappotehtaassa voidaan jakaa neljään pienempään osaprosessiin:

- Kaasun pesu
- Kaasun kuivaus
- Kontaktointi
- Imeytys

Kahta ensimmäistä vaihetta havainnollistava prosessikaavio on esitetty kuvassa 21.



*Kuva 21. Kaasun pesu ja kuivaus. [27]*

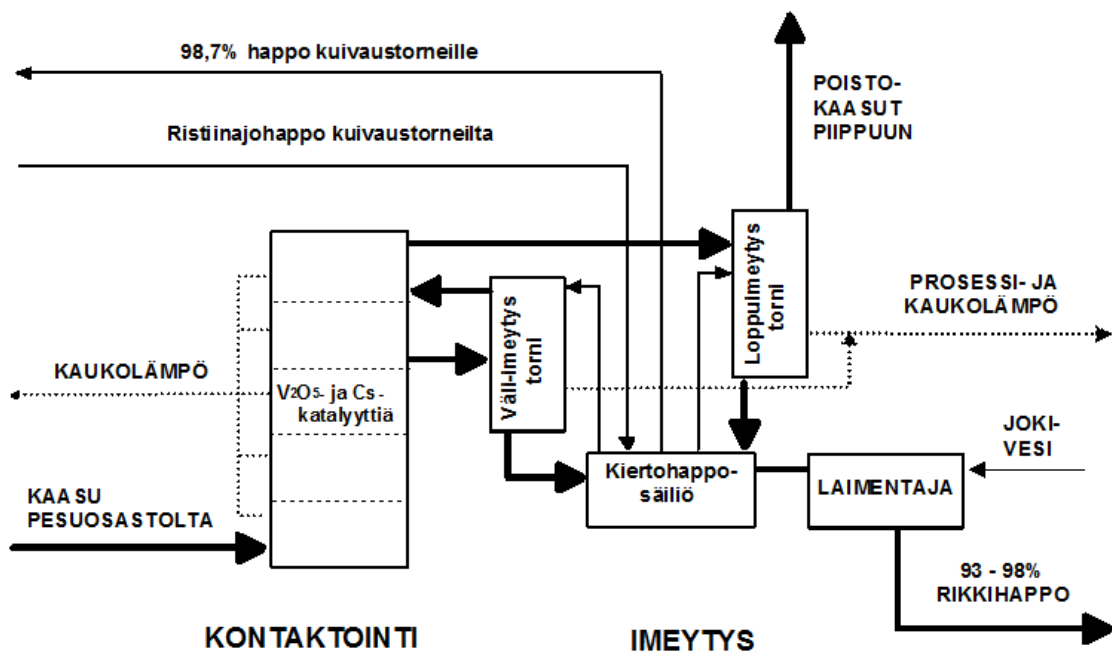
Pesutorneja on pesuosastolla kolme. Kuvasta 21 poiketen RHT7:n kaasun esipuhdistus tapahtuu vasta kolmannen pesutornin jälkeen, ennen jälkipuhdistusta. Lisäksi kaasun kuivaus tapahtuu kuvasta poiketen yhdessä kuivaustornissa.

Ensimmäisen pesutornin tehtävä on sekä jäähdyttää että puhdistaa sulatolta saapuva poistokaasu. Kaasun lämpötila ennen ensimmäistä pesutornia on n. 280-350 °C ja sen jälkeen n. 70-75 °C. Pesutorneihin syötetään vastavirtaperiaatteella rikkihappoa, jonka väkevyys ensimmäisessä pesutornissa on n. 20-30 %. Sulatolta saapuva kuuma poistokaasu luovuttaa lämpöä viileämmälle pesuliukselle. Lisäksi pesuliuos sitoo suurimman osan poistokaasuissa olevista epäpuhtauksista.

Toiseen pesutorniin syötettävän pesuliuoksen väkevyys on ensimmäistä pesutornia alhaisempi, noin 2-15 %. Sen tehtävä on edelleen jäähdyttää ensimmäiseltä pesutornilta saava kaasu n. 40 °C:een. Kaasua jäähdytetään edelleen, jotta sen vesihöyrypitoisuus laskee ja jotta kaikki kontaktimyrkyt kondensoituvat.

Kolmannen pesutornin päätehtävä on halogeenivetyhappojen pesu. Myöskin kaasun jäähdytminen jatkuu. Kolmanteen pesutorniin lisätään pesuliuoksen väkevöitymisen estämiseksi vettä. Vastaava määrä pesuliuosta siirretään toisen pesutornin kiertoon. Kolmannen pesutornin jälkeen kaasulle suoritetaan sähköinen esi- ja jälkipuhdistus. Jälkipuhdistuksen jälkeen kaasu sisältää enää pääasiassa rikkidioksidia sekä typpeä.

Kaasun pesun jälkeen se kuivataan. Kuten todettu, kuvasta 21 poiketen RHT7:n kuivausosasto koostuu vain yhdestä kuivaustornista. Kuivaustornissa kiertää väkevyydeltään noin 97 % rikkihappoliuos. Kaasun kosteus imeytyy kiertävään rikkihappoliuokseen. Kiertohappoliuoksen väkevyyden säilyttämiseksi siihen lisätään vahvaa rikkihappoa väliimeytystornilta. Kuivauksen jälkeen kaasu puhalletaan pääkaasupuhaltimella kontaktointiin. Kontaktointi ja imeytys on esitetty kuvassa 22.



*Kuva 22. Kaasun kontaktointi ja imeytys. [27]*

Kontaktoinnissa rikkidioksidi hapetetaan rikkitrioksidiksi. Kontaktiapaaraatissa käytetään prosessin nopeuttamiseksi katalyyttejä. Prosessi on eksoterminen, eli energiaa vapauttava. Tässä tapauksessa energia vapautuu lämpönä, jota käytetään hyväksi niin prosessissa itsessään kuin kaukolämpönä.

Kontaktoinnissa syntynyt rikkiatrioksidi imeytetään väli- ja loppuimeytystorneissa 98,7 %:seen rikkihappoon. Rikkiatrioksidi reagoi imeytyshapossa olevan veden kanssa muodostaen rikkihappoa. Imeytyksessä käytettävää rikkihappoa onkin laimennettava joko vedellä tai laimeammalla rikkihapolla. Imeytyksessä syntyy myös lämpöä, joka käytetään kontaktoinnissa syntyneen lämpöenergian tavoin joko prosessissa sisäisesti tai kaukolämpönä. Lopuksi syntynyt rikkihappo laimennetaan haluttuun väkevyyteen ja varastoidaan varastosäiliöihin. [27]

Suorituskyvyn arviointiin toteutetulla työkalulla valittiin kaikki RHT7:n säätöpiirit, jotka sisältävät yhden tai useamman PID-säätimen. Lisäksi vaatimuksena oli, että suorituskyvyn arviointiin tarvittavat signaalit löytyvät historiatietokannasta. Vaatimukset täyttäviä piirejä löytyi yhteensä 91 kappaletta.

## 4.2 Tulokset

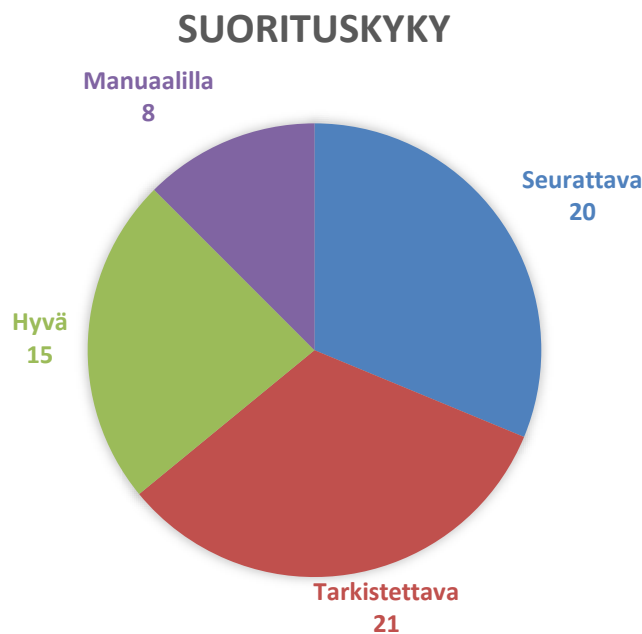
Työkalun suunnittelussa ja testauksessa käytettiin eri pituisia tarkastelujaksoja ja näytteenottovälejä, jotta laskennan tulokset saatiin skaalattua mahdollisimman edustaviksi vaihtelevista tarkasteluajoista huolimatta. Tässä työssä esiteltävät tulokset on laskettu yhden päivän mittaiselta tarkastelujaksolta 10 sekunnin näytteenottovälillä. Työhön valittu 10 sekunnin näytteenottoväli valittiin siitä syystä, että se takaa laskennoille parhaan mahdollisen tarkkuuden. Tarkastelujakso valittiin päivän mittaiseksi, jotta tiedonsiirtoon ja käsittelyyn kuluva aika historiatietokannan ja Wedgen välillä pysyy kohtuullisena. Valitut tarkasteluajat vastaavat siis todennäköisesti parhaiten niitä valintoja, joita työkalulla tullaan myös tulevaisuudessa käyttämään. Tarkastelujaksoksi valittiin sellainen päivä, jolloin RHT7 on normaalissa tuotannossa.

Tarkasteluun valitut 91 säätöpiiriä käytiin läpi prosessihenkilökunnan kanssa. Tarkastelussa selvisi, että osa piireistä on syytä jättää pois tarkastelusta. Suurin osa pois rajatuista säätöpiireistä ovat ns. rajoitussäätimiä, joiden tarkoitus on pitää tarkasteltava suure tietyn rajan ylä- tai alapuolella. Esimerkiksi moottorin kierroslukua voidaan rajoittaa, jos sen lämpötila nousee yli määritetyn rajan. Tällöin kyseisen säätöpiirin asetusarvo on lämpötilalle asetettu raja-arvo. Normaalitilanteessa asetusarvoa ei siis pyritä saavuttamaan, vaan säätöpiiri on niin sanotusti passiivitulassa. Säätöpiiri aktivoituu, kun mitattu lämpötila ylittää asetusarvon. Tällaisten säätimien suorituskykyä ei voida mitata tässä työssä esitetyin perustein. Rajoitussäätimien lisäksi tarkastelusta poistettiin mm. sellaisia säätöpiirejä, jotka eivät ole enää käytössä, mutta joita ei ole myöskään kokonaan järjestelmästä poistettu. Tällaisten säätöpiirien historiatietokantaan tallennetuista signaaleista ei voida päätellä onko säätöpiiri käytössä vai ei. Signaalit vastaavat käytössä olevan säätöpiirin signaaleja, mutta todellisuudessa ainakin ohjaussignaali on automaatiojärjestelmässä erotettu toimilaitteesta.

Prosessihenkilökunnan kanssa tehdyn tarkastelun jälkeen valituista 91 säätöpiiristä jäi jäljelle 64. Tarkasteluun sopimattomien säätöpiirien karsinta on tärkeää, koska suuri osa

poistetuista piireistä luokiteltiin analyysissä sellaisiksi, joiden suorituskyky vaatii tarkastusta. Poistamalla analyysiin sopimattomat säätöpiirit saadaan suorituskykytyökalun käyttäjän huomio ja aika keskittymään paremmin oikeisiin ongelmiin. Tärkeä huomio on myös se, että jo suorituskykytyökalun käyttöönotossa vaaditaan prosessituntemusta. Automaattinen säätöpiirien haku suorituskykytyökaluun tuo mukanaan myös sellaisia säätöpiirejä, joiden suorituskykyä ei voida ja joita ei ole syytä toteutetuin keinoin arvioida.

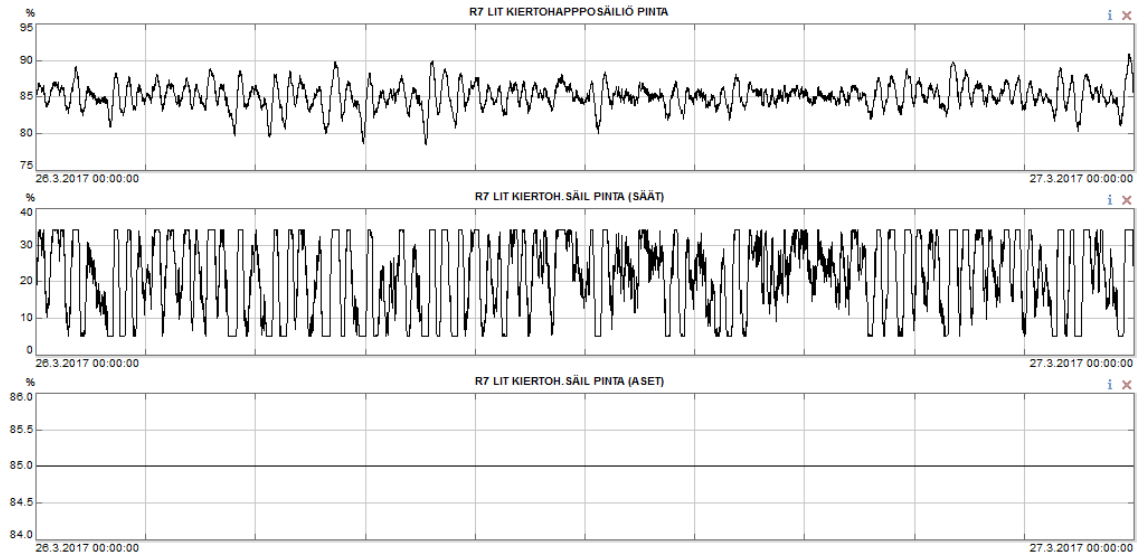
Tarkastelemalla RHT7:n säätöpiirejä valituilla tarkasteluajoilla, jakautuvat säätöpiirit suorituskykyasteikolla kuvan 23 esittämällä tavalla.



**Kuva 23.** Suorituskyvyn jakautuminen RHT7:ssä.

Suorituskykyanalyysin tulokset käytiin läpi prosessihenkilökunnan kanssa. Kaikkien tarkasteltujen säätöpiirien läpikäyminen tässä työssä ei ole perusteltua. Tarkastellaan sen sijaan joitakin eri suorituskykykategoriaan luokiteltuja säätöpiirejä, jotta saadaan käsitys siitä, minkälaiset ongelmat suorituskykyanalyysin pohjalta on havaittavissa. Tarkastellaan myös sitä, miten luotettavana suorituskykyanalyysin tuloksia voidaan pitää tarkastelemalla säätöpiirien signaaleja myös manuaalisesti.

Tarkistettavaksi määriteltyjen säätöpiirien joukosta löytyy muun muassa loppuimeytystornin kiertohapposäiliön pinnankorkeuden säätö. Kyseisen säätöpiirin mittaus-, ohjaus- ja asetusarvosignaalit on esitetty kuvassa 24.



**Kuva 24.** Loppuimeytystornin kiertohapposäiliön pinnankorkeuden säätö.

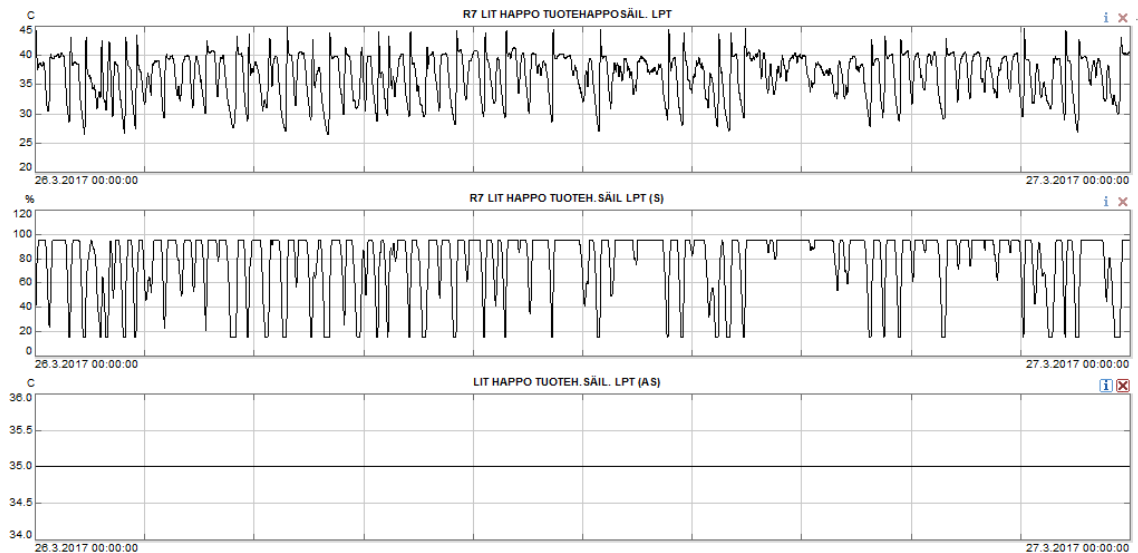
Säätöpiiri on luokiteltu tarkistettavaksi, koska mittaussignaaliissa esiintyy jaksollista värähtelyä, jonka jaksonaika on 19 minuuttia ja koska ohjauksen vaihtelu ylittää sille asetetun raja-arvon. Keskimääräinen säätövirhe sen sijaan on vain 1.5% asetusravon keskiarvosta.

Ohjaussignaalista huomataan, että ohjaus on rajoitettu välille 5-34%. Koska suorituskykyökalun käytössä ei ole säätöpiirikohtaisia ohjausrajoja, ei ohjauksen saturoitumista huomata pelkästään tuloksia tarkastelemalla. Ohjausta rajoittamalla on todennäköisesti pyritty vähentämään toimilaitteen rasitusta. Kyseisen säätöpiirin ohjaus vaikuttaa taajuusmuuttajan kautta pumppua pyörittävän moottorin pyörimisnopeuteen. Voimakkaasti vaihteleva ohjaus kasvattaa energian kulutusta ja voi vahingoittaa sekä moottoria että pumppua. Värähtely aiheuttaa ongelmia myös muiden poistolinjassa olevien säätöpiirien suorituskykyyn.

Loppuimeytystornin kiertohapposäiliön pinnankorkeuden säädölle toteutetulla suorituskykyökalulla saadut tulokset osoittautuivat prosessihenkilökunnan kanssa tehdyn tarkastelun perusteella luotettaviksi. Siitä huolimatta, että saturaatiotarkastelussa ei kyetä havaitsemaan ohjauksen saturoitumista, muut signaalien ominaisuudet paljastavat säätöpiirin suorituskyvyssä olevan ongelmia. Ongelmaa voitaisiin lähteä ratkaisemaan tarkastelemalla onko pinnankorkeudelle mahdollista määrittää kiinteän asetusravon sijasta vaihteluväli tai voitaisiinko säätimen virityksellä parantaa suorituskykyä.

Osa loppuimeytystornin kiertohapposäiliön poistovirtauksesta ohjataan lämmönvaihtimen kautta tuotehapposäiliöön. Tuotehapposäiliöön virtaavan hapon lämpötilaa pyritään säätämään muuttamalla lämmönvaihtimessa kiertävän jäähdytysveden virtausta. Hapon lämpötilan säätö on myös luokiteltu tarkistettavaksi. Kyseisen säätöpiirin signaalit on esitetty kuvassa 25.





**Kuva 25.** Hapon lämpötilasäätö.

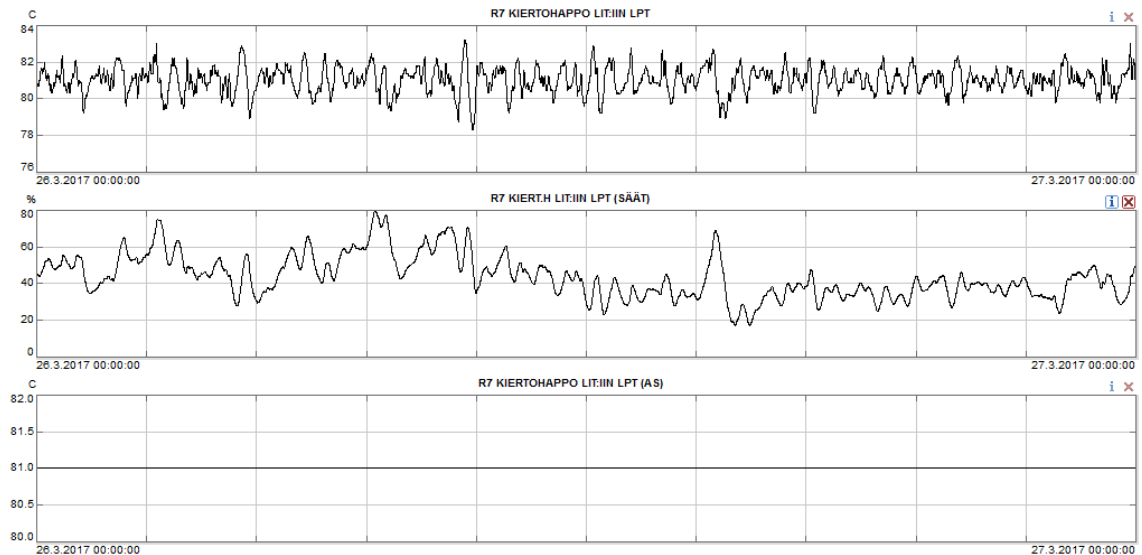
Kyseinen säätöpiiri on luokiteltu tarkistettavaksi, koska mittaussignaali sisältää jaksollista värähtelyä 19 minuutin jaksonajalla, ohjauksen vaihtelu ylittää sille asetetun raja-arvon ja keskimääräinen säätövirhe on 10% asetusarvon keskiarvosta.

Koska lämmönvaihtimen läpi kulkevan hapon määrä on suhteessa edellisen esimerkin moottorin pyörimisnopeuteen, vaihtelee se myös runsaasti. Hapon virtauksen ollessa alhaisempi, kyetään pienemmällä jäähdytysveden määrällä jäähdyttämään happo tavoitelämpötilaan ja päinvastoin. Lajittelemalla säätöpiirit oskilloinnin taajuuden mukaan, huomataan lämpötilasäädön oskilloivan samalla taajuudella kuin kierto-happosäiliön pinnan korkeuden säätö.

Mittaussignaalista huomataan myös, että jäähdytystarpeen kasvaessa esiintyy lyhyitä ajanjaksoja, jolloin hapon lämpötila on huomattavasti asetusarvoa suurempi. Tämä johtuu muun muassa siitä, että hapon lämpötila mitataan lämmönvaihtimen jälkeen, jolloin muuttunut jäähdytystarve huomataan viiveellä sekä siitä, että lämmönvaihtimen dynamiikka rajoittaa lämpötilan muutosnopeutta.

Lämpötilasäädön ohjaus on rajoitettu välille 15-95%. Tästä syystä saturaatiotarkastelussa ei havaita ohjauksen saturoitumista. Kuten aikaisemmassa esimerkissä, säätöpiirin suorituskyvyn ongelmat saadaan selville muita ominaisuuksia tarkastelemalla. Suorituskykyanalyysin tuloksia voidaan tässäkin tapauksessa pitää luotettavana ja kyseisen säätöpiirin toimintaan tulisi perehtyä tarkemmin.

Seurattavaksi luokiteltujen säätöpiirien joukossa on muun muassa loppuimeytystorniin virtaavan hapon lämpötilasäätö. Kyseisen säätöpiirin signaalit on esitetty kuvassa 26.

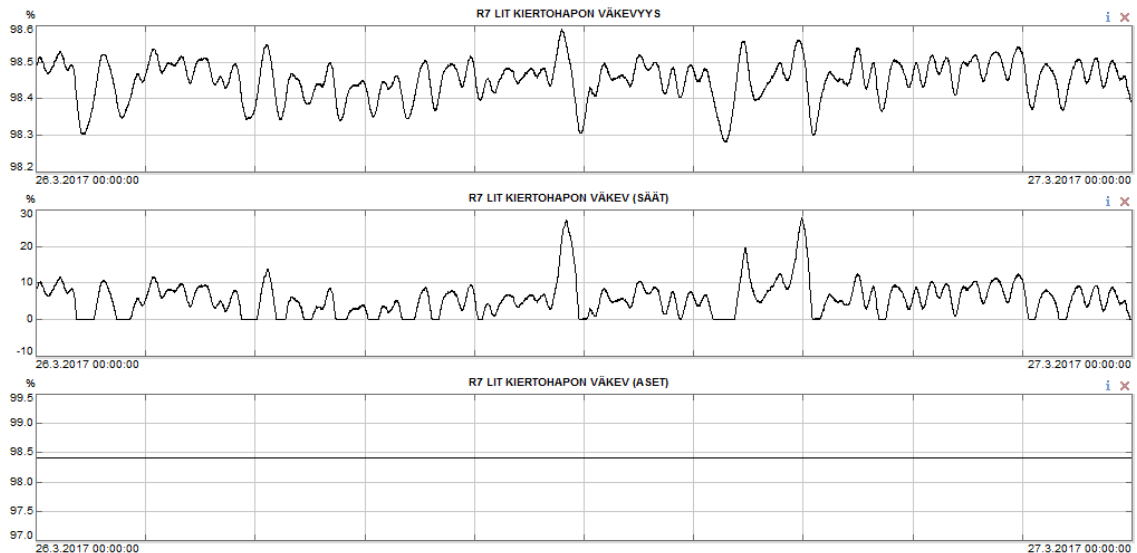


**Kuva 26.** Hapon lämpötila loppuimeytystorniin.

Kyseinen säätöpiiri on luokiteltu seurattavaksi, koska mittaussignaali sisältää vaimeaa jaksollista värähtelyä, jonka jaksonaika on 31 minuuttia. Keskimääräinen säätövirhe on 0.68% asetusarvosta. Ohjaussignaali käyttäytyy rauhallisesti eikä se saturoidu ylä- eikä alarajalleen koko tarkastelujaksolla.

Tässäkin tapauksessa suorituskykyanalyysin tulos koettiin luotettavaksi. Säätöpiirin toiminta on huomattavasti parempi kuin tarkistettavaksi luokitelluissa säätöpiireissä. Kuitenkin jaksollinen värähtely mittaussignaaliassa luo tarpeen seurata säätöpiirin toimintaa.

Suorituskyvyltään hyvin toimivaksi säätöpiiriksi on luokiteltu muun muassa loppuimeytystorniin pumpattavan kiertohapon väkevyyden säätö. Väkevyyttä mitataan loppuimeytystornin kiertohapposäiliön poistolinjasta ja väkevyyttä säädetään lisäämällä tarvittaessa kiertohapposäiliöön laimennusvettä. Kyseisen säätöpiirin signaalit on esitetty kuvassa 27.



**Kuva 27.** Kiertohapon väkevyys loppuimeytystorniin.

Tehdyn suorituskykyanalyysin pohjalta kyseisestä säätöpiiristä löytynyt jaksollinen värähtely on amplitudiltaan n. 0.006% asetusarvosta, joten se luokitellaan merkityksettömäksi. Ohjauksessa ei havaittu liiallista vaihtelua ja keskimääräinen säätövirhe tarkasteluvälillä on 0.066% asetusarvosta. Säätöpiirin suorituskyky voidaan siis tarkasteltavien ominaisuuksien näkökulmasta luokitella hyvin toimivaksi. Saturaatiotarkastelua ja ohjaussignaalia tarkastellessa huomataan kuitenkin, että ohjaus on satureitunut alarajalleen n. 22% tarkasteluvälistä. Kyseisellä säätöpiirillä onkin mahdollisuus vaikuttaa kiertohapon väkevyyteen vain siinä tapauksessa, että kiertohapposäiliöön tuleva happo on väkevämpää kuin sieltä lähtevän hapon väkevyyden asetusarvo. Säätöpiirin suorituskyvyn voidaan todeta vastaavan suorituskykytökalun arviota.

Tietyllä aikavälillä suoritettujen tarkastelujen lisäksi tarkastellaan väli-imeytystorniin syötetävän hapon lämpötilansäätöä. Kyseisessä säätöpiirissä havaittiin ongelmia ennen suorituskykytökalun toteutusta ja siihen tehtiin muutoksia. Tarkastellaan suorituskykytökalun tuloksia kyseiselle säätöpiirille ennen ja jälkeen toteutettuja muutoksia. Säätöpiirin rakenne on kaskadi, jossa alasäätimen avulla säädetään jäähdytysveden virtausta lämmönvaihtimen läpi. Suorituskykytökalun perusnäkyvän tulokset ennen muutoksia on esitetty kuvassa 28.

Piiri	Selitys	Asetusarvon muutokset	Saturaatio (%)	Voimakkaimman värähtelyn jaksonaika (min)	Voimakkaimman värähtelyn amplitudiika.	Tyyppi	Tila	INFO
FI-6744-me	VESI R7 TRIMMERIN JÄLK.		0.0610	8	1.43	Kaskadi: Alasäädin	Tarkistettava	Info
TICA-6739-me	R7 KIERTOHAPPO VIT.IN LPT	0		8	0.0777	Kaskadi: Yläsäädin	Seurattava	Info

**Kuva 28.** Hapon lämpötila väli-imeytystorniin ennen muutoksia.

Tuloksista huomataan, että alasäädin luokitellaan tarkistettavaksi ja yläsäädin seurattavaksi. Alasäätäjän piirikohtainen info on esitetty kuvassa 29.

**Piirikohtainen info** ✕

**Asetusarvon seuranta:**  
Säätöpiirillä on hankaluuksia seurata asetusrvoa. Keskimääräinen säätövirhe 8.3 % asetusrvosta.

**Jaksolliset värähtelyt:**  
Säätöpiirissä voimakasta jaksollista värähtelyä jaksonajalla 8 min.

**Ohjaus:**  
Ohjauksessa voimakasta vaihtelua.

**Kuva 29.** Alasäätimen piirikohtainen info ennen muutoksia.

Perusnäkyvän ja piirikohtaisen infon tuloksista nähdään, että alasäätimen mittaussignaali sisältää tarkasteluvälillä oskilloivan komponentin, jonka jaksonaika on 8 minuuttia ja amplitudi 143% asetusrvosignaalin keskiarvosta. Keskimääräinen säätövirhe on 8.3% asetusrvosta ja ohjaus sisältää voimakasta vaihtelua. Yläsäätimen piirikohtainen info on esitetty kuvassa 30.

**Piirikohtainen info** ✕

**Asetusarvon seuranta:**  
Säätöpiiri seuraa hyvin asetusrvoa. Keskimääräinen säätövirhe 3.8 % asetusrvosta.

**Jaksolliset värähtelyt:**  
Säätöpiirissä jaksollista värähtelyä jaksonajalla 8 min.

**Ohjaus:**  
-

**Kuva 30.** Yläsäätimen piirikohtainen info ennen muutoksia.

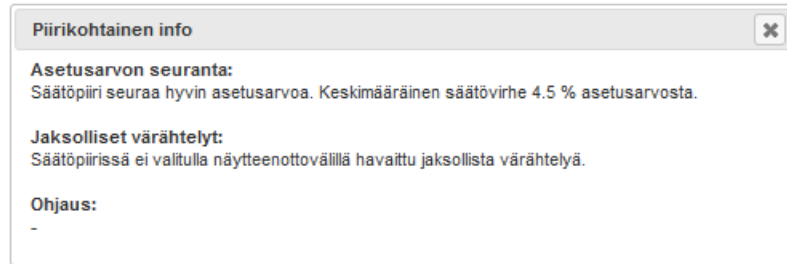
Yläsäätimen mittaussignaali sisältää samalla taajuudella oskilloivan komponentin kuin alasäädin, mutta sen amplitudi on pienempi, noin 7.7% asetusrvon keskiarvosta. Keskimääräinen säätövirhe yläsäätimellä on 3.8% asetusrvosta.

Toteutettujen muutosten jälkeen kyseisten säätöpiirien suorituskyky arvioidaan uudelleen suorituskykyökalun avulla. Perusnäkyvän tulokset muutosten jälkeen on esitetty kuvassa 31.

Piiri	Selitys	Asetusarvon muutokset ^	Saturaatio (%) ^	Voimakkaimman värähtelyn jaksonaika (min) ^	Voimakkaimman värähtelyn amplitudi/ka. ^	Tyyppi ^	Tila v	INFO
TICA-6739.me	R7 KERTOHAPPO VIT-IN LPT	0		23	0.0389	Kaskadi: Yläsäädin	Seurattava	Info!
Fi-6744.me	VESI R7 TRIMMERIN JÄLK		3.18	0	0.00	Kaskadi: Alasäädin	Hyvä	Info!

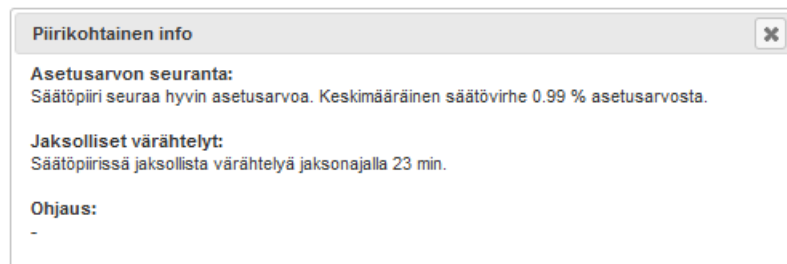
**Kuva 31.** Hapon lämpötila väli-imeytystorniin muutosten jälkeen.

Perusnäkyvästä huomataan, että yläsäädin luokitellaan edelleen seurattavaksi, mutta alasäätimen suorituskyky on muuttunut tarkistettavasta hyväksi. Alasäätimen piirikohtainen info muutosten jälkeen on esitetty kuvassa 32.



**Kuva 32.** Alasäätimen piirikohtainen info muutosten jälkeen.

Piirikohtaisesta infosta sekä perusnäkyvästä huomataan, että muutosten johdosta keskimääräinen säätövirhe on pudonnut 8.3%:sta 4.5%:iin, mittaussignaaleissa ei enää havaittu jaksollista värähtelyä ja ohjauksen vaihtelu ei enää ylitä sille asetettua raja-arvoa. Yläsäätimen piirikohtainen info muutosten jälkeen on esitetty kuvassa 33.



**Kuva 33.** Yläsäätimen piirikohtainen info muutosten jälkeen.

Yläsäätimen piirikohtaisesta infosta huomataan, että keskimääräinen säätövirhe on pudonnut 3.8%:sta 0.99%:iin. Yläsäätimen mittaussignaali sisältää edelleen oskilloivan komponentin, mutta sen amplitudi on laskenut noin 7.7%:sta noin 3.9%:iin mittaussignaalin keskiarvosta. Säätöpiirin suorituskyky on siis tehdyn tarkastelun ja toteutetun suorituskykyökalun mukaan parantunut merkittävästi.

Suorituskykyökalun tulokset myös muille säätöpiireille käytiin prosessihenkilökunnan kanssa läpi. Tulokset todettiin luotettaviksi ja suorituskykyanalyysin pohjalta löydettiin useita kohteita, joissa säätöpiirien suorituskyky on heikko ja joihin tulisi kiinnittää huomiota. Suorituskyvyn arvioitiin asteikolla: tarkistettava, seurattava, hyvä, koettiin toimivaksi. Tarkisteltavien säätöpiirien jaottelu eri laskennallisten ominaisuuksien perusteella koettiin myös hyödylliseksi. Koska jakoa suorituskyvyn arvioinnissa ei toteutettu säätöpiirikohtaisilla raja-arvoilla, tulee prosessituntemus tulosten tarkastelussa vahvasti esille.

Rikkihappotehtaan toimintaan aiheutuu voimakasta jaksollista värähtelyä, koska konverttereilta käsiteltäväksi tuleva kaasukuorma vaihtelee. Voimakas värähtely kulkeutuu läpi koko prosessin, joka näkyy voimakkaana jaksollisena värähtelynä, jonka jaksonaika on n. 20-30 minuuttia. Tästä syystä mahdollisesti muiden värähtelevien komponenttien erottaminen ja huomioiminen mittaussignaalista on hankalaa.

Käsittelyyn valitun rikkihappotehtaan lämpötilojen hallinnassa tiedettiin olevan ongelmia ja kyseinen huomio on selkeästi nähtävissä myös toteutetun suorituskykytyökalun tuloksista. Tiedossa olevien ongelmien lisäksi suorituskykytyökalun tuloksista oli myös havaittavissa kohteita, joiden suorituskyvyssä ei yleisesti tiedostettu olevan ongelmia. Suorituskykytyökalulla kyettiin myös havaitsemaan suorituskyvyn kehitys kohteessa, jossa oli havaittu ongelmia ja jonka toimintaa oli kehitetty.

### 4.3 Jatkokehityskohteet

Työtä tehdessä kohdattiin useita säätöpiirien suorituskyvyn arviointiin vaikuttavia haasteita. Yksi suurimmista haasteista suuren kokonaisuuden suorituskyvyn tarkastelussa on konfigurointiparametrien määrän säilyttäminen alhaisena. Säätöpiirien suuri määrä ja konfigurointiparametrien määrän rajoitus pakottavat käytännössä käyttämään samoja rajoja kaikille säätöpiireille. Työkalua kehitettäessä tulisi luoda käyttäjälle mahdollisuus muuttaa rajoja säätöpiirikohtaisesti. Tällöin suorituskyvyn arvioinnista tulee tarkempaa ja tuotannon kannalta kriittisimpien säätöpiirien toiminnalle voidaan asettaa tiukemmat rajat. Tällöin myös työkalu kehittyy käytettäessä ja tulosten tulkinta vähemmällä prosessituntemuksella helpottuu.

Toinen merkittävä haaste työtä tehdessä oli Wedgen ja historiatietokannan tiedonsiirron ja -käsittelyn hitaus. Käsiteltävien säätöpiirien määrän ollessa suuri, tiedonsiirtoon kuluva aika rajoittaa toteutetun suorituskykytyökalun käytettävyyttä. Osittain tästä syystä tätä työtä tehdessä tyydyttiin käyttämään minimissään 10 sekunnin näytteenottoväliä. Näytteenottoväli olisi mahdollista muuttaa nykyiselläkin toteutuksella jopa 1 sekuntiin, mutta tällöin suorituskykyanalyysin käyttö suurelle määrälle säätöpiirejä ei olisi nykyisellä toteutuksella mahdollista. Jos suorituskykytyökalun avulla halutaan päästä vielä tarkempiin lopputuloksiin ja tarkastella laajempaa taajuuskaistaa, tulee myös tiedonsiirtoa ja -käsittelyä kehittää vastaamaan paremmin tarpeita.

Automaatiojärjestelmästä saatavaa dataa voitaisiin käyttää tehokkaasti säätöpiirien suorituskyvyn arvioinnissa ja tulosten tarkastelussa. Hakemalla data suoraan automaatiojärjestelmästä esimerkiksi OPC-liittynän avulla, saataisiin käyttöön paljon enemmän tietoa säätöpiiristä ja sen toiminnasta. Tällä tavoin saataisiin selville esimerkiksi säätöpiirikohdaiset ohjausrajat, säätimien viritysparametrit ja se, mistä säädin saa asetusarvonsa. OPC-liittynän kautta saatava data voitaisiin tallentaa omalle palvelimelle pakkaamattomana tietyltä aikaväliltä, jolloin se olisi suorituskykytyökalun käytettävissä.

Mielenkiintoista olisi myös tutkia syitä, jotka aiheuttavat säätöpiirin heikon suorituskyvyn. Tällä tavoin suorituskykytarkastelun pohjalta kyettäisiin antamaan käyttäjälle vihjeitä siitä, mistä heikko suorituskyky aiheutuu. Syyn etsintä vaatisi kuitenkin huomattavasti enemmän tietoa tarkasteltavasta prosessista.

Tulosten tarkastelua helpottaisi myös säätöpiirien loogisempi nimeäminen. Tällä hetkellä käytössä oleva säätöpiirien nimeämiskäytäntö ei mahdollista automaattista säätöpiirien lajittelua. Esimerkiksi kaskadisäätöä tarkastellessa olisi hyödyllistä, jos ala- ja yläsäätimet voitaisiin linkittää toisiinsa nimen perusteella. Yhtenäinen nimeämiskäytäntö helpottaisi myös järjestelmän hahmottamista ja vianetsintää.

## 5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli toteuttaa työkalu, jonka avulla voidaan tarkastella säätöpiirien suorituskykyä. Suorituskykyanalyysi tuli kyetä tekemään suurelle määrälle säätöpiirejä häiritsemättä prosessia. Lisäksi tavoitteena oli, että suorituskykytyökalun käyttöönotto ja käyttö vaatisivat mahdollisimman vähän prosessituntemusta ja parametrisointia. Toteutetun suorituskykytyökalun avulla tulisi olla mahdollista havaita heikosti toimivat säätöpiirit suuresta kokonaisuudesta, jotta kunnossapitotoimenpiteet ja kehitys osataan kohdistaa oikein.

Työn lähtökohtana oli, että suorituskykyanalyysi toteutetaan osaksi kohdeyrityksellä käytössä olevaa Wedge prosessidiagnostiikkajärjestelmää. Kokonaan uuden ohjelmiston toteuttaminen kasvaisi niin suureksi projektiksi, ettei sitä tämän työn puitteissa voitu pitää vaihtoehtona. Wedgen käyttö suorituskykytyökalun pohjana loi omat rajoitteensa toteutukseen. Suorituskykytyökalun käyttöön rajoittuivat signaalit, jotka tallennetaan historiatietokantaan ja ovat sen kautta käytettävissä. Säätöpiirikohtaisista signaaleista historiatietokantaan tallennetaan yleisesti mittaus-, asetusarvo-, ohjaus- ja tilasignaalit.

Todellisesta järjestelmästä saatavat signaalit on A/D-muunnettu ja pakattu ennen tallentamista historiatietokantaan. Kyseiset toimenpiteet muokkaavat signaaleja niin, etteivät historiatietokannasta saatavat laskennassa käytettävät signaalit vastaa täysin alkuperäisiä signaaleja.

Todettujen rajoitteiden puitteissa tuli selvittää, miten suorituskykyä voidaan arvioida ja mitkä tunnusluvut kuvaavat suorituskykyä. Tämän lisäksi tuli selvittää, miten jaksolliset värähtelyt voidaan havaita ja miten suorituskykytyökalun tulokset voidaan esittää selkeästi.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen ja historiatietokantaan tallennettujen signaalien avulla toteutettujen laskentojen perusteella säätöpiirin suorituskyvyn tarkastelussa päädyttiin tarkastelemaan seuraavia ominaisuuksia:

- Tilastolliset ominaisuudet
- Asetusarvon seuranta
- Asetusarvon muutokset
- Oskillointi
- Ohjauksen saturoituminen
- Ohjauksen muutokset
- Säätimen tila



Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi säätöpiirit jaoteltiin sekä säätörakenteen että sille lasketun suorituskykyarvion perusteella eri luokkiin.

Suorituskykylaskennat esitetään HTML-dokumenttina yksinkertaisessa taulukossa. Taulukossa on mahdollista tarkastella säätöpiirikohtaisten laskentojen tuloksia ja vertailla niitä muiden säätöpiirien kanssa. Taulukossa esitetään myös sanallinen arvio säätöpiirin suorituskyvystä asteikolla: tarkistettava, seurattava, hyvä. Säätöpiirikohtaisessa info-ikkunassa esitetään syyt säätöpiirin suorituskykyarviolle.

Säätöpiirien suorituskykytyökalua testattiin yhdellä Boliden Harjavallan rikkihappotehtaista. Suorituskykytyökalun tulokset käytiin läpi prosessihenkilökunnan kanssa ja ne todettiin luotettaviksi. Tehdyn tarkastelun perusteella löytyi useita suorituskyvyltään heikkoja säätöpiirejä, joiden toiminta ja toteutus tulisi tarkistaa. Suorituskykyanalyysi toteutettiin myös säätöpiirille, jossa oli aiemmin todettu olevan ongelmia ja jonka toimintaa oli pyritty kehittämään. Suorituskykyanalyysin tulosten pohjalta kyseinen säätöpiiri luokiteltiin ennen kehitystoimenpiteitä luokkaan tarkistettava/seurattava ja kehitystoimenpiteiden jälkeen luokkaan seurattava/hyvä. Säätöpiirin suorituskyvyn ongelmat ja kehitys ovat siis nähtävissä suorituskykytyökalun tuloksista.

Toteutettu säätöpiirien suorituskykytyökalu vastaa hyvin työn alussa sille asetettuihin vaatimuksiin. Sen avulla kyetään havaitsemaan suuresta määrästä säätöpiirejä sellaiset, joiden toimintaan tulisi kiinnittää huomiota. Työkalun käyttöönotto ei vaadi säätöpiirikohtaista parametrisointia eikä sen käyttö häiritse prosessia. Kaikkien historiatietokantaan tallennettujen säätöpiirien automaattinen valinta suorituskykytyökalun käyttöön osoittautui hankalaksi. Suorituskykytyökalun käyttöönottoa ja tulosten luotettavuutta parantaa tarkasteltavaksi valittavien säätöpiirien läpikäynti prosessin tuntevan henkilökunnan kanssa.

## LÄHTEET

- [1] Siemens, Control Performance Monitoring (CPM) for monitoring Control Loops, 2008. Saatavilla: <https://support.industry.com/cs/document/32486166>. [Viitattu 16.6.2017].
- [2] Metso, ExperTune PlantTriage, 2013, 6 p. Saatavilla: <http://www.metso.com/services/planttrriage>. [Viitattu 16.6.2017].
- [3] Control Performance Monitor (CPM) Lite, Honeywell, 2013, pp. 2. Saatavilla: <https://qwww.honeywellprocess.com/library/marketing/notes/Control-Performance-Monitor-Lite-PIN.pdf>. [Viitattu 16.6.2017].
- [4] T. Hägglund, A control-loop performance monitor, Control Engineering Practice, Vol. 3, Iss. 11, 1995, pp. 1543-1551.
- [5] N.F. Thornhill, T. Hägglund, Detection and diagnosis of oscillation in control loops, Control Engineering Practice, Vol. 5, Iss. 10, 1997, pp. 1343-1354.
- [6] N.F. Thornhill, B. Huang, H. Zhang, Detection of multiple oscillations in control loops, Journal of Process Control, Vol. 13, Iss. 1, 2003, pp. 91-100.
- [7] M. Jelali, B. Huang, Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops: State of the Art and Advanced Methods, Springer, London, 2014, 390 p.
- [8] S. Karra, M.N. Karim, Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillatory control loops, Control Engineering Practice, Vol. 17, Iss. 8, 2009, pp. 939-956.
- [9] R. Srinivasan, R. Rengaswamy, R. Miller, A modified empirical mode decomposition (EMD) process for oscillation characterization in control loops, Control Engineering Practice, Vol. 15, Iss. 9, 2007, pp. 1135-1148.
- [10] B. Srinivasan, R. Rengaswamy, Automatic oscillation detection and characterization in closed-loop systems, Control Engineering Practice, Vol. 20, Iss. 8, 2012, pp. 733.

- [11] X. Li, J. Wang, B. Huang, S. Lu, The DCT-based oscillation detection method for a single time series, *Journal of Process Control*, Vol. 20, Iss. 5, 2010, pp. 609-617.
- [12] J. Wang, B. Huang, S. Lu, Improved DCT-based method for on-line detection of oscillations in univariate time series, *Control Engineering Practice*, Vol. 21, Iss. 5, 2013, pp. 622-630.
- [13] M. Bauer, A. Horch, L. Xie, M. Jelali, N. Thornhill, The current state of control loop performance monitoring – A survey of application in industry, *Journal of Process Control*, Vol. 38, 2016, pp. 1-10.
- [14] K.J. Åström, R.M. Murrey, *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*, illustrated. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2009, 387 p.
- [15] J.P. Bentley, *Principles of measurement systems*, 4th ed ed. Pearson Prentice-Hall, Harlow, 2005, 528 p.
- [16] L. Desborough, R. Miller, Increasing Customer Value of Industrial Control Performance Monitoring - Honeywell's Experience, *Neurocomputing*, Vol. 74, Iss. 4, 2011, pp. 588-597.
- [17] S.W. Sung, *Process identification and PID control*, IEEE, 2009, 109-197 p.
- [18] Metso, Metso DNA käyttöohje, Boliden Intranet. Vain sisäisessä käytössä. [Viitattu 19.6.2017].
- [19] M.A. A. Shoukat Choudhury, S.L. Shah, N.F. Thornhill, *Diagnosis of Process Nonlinearities and Valve Stiction*, illustrated. Springer Verlag, DE, 2008, 304 p.
- [20] K. Jokinen, *Rikkihappotehtaiden kuorman muutosten hallinta*, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2012, 1-2 p.
- [21] D.E. Seborg, *Process dynamics and control*, John Wiley & Sons, Hoboken, N.J., 2011, 1-505 p.
- [22] O. Aumala, *Mittaussignaalien käsittely*, Insinööritieto, Helsinki, 1981, 399 p.
- [23] Gonzalo R. Arce, *Nonlinear Signal Processing*, John Wiley & Sons, Incorporated, Hoboken, 2005, 1-459 p.

[24] J.G. Proakis, D.G. Manolakis, Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, Prentice Hall, 1996, 614-725 p.

[25] Z.K. Peng, P.W. Tse, F.L. Chu, An improved Hilbert–Huang transform and its application in vibration signal analysis, Journal of Sound and Vibration, Vol. 286, Iss. 1–2, 2005, pp. 187-205.

[26] Control Station Inc., PlantESP, Saatavilla: <http://controlstation.com/control-loop-performance-monitoring/>. [Viitattu 16.6.2017].

[27] Forsèn Maria, P. Österman, Boliden Harjavalta Oy:n tuotantoprosessit. Osa 4. Nikkeliliekkisulatusuuni, sähköuuni ja rakeistus, kuonarikastamo, rikkihappotehtaat. Outokumpu Technology Research Center, 2006, 17-20 p.