



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Säätömenetelmien suunnittelu ja toteutus lämmitysprosessiin

Konsta Simonen

Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö

Lokakuu 2022

TIIVISTELMÄ

Säätömenetelmien suunnittelu ja toteutus lämmitysprosessiin

Konsta Simonen

Oulun yliopisto, Prosessitekniiikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2022, 81 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: professori Mika Ruusunen ja dosentti, yliopistonlehtori Aki Sorsa

Diplomityön tavoitteena oli kehittää ja tutkia säätömenetelmiä itsenäiseen, ja avoimen lähdekoodin ratkaisuja käyttävään säätöjärjestelmään. Tarkasteltaviksi säätömenetelmiksi valittiin perinteinen PID-säätö, sumea säätö ja mallipohjainen säätö. Työn tavoitteena oli myös toteuttaa ensimmäinen versio järjestelmästä. Työn kirjallisuusosa sisältää esittelyn ylätasoon ja säätöjärjestelmiin liittyvistä käsitteistä ja periaatteista. Teollisuudessa yleisien hajautettujen ohjausjärjestelmien rakenne ja ylätasoon optimoinnin merkitys automaatioissa on sisällytetty kirjallisuusosaan lyhyesti. Kirjallisuusosassa esitellään myös kokeellisessa osiossa toteutetut säätömenetelmät, sekä etsittiin niiltä vaadittavia ominaisuuksia skaalautuvuuden ja joustavuuden mahdollistamiseksi.

Säätömenetelmien suorituskykyä arvioitiin testausympäristössä toteutetuissa säätötesteissä. Järjestelmä toimi testeissä hyvin, ja jatkokehityksen jälkeen sen siirtämistä tuotantoon voidaan suunnitella. Kolmen toimi- ja mittalaitteen prosessissa testausympäristön lämmitysvastusten tuottama ristikkäisvaikutus vaikuttaa takaisinkytkettyjen säätimien toimintaan. Mallipohjaisen säätimen sisältämä järjestelmän dynamiikkaa kuvaava malli mahdollistaa ristikkäisvaikutusten huomioimisen yksinkertaisella tavalla, joka ilmenee muita säätömenetelmiä pienempinä ylityksinä. Säätömenetelmien vertailuluku kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä PI-säätimellä keskineliövirhe oli $188,56\text{ }^{\circ}\text{C}^2$, sumealla PI-säätimellä keskineliövirhe oli $170,24\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ ja mallipohjaisella säätimellä keskineliövirhe oli $166,37\text{ }^{\circ}\text{C}^2$.

Asiasanat: Säätöjärjestelmä, sumea säätö, malliprediktiivinen säätö, lämpötilan säätö

ABSTRACT

Design of control methods and implementation in the heating process

Konsta Simonen

University of Oulu, Degree Programme in Process Engineering

Master's thesis 2022, 81 pp.

Supervisors at the university: Professor Mika Ruusunen and Docent, University lecturer Aki Sorsa

The goal of this master's thesis was to develop and study control methods for independent control system that uses open source solutions. The control methods studied were traditional PID control, fuzzy control and model predictive control. Another goal was also to implement the first version of this control system. In theory part of the thesis, concepts and principles related to advanced process control and controls systems are reviewed. The structure of distributed control systems common in industry and the importance of upper-level optimization related to process automation are briefly discussed in the theory. Required characteristics of the control methods and control system were examined to enable scalability and flexibility. Also, theory of the control methods implemented in experimental part of the thesis are included.

The performance of the developed control methods was evaluated in the testing process. The control system performed successfully in the tests and after further development it can be planned to be used in production. In the process of three controlled and manipulated variables, the coupling effect related to the heating resistances of the testing environment affects the operation of the feedback controllers. The dynamic model used in the model predictive controller enables coupling effects between process variables to be taken into account in a simple way. The model predictive control manifests itself as a smaller overshoot than other tested control methods. The mean squared error values for the control methods in the control test of three controlled and manipulated variables were $188,56 \text{ }^{\circ}\text{C}^2$, $170,24 \text{ }^{\circ}\text{C}^2$ and $166,37 \text{ }^{\circ}\text{C}^2$ for the PI controller, the fuzzy PI controller and the model predictive controller, respectively.

Keywords: Control system, fuzzy control, model predictive control, temperature control

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Stora Ensolle ja toteutettu Elomaticilla vuonna 2022 huhtikuun ja lokakuun välisenä aikana. Työssä kehitettiin erilaisia säätömenetelmiä pääosin ylätason säätöjen toteutukseen tarkoitettuun järjestelmään. Kehitettyjä säätimiä testattiin ja vertailtiin lämmitysprosessissa.

Stora Ensolla työn ohjasi DI Sampo Luukkainen ja DI Marko Harinen. Heitä kiitän työn mahdollistamisesta mielenkiintoisen aiheen parissa. Kiitän heitä myös kiinnostuksesta työn etenemistä ja tuloksia kohtaan sekä opettavaisista työpajoista, joita vietettiin Heinolassa testausympäristön ja säätöjen parissa. Oulun yliopistolla työn ohjasivat professori Mika Ruusunen ja dosentti, yliopistonlehtori Aki Sorsa, joiden useiden palaverien vaatimaa panosta työn ohjaamisessa kiitän ja arvostan suuresti. Kiitos myös Elomaticin DI Ville Ottelin ja DI Mika Puurunen tuesta työn aikana.

Kiitoksen esitän myös opintojen aikana muodostuneille ystäville, joiden ansiosta opiskeluvuosista jäi lukuisia unohtumattomia muistoja. Lopuksi kiitän perhettäni ja erityisesti Reettaa tuesta työn ja opintojeni aikana.

Oulu, 9.10.2022

Konsta Simonen
Konsta Simonen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	8
2 Ylätason säätö	9
2.1 Säättöjärjestelmä.....	9
2.2 Hajautettu ohjausjärjestelmä	11
2.3 Periaatteet	12
2.4 Ylätason optimointi	13
3 Säädön skaalautuvuus	16
3.1 Säättömenetelmien monistaminen	16
3.2 Parametrisointi.....	17
3.3 Konfigurointi	17
3.4 Teollisuus 4.0	18
3.4.1 Yleistä.....	18
3.4.2 OPC UA	19
3.4.3 Muutos operaattorille	19
4 Työssä sovellettavia menetelmiä.....	21
4.1 PID-säädin	21
4.2 Sumea säätö	24
4.3 Mallipredikttiivinen säätö	27
4.3.1 Perusteet ja käyttö	27
4.3.2 Algoritmi	29
4.3.3 Prosessimalli.....	32
5 Säädinten toteutus	35
5.1 Nykytila	35
5.2 PID-säädin	37
5.3 Sumea PI-säädin	38
5.4 Mallipredikttiivinen säätö.....	42
5.5 Tiedonsiirto ja rajapinnat.....	44

6 Tulokset ja niiden tarkastelu	46
6.1 Testausympäristö	46
6.2 Sääto.	47
6.2.1 Yksi toimi- ja mittalaite.....	47
6.2.2 Kolme toimi- ja mittalaitetta	54
6.3 Vertailu	64
6.4 Pohdinta.....	71
6.5 Jatkokehitys	73
7 Johtopäätökset	75
8 Yhteenveto	76

LÄHDELUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

ACO	muurahaisyhdyskuntaoptimointi (ant colony optimization)
ADMC	adaptive dynamic matrix control
CPE	Stora Enson kehittämä ohjelmisto säädön suorituskyvyn arviointiin (control performance evaluation)
CPS	kyberfyysinen järjestelmä (cyber physical system)
DCS	hajautettu ohjausjärjestelmä (distributed control system)
DMC	dynamic matrix control
FIR	äärellinen impulssivaste (finite impulse response)
FSR	äärellinen askelvaste (finite step response)
GA	geneettinen algoritmi (genetic algorithm)
HMI	ihmisen ja koneen välinen rajapinta (human machine interface)
IDCOM	identification and command
IIoT	teollinen esineiden internet (industrial internet of things)
LAN	lähiverkko (local area network)
LP	lineaarinen ohjelmointi (linear programming)
MAE	keskimääräinen absoluuttinen virhe (mean absolute error)
MPC	malliprediktiivinen säätö (model predictive control)
MQTT	MQ telemetry transport
MSE	keskineliövirhe (mean squared error)
NLP	epälineaarinen ohjelmointi (nonlinear programming)
OPC UA	OPC unified architecture
PID	vahvistuksen, integraalin ja derivaatan sisältävä säädin (proportional integral derivative)
PLC	ohjelmoitava logiikka (programmable logic controller)
PSO	partikkeliparvionoptimointi (particle swarm optimization)
QDMC	quadratic dynamic matrix control
QP	kvadraattinen ohjelmointi (quadratic programming)
c	säätöhorisontti
d	häiriö
e	erosuure
h	näyteväli

J	kustannusfunktio
K	vahvistus
k	näyteindeksi
n	mittauskohina
p	ennustushorisontti
r	referenssi, asetuservo
T_D	derivointiaika
T_I	integrointiaika
T_S	asettumisaika
t	aika
u	ohjaus
V	voltti
y	vaste
α	ohjausmuutoksen painotuskerroin
δ_o	ylitys (overshoot)
δ_u	alitus (undershoot)
μ	jäsenyysaste

1 JOHDANTO

Teollisuudessa hajautetut ohjausjärjestelmät ovat yleinen tapa toteuttaa prosessiautomaatio. Yhdessä teollisessa tuotantolaitoksessa voi olla useiden eri toimittajien valmistamia järjestelmiä. Hajautetun ohjausjärjestelmän sisälle toteutetun säädön monistaminen prosessista tai tuotantolaitoksesta toiseen vaatii järjestelmältä skaalautuvuutta. Eri valmistajien järjestelmien sisältämät säätimet ja muut säätöön tarvittavat komponentit, kuten suodattimet on toteutettu erilaisilla rakenteilla, jolloin parametrit ja niiden toiminta eivät välttämättä vastaa toisiaan. Komponenttien on myös havaittu usein olevan mustia laatikoita, joiden tarkkaa toteutusta rajapintojen sisäpuolella ei tunneta.

Tämä diplomityö on toteutettu osana itsenäisen ja pääosin ylätason säätöjen toteutukseen tarkoitetun järjestelmän kehitystä. Stora Enson Heinolan tuotantolaitos ja tutkimuskeskus Pulp Competence Centre on havainnut kehitettyjen säätöjen siirtämisen suljetusta hajautetusta automaatiojärjestelmästä toiseen erittäin haasteelliseksi, tai paikoin jopa mahdottomaksi. Suunniteltujen säätöjen toteutuksen on myös useassa tapauksessa havaittu vaativan tukea järjestelmän toimittajalta. Itsenäinen ja avoimen lähdekoodin ratkaisuja käyttävän järjestelmän tavoite on mahdollistaa siirrettävät ja skaalautuvat säätöratkaisut, jotka eivät ole tuotantolaitoksen automaatiojärjestelmän toimittajasta riippuvaisia. Vakioituja funktioita sisältävä ja avoimen lähdekoodin ratkaisuilla toteutettu järjestelmä mahdollistaisi myös säätöjen sisäisen kehityksen sekä laajemman ulkopuolisten resurssien käytön.

Työn pääpaino on säätömenetelmissä. Tavoitteena on kehittää avoimen lähdekoodin sovelluksia soveltamalla erilaisia säätömenetelmiä toteutettavan järjestelmän hallintaan. Työssä käsitellään säätömenetelmien teoria, ja arvioidaan niiden suorituskykyä sekä siirrettävyyttä teollisuuden lämmitysprosessia kuvaavassa testauslaitteistossa. Testauslaitteiston yhteyteen toteutetaan ensimmäinen versio tavoitellusta säätöjärjestelmästä. Laitteiston ja säätöjärjestelmän muodostama kokonaisuutta kutsutaan tässä työssä testausympäristöksi.

2 YLÄTASON SÄÄTÖ

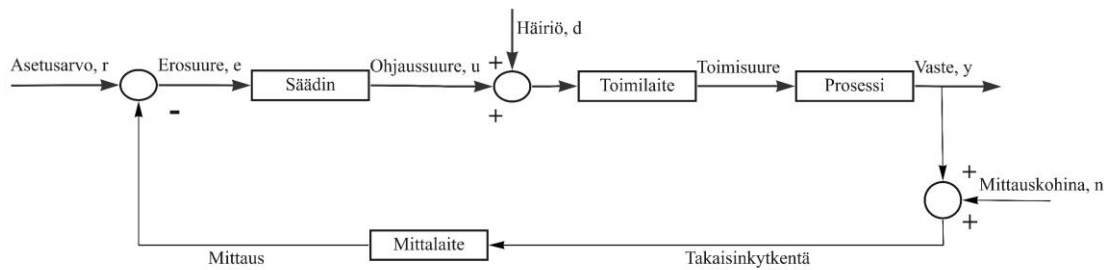
Kappaleessa esitellään säätöjärjestelmä ja siihen liittyviä termejä, toimintaa ja komponentteja. Kappaleeseen sisältyy myös ylätason säätöön liittyvät periaatteet sekä optimoinnin tarkoitus säätöjärjestelmän muodostamassa kokonaisuudessa. Lisäksi tämä kappale sisältää kuvauksen teollisuudessa laajasti käytössä olevasta hajautetusta ohjauksjärjestelmästä ja sen rakenteesta.

2.1 Säätöjärjestelmä

Prosessiteollisuudessa järjestelmällä tyypillisesti tarkoitetaan jotain laajemman kokonaisuuden yksikköprosessia tai sen osaa (Savolainen & Vaittinen 2003, s. 10). Säätöjärjestelmällä tarkoitetaan toisiinsa kytkettyjen komponenttien muodostamaa kokonaisuutta, jonka tarkoitus on tuottaa haluttu vaste säädettävälle systeemille (Dorf & Bishop 2017, s. 33). Säätöjärjestelmää käsiteltäessä prosessilla voidaan tarkoittaa myös säädön kohdetta (Harju & Marttinen 2000, s. 10).

Ohjauksen ja sen kohteen muodostamaa kokonaisuutta käsiteltäessä käyttöön on vakiintunut terminä säätöpiiri, joita säätöjärjestelmä kokonaisuutena voi sisältää useita (Savolainen & Vaittinen 2003, s. 9–10). Säätöpiirit voidaan jakaa avoimiin ja suljettuihin piireihin. Avoimen ja suljetun piirin ero on takaisinkytkennässä, jota avoin säätöpiiri ei sisällä. (Dorf & Bishop 2017, s. 33–34)

Takaisinkytkennässä asetusarvon ja mittauksen erotuksen muodostamaa erosuureta hyödynnetään säätimessä. Takaisinkytkentä parantaa säädön tarkkuutta muun muassa kompensoimalla häiriöitä, mutta se voi tehdä säädöstä epästabiilin vahvistamalla säätimen tuottaman ohjauksen värähtelyä. Säädön ylikompensoidessa virhettä ja muuttuessa epästabiiliksi voidaan päätyä vakio tai vaihtuva amplitudiseen oskillointiin (Ogata 2002, s. 7). Ohjauksen muuttumista epästabiiliksi tulee välttää ja sen mahdollisuus tulee ottaa suunnittelussa huomioon. Stabiilisuuden näkökulmasta avoimen piirin ohjaus on helpompi toteuttaa. Teollisuudessa takaisinkytkentä on kuitenkin laajasti käytössä. Kuvassa 1 on lohkoakaavio suljetusta säätöpiiristä. (Dorf & Bishop 2017, s. 33–260)



Kuva 1. Suljettu säätöpiiri lohkokaaaviona (mukaillen Dorf & Bishop 2017, s. 34).

Ohjaussuure ja toimisuure ovat yleisesti käytössä olevia termejä säätöjärjestelmissä. Ohjaussuure on määrä tai tila, jota mitataan ja säädetään. Yleensä ohjaussuure on säätimen lähtö u . Toimisuure on esimerkiksi virtauksen määrä, jota pyritään muuttamaan säätimen ohjaaman toimilaitteen toimesta. Häiriöksi luokitellaan signaali, joka vaikuttaa haitallisesti säätöpiirin toimintaan. Häiriöt voidaan luokitella järjestelmän sisältä tuleviin sisäisiin ja ulkopuolelta tuleviin ulkoisiin häiriöihin. (Ogata 2002, s. 2–3)

Asetusarvo tai referenssi on tavoitearvo, johon säädin pyrkii ohjaamaan prosessin tai sen suureen mahdollisimman tarkasti. Tavoite on saavuttaa asetuservo mahdollisimman nopeasti minimoiden ylitys ja värähtely, lisäksi mahdolliset rajoitukset huomioiden. (Harju & Marttinen 2000, s. 10; Savolainen & Vaittinen 2003, s. 15)

Säädin pyrkii minimoimaan eron asetuservon ja mitatun vasteen välillä. Säätimiä ja säätömenetelmiä on useita erilaisia, joista valitaan soveltuva säädettävään prosessiin. Virityksessä säätimen muunneltavat viritysparametrit asetetaan niin, että säätö toimii halutunlaisesti ja asetetut tavoitteet saavutetaan. Virittämätön tai huonosti viritetty säädin ei toimi optimaalisesti tai lainkaan ja operaattorit voivat päätyä kytkemään säädön tästä syystä pois päältä (Overshee & De Moor 2000). (Savolainen & Vaittinen 2003, s. 16–43)

Toimilaite vastaanottaa säätimen tuottaman ohjauksen ja vaikuttaa prosessin tilaan (Dorf & Bishop 2017, s. 32). Teollisuudessa yleisiä toimilaitteita ovat muun muassa venttiilit ja pumput. Toimilaitteet voidaan jaotella käytettävän energianlähteen mukaan. Teollisuudessa toimilaitteissa käytettävä energianlähde on usein sähköinen, pneumaattinen, magneettinen, hydraulinen tai pietsosähköinen. (Zhang 2010, s. 98)

Mittalaite on sensori, joka tuottaa mittausta halutusta signaalista (Dorf & Bishop 2017, s. 32). Mittauksen suodatus ennen sen käyttöä säätimessä on tavallista ja joissain

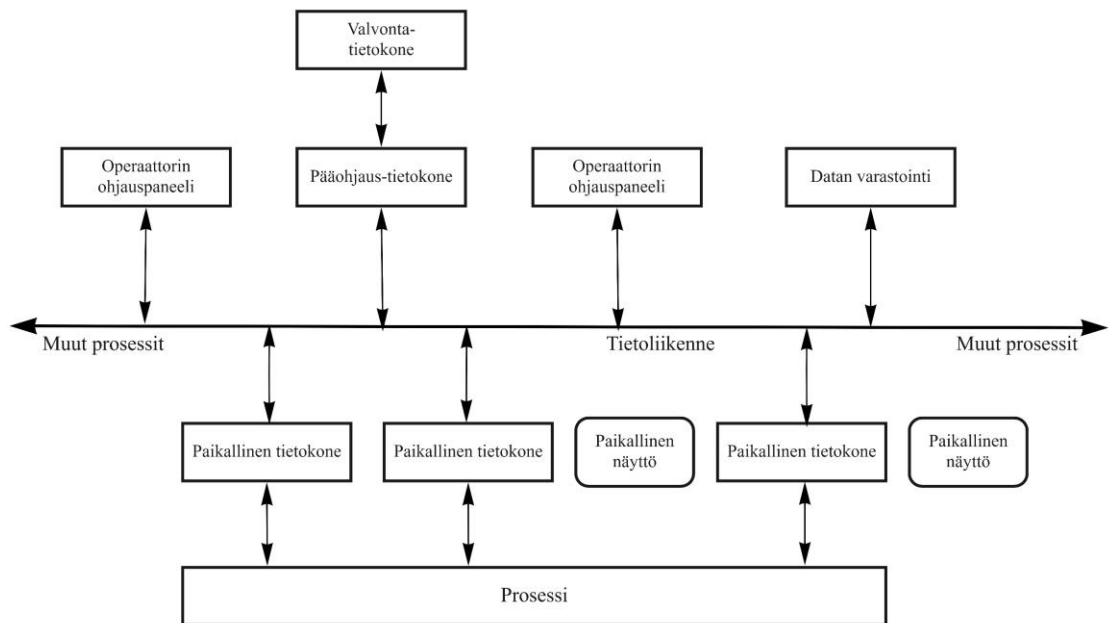
tapauksissa välttämätöntä mittaussignaaliin liittyvän kohinan takia (Harju & Marttinen 2000, s. 15). Teollisuudessa tyypillisiä mittauksia ovat fysikaaliset suureet, kuten lämpötila ja tiheys. Toiminnaltaan mittauksia tuottavat sensorit voivat olla optisia tai fyysisiä, kuten lämpötilan mittaukseen käytettävä fyysinen termopari. (Zhang 2010, s. 73–85)

2.2 Hajautettu ohjausjärjestelmä

Hajautettu ohjausjärjestelmä (distributed control system, DCS) on yleinen tapa toteuttaa tietokonepohjainen prosessiautomaatiojärjestelmä. Siinä hajautetaan ne elementit tai alisysteemit, joilla prosessia ohjataan. Teollisen tuotantolaitoksen satojen säätöpiirien hallinta vaatii tällaiselta järjestelmältä luotettavuutta, jota saadaan hajauttamalla ohjaustoiminnot kyseisen prosessin läheisyyteen tai muuhun optimaalisen toiminnan mahdollistamaan paikkaan. Vaikka osa järjestelmästä menisi epäkuuntoon, hajautettuna se kykenee jatkamaan osittain toimintaansa. Hajautettua ohjausjärjestelmää käytetään perustason sekä ylitason automaation toteutuksessa. (Zhang 2010, s. 30; Mehta & Reddy 2014, s. 75–76)

Informaation hyvä saatavuus on keskeinen osa hajautetun ohjausjärjestelmän toimintaa. Tietoliikenne mahdollistaa tiedon siirtämisen, varastoinnin ja esittämisen useilla erillisillä operattoreiden ohjauspaneelilla ja näytöillä. Tietoliikenne prosessien välillä on usein toteutettu ethernet lähiverkkoratkaisuna (local area network, LAN). (Zhang 2010, s. 30–32)

Paikalliset mikrotietokoneet, jotka ovat kiinnittyneitä prosessiin vastaavat alemman tason toiminnasta ja lähettävät tietoa eteenpäin. Prosessin kenttälaitteita voidaan ohjata esimerkiksi ohjelmoitavalla logiikalla (programmable logic controller, PLC). Tehokkaammat pääohjaus- ja valvontatietokoneet suorittavat ylemmän tason tehtäviä sekä kompleksisempia toimintoja, kuten kehittyneempää laskentaa. Kuvassa 2 on lohkoakaavio erään hajautetun ohjausjärjestelmän toteutuksesta. (Zhang 2010 s. 30–32)

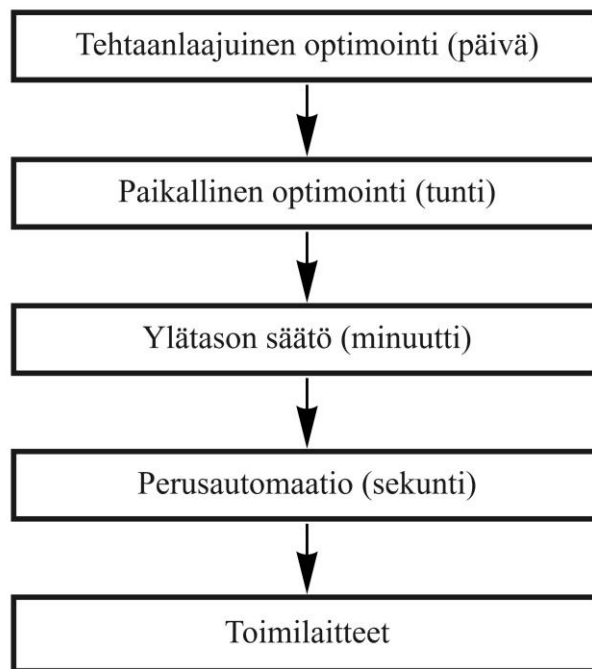


Kuva 2. Hajautetun ohjausjärjestelmän lohkokaavio (mukaillen Zhang 2010, s. 31).

2.3 Periaatteet

Nykyaikaisen teollisen tuotantolaitoksen säätöjärjestelmä voidaan jakaa operointi hierarkian mukaisiin osiin. Ylimmällä tasolla tehtaanlaajuinen optimointi määrittää optimaalisen tasapainotilan jokaiselle yksikölle. Paikallinen optimointi suoritetaan tiheämmin ja se on yksityiskohtaisempi kuin tehtaanlaajuinen optimointi. Siinä tasapainotila optimoidaan taloudellisesta näkökulmasta ja tavoitetila välitetään edelleen dynaamiseen rajoitukselliseen ylätasoon säätöön. (Qin & Badgewell 2003; Agachi ym. 2017, s. 136–137)

Ylätasoon säädön tavoite on ohjata prosessi tasapainotilasta toiseen määrittämällä seurattavat asetusarvot perusautomaation tasolle ja minimoimalla rajoitusten rikkominen. Säätö voidaan toteuttaa erilaisilla PID-algoritmeilla (proportional integral derivative) kuten kaskadisäädöllä, suhdesäädöllä tai myötäkytkennällä. Usein käytettyjä vaihtoehtoja ovat myös malliprediktiivinen (model predictive control, MPC) ja sumea säätö. Kuvassa 3 on säätöjärjestelmän klassinen hierarkia, jossa suluissa on merkitty ohjauksen aikaväli. (Qin & Badgewell 2003; Agachi ym. 2017, s. 137)



Kuva 3. Säätojärjestelmän hierarkia ja säätöjen aikaväli suluissa (mukaillen Qin & Badgewell 2003).

Perusautomaatio suorittaa mittausten keräyksen ja se sisältää usein yksinkertaisia PID-algoritmeja ohjaukseen, jossa tavoitteena on pitää muuttujat asetusarvoissaan (Agachi ym. 2017, s. 136). Edellytyksenä tehokkaalle ylätason säädön toiminnalle on, että alimman tason (perusautomaatio) säätöpiirit ovat kunnossa ja oikein viritetty (Van Overschee & De Moor 2000).

2.4 Ylätason optimointi

Optimoinnissa tavoitteena on etsiä paras ratkaisu mahdollisten ratkaisujen joukosta. Ongelma tulee muotoilla minimoitavaksi tai maksimoitavaksi funktioksi, jota kutsutaan kustannus- tai tavoitefunktiksi. Funktion muodostus vaatii tuntemusta prosessista, mittauksia ja mahdollisesti prosessimallia. (Antoniou & Lu 2021, s. 4)

Tehtaanlaajuista optimointia käytetään optimoimaan tuotantotavoitteita pidemmälle aikavälille, jossa tavoitteena on maksimoida tuotto. Optimointialgoritmeja voidaan tällä tasolla käyttää määrittämään tavoitteita alemmalle tasolle. Paikallinen optimointi on usein toteutettu hyödyntämällä tasapainotilan prosessimallia. Tavoite paikallisessa optimoinnissa on määrittää asetusarvot ylätason säädölle. (Agachi ym. 2017, s. 137)

Kaavassa (1) on esitetty klassinen muoto moniulotteisesta optimointiongelma, jossa tavoitteena on valita tarkasteltavien muuttujien arvot siten, että niiden muodostama kustannusfunktion arvo minimoituu (Antoniou & Lu 2021, s. 4):

$$\min J = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

missä J on kustannus,
 f on funktio ja
 $x_{1\dots n}$ on optimoitavat muuttujat.

Usein optimointiongelma esitetään rajoituksien alaisena, joka yleensä muuttaa optimoinnin paljon haastavammaksi. Kustannusfunktio voidaan optimoida epäyhtälömuotoisten rajoitusten alaisena tai muotoilla siten että rajoitukset täyttyvät kun funktio minimoidaan. (Antoniou & Lu 2021, s. 9–10)

Algoritmi optimointiongelman ratkaisuun tulee valita sopivaksi kyseiseen ongelmaan (Venkrbec ym. 2018). Tässä esiteltävät algoritmit voidaan karkeasti jakaa heuristisiin ja perinteisempiin matemaattista ohjelmointia (mathematical programming) hyödyntäviin numeerisiin menetelmiin.

Heuristisia menetelmiä voidaan käyttää useisiin erilaisiin optimointiongelmiin, mutta tehokkaimmillaan ne ovat vaikeammassa ja suurissa optimointiongelmissa. Niissä heurististen menetelmien vahvuus on yleensä kohtuullisessa ajassa konvergoituminen hyvään ratkaisuun, vaikka se ei olisikaan globaali optimi. Heuristisissa menetelmissä hyödynnetään joukkoa mahdollisia ratkaisuja, joka lisää suurissa optimointiongelmissa todennäköisyyttä päästä lähelle globaalia optimia. Yleisiä käytettyjä heuristisia evoluutiota tai luonnon mekanismeja jäljitteleviä menetelmiä ovat geneettiset algoritmit (genetic algorithm, GA), partikkeliparvioptimointi (particle swarm optimization, PSO) ja muurahaisyhdyskuntaoptimointi (ant colony optimization, ACO). (Venkrbec ym. 2018)

Matemaattiset ohjelmointi on toinen yleinen lähestymistapa ja sillä voidaan ratkaista komplekseja optimointiongelmiä, joihin analyttisesti ei saada ratkaisua. Matemaattinen ohjelmointi voidaan edelleen jakaa lineaariseen (linear programming, LP), kokonaisluku (integer programming), kvadraattiseen (quadratic programming, QP), epälineaariseen (nonlinear programming, NLP) ja dynaamiseen ohjelmointiin (dynamic programming).

Menetelmien avulla päästään optimiin ratkaisuun, mutta algoritmin toiminta voi ongelmasta riippuen olla hidasta. (Antoniou & Lu 2021, s. 2–3)

Lineaarisessa ohjelmoinnissa tavoitefunktio ja rajoitukset ovat lineaarisia ja muuttujat rajoitettu positiivisiksi. Simplex-menetelmä on silloin ensisijainen valinta tämän kaltaisen optimointiongelman ratkaisuun. Kokonaislukuohjelmoinnissa taas osa muuttujista voi saada arvoksi vain kokonaislukuja. Rajoitus muuttaa ongelman epälineaariseksi, vaikka tavoitefunktio ja rajoitukset ovat lineaarisia. (Antoniou & Lu 2021, s. 21–339)

Epälineaarissa ohjelmoinnissa tavoitefunktio ja yleensä myös rajoitukset ovat epälineaarisia. Yleisesti käytetty ratkaisualgoritmi on minimax. Kvadraattista ohjelmointia voidaan pitää erityistapauksena epälineaarista. Siinä tavoitefunktio on kvadraattinen ja rajoitukset lineaarisia. Kvadraattiseen ohjelmointiin liitetään useita erilaisia menetelmiä ja algoritmeja, joita voidaan hyödyntää ongelman ratkaisuun. (Antoniou & Lu 2021, s. 22–425)

Dynaamisessa ohjelmoinnissa otetaan huomioon sovellukset, joissa päätökset pitää tehdä sekvenssissä ja vaikuttavat toisiinsa. Ongelma tyypillisesti jaetaan osiin ja ratkaistaan erikseen. Dynaaminen ohjelmointi perustuu lineaarisen, kokonaisluku, kvadraattisen ja epälineaarisen ohjelmoinnin algoritmeihin. (Antoniou & Lu 2021, s. 22-425)

3 SÄÄDÖN SKAALAUTUVUUS

Kappaleessa käydään läpi ongelmakohtia ja ratkaisuja säädön skaalautuvuuden mahdollistamiseksi ohjelmistojen ja tiedonsiirron näkökulmasta. Skaalautuvuuteen liittyvät käsitteet säätimen parametrisointi ja konfigurointi esitellään. Lisäksi kappaleessa käsitellään teollisuuden suuria muutoksia ja niiden tuomia mahdollisuuksia sekä vaikutusta teollisuuden operaattoreiden toimintaan.

3.1 Säättömenetelmien monistaminen

Säädön monistaminen prosessista tai tuotantolaitoksesta toiseen vaatii järjestelmältä skaalautuvuutta. Vanhan PLC-säätimen korvaaminen toisen automaatiojärjestelmän säätimellä ei todennäköisesti onnistu suoraan, sillä eri valmistajien säätimet ja muut tarvittavat komponentit on toteutettu erilaisilla rakenteilla, jolloin parametrit eivät vastaa toisiaan (Harju & Marttinen 2000, s. 61). Teollisuudessa toimittajat käyttävät laajalti patentoituja ja yksinoikeudella tehtyjä rajapintoja ja ratkaisuja. Eri toimittajien tuotteet eivät ole yleensä yhteensopivia, jolloin yhteensovittaminen vaatii konfigurointia (Friedrich ym. 2015). Teollisen tuotantolaitoksen suuri määrä eri toimittajien järjestelmiä voi tuoda haasteita useista eri protokollista, alustoista ja ohjelmointirajapinnoista johtuen. (Breivold & Sandström 2015)

Yleisesti voidaan ajatella ylätasen säädön kehityksessä tarvittavan asiantuntemusta ohjattavasta prosessista sekä ohjelmointiosaamista automaatiojärjestelmästä, jolla säätö toteutetaan. Tuotantolaitoksessa voi olla useiden eri toimittajien hajautettu ohjausjärjestelmä käytössä tai käytössä oleva järjestelmä ei sisällä haluttua toimintoa (Friedrich ym. 2015). Seurauksena useista erilaisista järjestelmistä voidaan tehdä päätelmä vaatimuksesta laajaan asiantuntemukseen, mikäli säätö ja kunnossapito toteutetaan tuotantolaitoksen omalla henkilöstöllä.

Järjestelmän toteutus avoimen lähdekoodin ohjelmistoilla parantaa sovellusten läpinäkyvyyttä ja tarpeen mukaan itsenäistä kehitystä (von Krogh & von Hippel 2006). Suurten automaatiotoimittajien järjestelmiä voidaan pitää hiottuina, toimivina ja niiden luotettavuutta korkealla tasolla. Ohjelmistosta johtuvien suunnittelemattomien seisokkien estäminen on erityisen tärkeää teollisissa tuotantolaitoksissa (Breivold & Sandström 2015).

Siirtymällä pois suurista monoliittisista arkkitehtuureista mahdollistetaan modulaarinen ja skaalautuva järjestelmä (Mehta & Reddy 2014, s. 13). Skaalautuvalla järjestelmällä voidaan liittyä eri automaatiojärjestelmiin standardin rajapinnan kautta. Järjestelmän ja sen työkalujen ollessa modulaarisia, parametrisoituja ja rakenteet vakioituja, voidaan hyödyntää aikaisemmin kehitettyjä rakenteita ja parametrejä. Tällainen järjestelmä on monistettavissa eri kohteisiin, joissa sitä voidaan virittää ja tarvittaessa muokata. (Friedrich ym. 2015)

3.2 Parametrisointi

Säätimet on toteutettu tietokoneelle ohjelmoituna, jolloin parametrisointi on tärkeä osa käytettävyyden parantamisessa. Säädintä ohjelmoitaessa tulee ottaa huomioon muokattavuus, joka mahdollistaa muun muassa optimaalisen rakenteen hyödyntämisen sovelluskohteissa ja säätimeen toiminnallisuuksien lisäämisen tarpeen mukaan. (Goguen 1996)

Modulaarisessa rakenteessa ohjelma jaetaan selkeämmin hallittaviin kokonaisuuksiin, jotka helpottavat ylläpitoa ja testausta. Parametrit ja riippuvuudet eri moduulien välissä pyritään pitämään mahdollisimman vähäisinä, jolloin säätimen rakenne saadaan selkeämmäksi. (Friedrich ym. 2015)

Käyttämällä avoimia ohjelmistoja suunnittelijalla on parempi mahdollisuus vaikuttaa parametrisoinnin toteutukseen, kuin käytettäessä suljetun lähdekoodin ohjelmistoja (Mehta & Reddy 2014, s. 303). Esimerkiksi PID-säätimelle on yleensä vähemmän määritettyjä parametreja vuritykseen ja sen toiminnan voidaan ajatella olevan yleisemmässä tiedossa kuin monimutkaisemmilla kappaleessa 4.3 käsitellyllä malliprediktiivisellä tai kappaleessa 4.2 käsitellyllä sumealla säädöllä. Johtopäätöksenä parametrisoinnin toteuttavalla henkilöllä tulee olla syvä ymmärrys säätimen tulevasta käyttötarkoituksesta ja vaadittavien parametrien määrästä.

3.3 Konfigurointi

Järjestelmän konfigurointi tulee olla mahdollisimman käytännölliseksi tehty. Modulaarinen rakenne edesauttaa nopeaa konfigurointia, kun säätöä toteutetaan tai siihen halutaan lisätä toiminnallisuuksia. Yleisesti säätimen konfiguroinnissa tulee ottaa

huomioon vakiona pysyvät parametrit kuten säädön aikaväli ja virityksessä muunneltavat parametrit. (Friedrich ym. 2015)

Hajautetut ohjausjärjestelmät on yleensä toteutettu parametrisoiduilla funktioilla, jolloin säätimen konfigurointi ei välttämättä vaadi ohjelmointia. Tämä lähestymistapa tekee konfiguroinnista ja ongelmien selvittämisestä tehokasta. (Mehta & Reddy 2014, s. 84)

3.4 Teollisuus 4.0

3.4.1 Yleistä

Teollisuudessa tapahtuneet ja tapahtuvat teknologian kehitymisestä seuranneet vallankumoukset on jaettu neljään osaan. Niistä ensimmäinen liittyy vesi- ja höyryvoiman käyttöönottoon. Toisessa tuotantolinjojen ja sähköenergian avulla mahdollistettiin massatuotannon aloittaminen. Kolmannessa tietotekniikan ja elektroniikan avulla automaatio ja digitalisaatio otettiin laajasti käyttöön. Neljäs ja käynnissä oleva teollisuuden suuri muutos sisältää useita eri teknologioita, joista keskiössä on sensoreilla ja älykkäillä ohjausyksiköillä varustetut laitteet. Kyseiset laitteet pystyvät tekemään itsenäisiä päätöksiä, toimimaan yhdessä ja vaihtamaan informaatiota suoraan tai ylemmän tason ohjelmiston avulla. Älykkäitä laitteita sisältäviä yksiköitä kutsutaan kyberfysiikaksi järjestelmiksi (cyber physical systems, CPS). (Lukac 2015)

Keskeinen tavoite neljännellä vallankumouksella on koneiden keskinäinen sekä ihmisen ja koneiden (human machine interface, HMI) välisten rajapintojen sulava ja rajoitukseton toiminta (Lukac 2015). Teollisuus 4.0 käsite esiteltiin Saksassa vuonna 2011 ohjelmana, jonka tarkoitus on kilpailukyvyyn kehittäminen ja digitalisaation kehityksen tuomien mahdollisuuksien hyödyntäminen. Nykyisin termi on levinnyt yleiseen käyttöön puhuttaessa tulevaisuuden teollisuudesta. Teollisuus 4.0 sisältää paljon samaa Yhdysvalloista lähteneen teollisuuden esineiden internetin (industrial internet of things, IIoT) kanssa, kuten tavoitteen kerätä ja kehittyneitä menetelmiä hyödyntämällä analysoida suuria määriä dataa. (Boyes ym. 2018)

3.4.2 OPC UA

Teollisuudessa suurin osa järjestelmistä käyttää ethernet-pohjaisia kenttäväylä järjestelmiä, joita on valmistajasta riippuen useita erilaisia. Suuri määrä erilaisia ratkaisuja tuo lisäkustannuksia ja haasteita kunnossapitoon. (Bruckner ym. 2019)

Datan ja informaation siirtämiseen käytettävien ratkaisujen standardointi mahdollistaa eri teknologioiden liittämisen toisiinsa. Yksi vaihtoehto ohjelmistojen rajapinnoille on OPC-säätiön kehittämä OPC unified architecture (UA). Se mahdollistaa datan vaihdon organisaation eri tasoilla riippumatta valmistajasta sekä käytetyistä kenttäväylistä ja protokollista. (Lukac 2015)

OPC UA on vuonna 2008 julkaistu alustasta riippumaton skaalautuva ratkaisu, joka sisältää myös edeltävien OPC Classic -teknologioiden toiminnallisuudet. Protokollan on tarkoitus olla tietoturvallinen datan liikuttamiseen palvelimien, laitteiden ja ohjelmistojen välillä. Sitä voidaan hyödyntää yksinkertaisissa mittalaitteissa sekä monimutkaisemmissa pilvipalvelimissa. (OPC Foundation 2022)

Käytetty teknologia voidaan Bruckner ym. (2019) mukaan jakaa kolmeen osaan:

1. Metamalli tai kieli, jota käytetään määrittämään tietomallit.
2. Tiedonsiirtoprotokolla datan siirtoon laitteiden välillä.
3. Serveri isännöimään tietomallia ja protokollaa sekä mahdollisia muita määritettyjä palveluita.

3.4.3 Muutos operaattorille

Teollinen mullistus tuo muutoksia myös operaattorin työpisteeseen ja toimenkuvaan. Saatavilla olevan informaation määrän kasvu ja vuorovaikutus erilaisten järjestelmien kanssa vaatii uudenlaisen työskentelytavan omaksumista. Operaattorin motivaatio muutokseen ja halu oppia uusien järjestelmien käyttöä on tärkeä osa sujuvan toiminnan varmistamiseksi. (Golan ym. 2020)

Teknologian avulla voidaan vähentää inhimillisten virheiden määrää ja lisätä operaattoreiden turvallisuutta. Koulutus kehittyneiden järjestelmien ja teknologioiden käyttöön on erityisen tärkeää, sillä niillä saavutetaan merkittävää hyötyä vain, jos niitä käytetään oikein. (Di Pasquale ym. 2021)

Di Pasquale ym. (2021) mukaan tulevaisuudessa operaattorit suorittavat työn kasvavissa määrin vuorovaikutteisesti kehittyneiden järjestelmien kanssa ja teknologiaa hyödyksi käyttäen. Tämä voisi tulevaisuudessa tarkoittaa muun muassa puettavaa teknologiaa ja lisätyn sekä virtuaalisen todellisuuden hyödyntämistä esimerkiksi koulutuksessa.

4 TYÖSSÄ SOVELLETTAVIA MENETELMIÄ

Kappale sisältää perusteorian kolmen toisistaan eroavan säätömenetelmän toiminnasta. Säätömenetelmistä käsitellään myös niiden käyttökohteita, viritystä ja parametreja. Työn käytännön testeissä sovelletaan kappaleessa esiteltäviä menetelmiä.

4.1 PID-säädin

PID-säädin ja sen eri muodot ovat olleet teollisuudessa laajalti käytössä jo vuosikymmeniä (O'Dwyer 2009, s. 1). PID-säätimen on arvioitu olevan käytössä jopa 95 % prosessiteollisuuden säätöpiireistä. Rakenteeltaan yksinkertaisen säätimen viritysmenetelmät ovat laajasti tunnettuja ja sen hallinta on helppoa. Säätimestä voidaan käyttää erilaisia yhdistelmiä, joista yleisin on PI-muotoinen säädin. Säätimen käyttö on vakiintunutta erityisesti automaation alimmalla tasolla. (Åström & Hägglund 1995, s. 1–4)

Säädin on sovellettavissa suureen osaan säätöjärjestelmistä, ja prosessiteollisuudessa oikein viritettynä säädin tuottaa usein riittävän hyvän ohjauksen (Ogata 2002, s. 681). Säätimen P-osaa kutsutaan suhdetermiksi, I-osaa integroivaksi termiksi ja D-osaa derivoivaksi termiksi. Säädin voidaan toteuttaa useammalla rakenteella. Perusrakenteita säätimelle ovat ideaalinen, rinnakkaismuotoinen ja sarjamuotoinen. Yleisin näistä muodoista on ideaalinen. (Harju & Marttinen 2000, s. 59–60)

Säätimen viritysparametrejä ovat vahvistuskerroin, integrointiaikavakio ja derivointiaikavakio. Kaavassa (2) määritellään erosuure ja kaavassa (3) esitetään ideaalisen PID-säätimen jatkuva-aikainen rakenne (Harju & Marttinen 2000, s. 48):

$$e(t) = r(t) - y(t), \quad (2)$$

$$u(t) = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right), \quad (3)$$

missä $y(t)$ on vaste,

$r(t)$ on asetusrvo,

$e(t)$ on erosuure,

t on aika,

$u(t)$ on säätimeltä lähtevä ohjaus,

K_P on vahvistuskerroin,
 T_I on integrointiaika ja
 T_D on derivointiaika.

P-säädöllä tarkoitetaan vahvistuskertoimen ja erosuureen tuloa. Sillä on mahdollista säätää stabiileja prosesseja, mutta rajallisella suorituskyvyllä. I-osa integroi erosuuretta ja sitä käytetään harvoin yksin hitaan vaikutuksen takia. I-osa voi myös aiheuttaa värähtelyn lisääntymistä erityisesti käytettäessä pientä integrointiaikaa, sillä seurauksena on suuri ohjauksen kasvunopeus. Käytetyin muoto on niiden yhdistelmä PI-säädin kuten yllä on mainittu. Siinä integrointitermillä voidaan poistaa P-säädön tyypillisesti jättämä jatkuvuustilan virhe ja kyetään vaikuttamaan prosessiin nopeasti. (Harju & Marttinen 2000, s. 45–50; Savolainen & Vaittinen 2003, s. 34–57)

D-säädin derivoi erosuuretta ajan suhteen ja sillä voidaan vaikuttaa säätimen reagointinopeuteen nopeaan muutokseen. Derivoivan säädön kanssa yleensä käytössä on PI-säädin. Derivointitermi korostaa tyypillisesti korkeita taajuuksia, kuten mittauskohinaa. Tämän vuoksi signaalin suodatus ennen derivaattaa on tyypillistä teollisissa sovelluksissa. Muuttumisnopeutena on mahdollista käyttää erosuuren sijaan mittaussignaalia, jolloin nopea muutos asetusarvossa ei vaikuta ohjaukseen yhtä voimakkaasti. (Harju & Marttinen 2000, s. 48–51; Savolainen & Vaittinen 2003, s. 40–58)

Toimilaitteen saturoituessa I-osa voi aiheuttaa wind up -ilmiön. Ilmiössä toimilaite on ääriasennossa, mutta integroiva termi jatkaa edelleen ohjaussuureen kasvattamista. Tämän estämiseksi on kehitetty rakenteita, kuten raja-arvojen asettaminen integrointitermille tai integraalitermin päivityksen keskeyttäminen, mikäli vaste on kaukana asetusarvostaan. (Harju & Marttinen 2000, s. 58–59; Savolainen & Vaittinen 2003, s. 54–60)

Säätimen virityksessä tavoitteena on määrittää oikea suhde säätimen virityksiparametreille. Virityksiparametrit vaikuttavat toisiinsa, joten viritystä ei voi toteuttaa parametri kerrallaan. Vahvistuskerrointa K_P kasvattamalla säätö muuttuu nopeammaksi, mutta asetusarvon ylitys kasvaa. Integrointiaika T_I on aika, jossa I-osan lähtö kasvaa yhtä suureksi kuin tulo. Sen käänteislukua kutsutaan integraalin vahvistukseksi. Pienentämällä aikavakiota saadaan säätimelle suuri ohjauksen kasvunopeus. Derivointiaika T_D vahvistaa suoraan

derivaatan vaikutusta säätimeen. Viritysparametrien vaikutus säädön suorituskykyyn esitetään taulukossa 1. (Harju & Marttinen 2000, s. 50; Dorf & Bishop 2017, s. 481–482)

Taulukko 1. PID-säätimen viritysparametrien vaikutus systeemin askelvasteeseen (mukaillen Dorf & Bishop 2017, s. 482).

Viritysparametri	Prosentuaalinen ylitys	Asettumisaika	Jatkuvuustilan virhe
Kasvatetaan K_P	Kasvaa	Minimaalinen vaikutus	Pienenee
Pienennetään T_I	Kasvaa	Kasvaa	Poistaa
Kasvatetaan T_D	Pienenee	Pienenee	Ei vaikutusta

Säätimen vuritykseen on olemassa erilaisia sääntöpohjaisia menetelmiä, jotka eivät vaadi säädettävästä prosessista matemaattista mallia. Automaatiojärjestelmät sisältävät usein työkalun PID-säätimen virittämiseen. Ziegler-Nicholsin-viritysmenetelmä on perinteinen ja edelleen yksi yleisimmistä käytössä olevista menetelmistä. Siinä säädettävälle prosessille tehdään tasapainotilassa askelvastekoe, jonka tuloksista määritetään viritysparametrit (Savolainen ja Vaittinen 2003, s. 43). Säädön optimoimiseksi tulee Ziegler-Nichols-menetelmän jälkeen parametrejä hienosäätää, sillä tämän menetelmän avulla saadaan vain hyvä alkuarvaus säätöparametreille (Ogata 2002, s. 683). Yksinkertainen askelvastekoe ja siitä saadut viritysparametrit eivät välttämättä kykene kuvaamaan prosessin dynamiikkaa. Tällöin voidaan päätyä tyydyttävään tai jopa epästabiliin ohjaukseen. (Van Overschee & De Moor 2000)

Digitaalisessa muodossa säätimen integraali ja derivaatta approksimoidaan numeerisesti. Viritysparametrien vaikutus systeemiin ei muutu diskreettiaikaisessa säätimessä, mutta uutena parametrina tässä muodossa on säädön aikaväli, jonka ajan säätimen lähtö on vakio. Tämän kaltaista ratkaisua kutsutaan nollannen kertaluvun pitopiiriksi (zero order hold). (Harju & Marttinen 2000, s. 52–54; Savolainen & Vaittinen 2003, s. 65–69)

Yleisiä tapoja diskretoida säädin ovat asento- ja inkrementtitila. Asentotilassa määritetään säätimeltä lähtevä ohjaus suoraan, kun inkrementtitilassa taas säädön aikavälissä tapahtuva muutos säätimeltä lähtevässä ohjauksessa. Toiminnaltaan muodot ovat

samanlaisia, mutta asentotilassa määrittämiseen tarvitaan kaikki edeltävät eroarvot. (Harju & Marttinen 2000, s. 52–57; Savolainen & Vaittinen 2003, s. 65–69)

Kaavassa (4) on esitetty asentomuoto diskretoidusta säätimestä. Inkrementtitila (6) saadaan sijoittamalla (4) kaavaan (5), joka kuvaa säädön aikavälissä tapahtuvaa ohjausmuutosta (Savolainen & Vaittinen 2003, s. 66–69):

$$u(k) = K_P(e(k) + \frac{h}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{h} (e(k) - e(k-1))), \quad (4)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1), \quad (5)$$

$$\Delta u(k) = \quad (6)$$

$$K_P(e(k) - e(k-1) + \frac{h}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{h} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))),$$

missä h on näyteväli ja
 k on näyteindeksi.

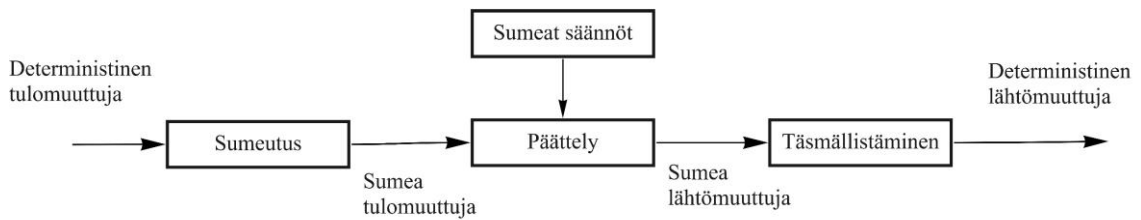
4.2 Sumea säätö

Sumea säätö perustuu perinteisiin sääntöpohjaisiin asiantuntijajärjestelmiin, sumeaan joukko-oppiin sekä säätöteorian yhdistämiseen. Siinä pyritään jäljittelemään ihmisen toteuttamaa epämääräisen tietoon perustuvaa päättelyä. Sumeita järjestelmiä on hyödynnetty prosessien säätöihin 1970-luvulta asti. Menetelmä eroaa merkittävästi perinteisestä säätöteoriasta, jossa hyödynnetään matemaattisia malleja muuttujien riippuvuuksien selvittämiseen. (Nie & Linkens 1995, s. 1–2)

Säätimellä on useita sovelluskohteita ja sitä on onnistuneesti sovellettu komplekseihin ja epälineaarisiin systeemeihin, joiden matemaattinen mallintaminen on haastavaa. Menetelmää voidaan käyttää usean ohjaussuureen ja vasteen systeemeihin. (Precup & Hellendoorn 2011)

Sumeassa logiikassa hyödynnetään ihmisen asiantuntemusta sanallisessa muodossa. Säädin toteutetaan asiantuntijoiden kuten prosessia onnistuneesti ohjaavien operaattorien tiedon avulla. Tällöin olemassa oleva tieto prosessista sulautetaan suoraan säädön toimintaan. Kuvassa 4 on sumean järjestelmän yleinen rakenne. Rakenne voidaan jakaa neljään erilliseen osaan: sumeutukseen (fuzzification), sumeaan sääntökantaan, sumeaan

päätelyyn (fuzzy inference) ja täsmällistämiseen (defuzzification). (Nie & Linkens 1995, s. 1–2)

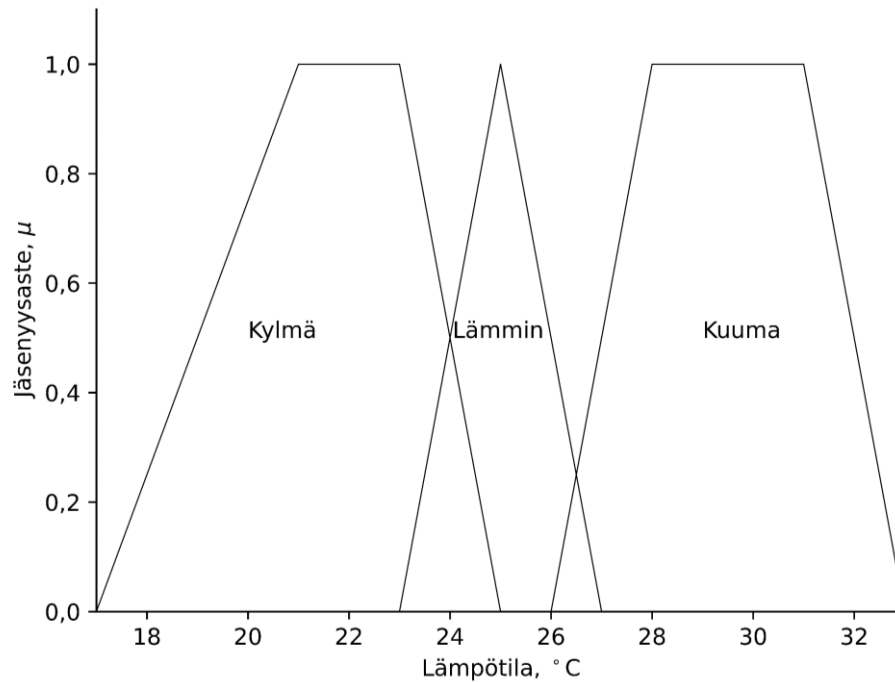


Kuva 4. Sumean järjestelmän yleinen rakenne (mukaillen Agachi ym. 2017, s. 87).

Sumeutuksessa todellinen suureen todelliset arvot muutetaan sumeiksi. Muutos tehdään jäsenyysastefunktiolla, jotka linkittävät muuttujien todelliset arvot niiden lingvistisiin arvoihin. Lingvististen arvojen määrä vaihtelee tapauksesta riippuen, mutta usein viisi tai vähemmän on riittävä määrä. Tyypillisiä lingvistisiä määritelmiä sumeissa säätimissä ovat esimerkiksi erittäin pieni, pieni, keskimääräinen, suuri ja erittäin suuri. (Agachi ym 2017, s. 84)

Kuvassa 5 on jäsenyysastefunktiot lämpötilalle. Jäsenyysastefunktiot vastaavat lämpötilan lingvistisiä arvoja kylmä, lämmin ja kuuma. Kylmä ja kuuma on ilmaistu puolisuunnikkaan muotoisilla jäsenyysastefunktiolla. Lämmin on ilmaistu kolmion muotoisella jäsenyysastefunktiolla. Sumeutuksessa jäsenyysasteet luetaan jokaiselle muuttujan lingvistiselle arvolle. Esimerkiksi lämpötilan ollessa 24 °C sumeutuksesta saadaan:

- Lämpötila on kylmä jäsenyysasteella $\mu = 0,5$
- Lämpötila on lämmin jäsenyysasteella $\mu = 0,5$
- Lämpötila on kuuma jäsenyysasteella $\mu = 0$.



Kuva 5. Sumeutukseen kuuluvat jäsenyysastefunktiot lämpötilalle (mukaiillen Agachi ym. 2017, s. 80).

Sumean säätimen sääntökanta sisältää tiedon ohjattavasta prosessista sekä logiikan, jolla säätötavoitteet saavutetaan. Sen muodostuksessa tulee ottaa huomioon tulosuureiden eri kombinaatiot. Sääntökanta muodostuu JOS-NIIN-muotoisista säännöistä ja sumean säätimen tapauksessa sääntö saa muodon JOS *tilanne* NIIN *toimenpide*. Tällöin kytetään määrittämään suoraan haluttu toimenpide kuvatulle tilanteelle. (Agachi ym 2017, s. 84-85; Gafa 2020)

Sumeassa päättelyssä määritetään sääntökannan ja sumeutettujen tulosten perusteella sumean systeemin sumea lähtö. Sääntökanta käydään läpi ja säännön sisältäessä useamman kuin yhden tulomuuttujan yhdistetään niiden muodostamat jäsenyysasteet. Yksittäisen säännön lähtö ratkaistaan valitulla implikaatiomenetelmällä, joka yleensä on minimi- tai tulo-operaatio. Päättelyn tuloksena saadut sumeat toimenpiteet aggregoidaan yhdeksi sumeaksi lähtömuuttujaksi, joka puolestaan täsmällistetään todelliseksi arvoksi. Suosituimpia tapoja toteuttaa aggregointi on maksimi-menetelmä ja täsmällistämiseksi alueen keski- ja painopistemenetelmät, mutta myös vaihtoehtoisia menetelmiä on useita. (Agachi ym 2017, s. 85-86; Gafa 2020)

Kappaleessa käsitellyt erillisen täsmällistämisen sisältämiä järjestelmiä kutsutaan Mamdani-tyyppin sumeiksi järjestelmiksi. Niissä myös lähtömuuttuja on kuvattuna

jäsenyysastefunktioiden ja lingvististen arvojen avulla. Toinen tunnettu sumea järjestelmä on Sugeno-tyypin järjestelmä, jossa sääntöjen johtopäätösosa on parametrisoitu funktio tulomuuttujista. Tyypillisesti käytettävä funktio on vakio tai lineaarinen polynomi. Laskennallisesti Sugeno-tyyppinen järjestelmä on tehokas, sillä implikaatio, aggregointi ja täsmällistäminen suoritetaan ehto-osan jäsenyysasteilla painotetulla keskiarvolla. (Ikonen & Najim 2002, s. 101–102)

Sumeiden säätimien viritys voi olla haastavaa ja vaatia paljon yritys-erehdys-iterointia joko simulaattorissa tai prosessissa. Virityksessä säätimen toimintaan voidaan vaikuttaa esimerkiksi muokkaamalla sen jäsenyysastefunktioita ja sääntökantaa. Viritys on yleisesti huomattavasti haastavampaa verrattuna PID-säätimiin, sillä tehtyjen muutoksien vaikutus säätötulokseen ei välttämättä ole selkeästi havainnoitavissa. Implementoinnin ja virituksen haasteet ovat hidastaneet sumean säädön laajamittaisempaa käyttöä teollisuudessa, vaikka saavutetut tulokset voivat lopulta olla hyviä. (Hu ym. 2001)

4.3 Malliprediktiivinen säätö

4.3.1 Perusteet ja käyttö

Prediktiivisellä säädöllä tarkoitetaan menetelmiä, joissa hyödynnetään sulautetun prosessimallin kykyä ennustaa ohjattavan prosessin tuleva käyttäytyminen. Mallia hyödyntämällä voidaan määrittää prosessille optimaalinen ohjaus, joka saavutetaan minimoimalla säätötavoitteet sisältävä kustannusfunktio. (Lequesne 2017, s. 1–3)

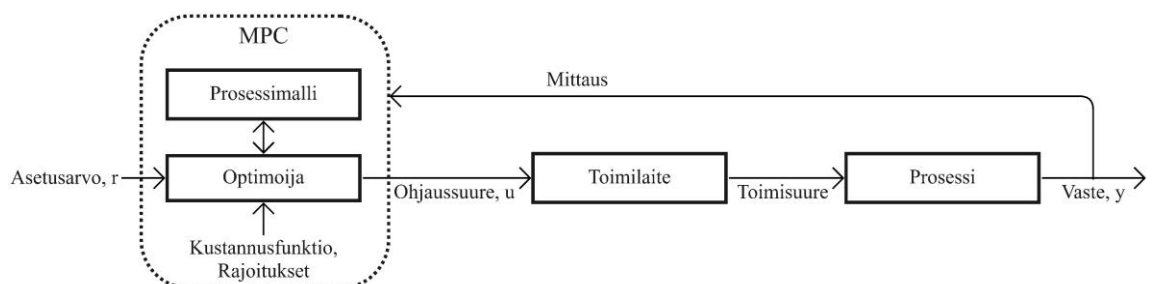
Malliprediktiivinen säätö (MPC) on käyttökelpoinen menetelmä yhden muuttujan yksinkertaisen dynamiikan prosesseista monimuuttujaisiin viiveellisiin prosesseihin. Kuitenkin tyypillinen käyttökohte teollisuudessa on alimman tason automaation yläpuolella, jossa malliprediktiivinen säätö määrittää asetusravot alatason säätimille ja saa itse asetusravot ylemmän tason optimoinnista. Tällä tasolla on myös potentiaalia saavuttaa säästöjä, sillä se mahdollistaa prosessin ajamisen rajoitusten lähellä. (Qin & Badgewell 2003)

Menetelmällä voidaan suoraan saavuttaa useita etuja verrattuna perinteisiin säätömenetelmiin, kuten kuolleen ajan huomioimisen, jonka se sisältää luonnostaan. Säätimen viritus ja implementointi ovat suhteellisen helppoja, mikäli säätimen suurinta haastetta eli prosessimallin muodostusta ei huomioida. Menetelmän käyttö vaatii

järjestelmältä laskentatehoa, sillä kaikki laskenta toteutetaan jokaisena säädön aikavälin määrittämänä ajanhetkenä. Laskentatehon tarvetta lisäävät myös säätöön usein asetettavat rajoitukset, joita voidaan asettaa ohjaussuureille, ohjaussuureiden muutosnopeudelle, mitattaville vasteille tai muille kiinnostaville muuttujille. (Camacho & Bordons 2004, s. 2–21)

Malliprediktiivisellä säädöllä voidaan tarkoittaa useita erilaisia säätöalgoritmeja, joista ensimmäiset kehitettiin 1970-luvulla (Qin & Badgewell 2002). Muiden lisäksi ensimmäisen sukupolven DMC (dynamic matrix control) ja IDCOM (identification and command) sekä niitä seuranneet QDMC (quadratic dynamic matrix control) ja ADMC (adaptive dynamic matrix control) ovat kaikki menetelmiä, joihin voidaan viitata termillä MPC (Qin & Badgewell 2003; Smith 2010, s. 394).

Suurimmat erot algoritmien välille muodostuvat prosessimallin, häiriöiden, rajoitusten sekä minimoitavan kustannusfunktion toteutuksesta ja käytöstä. Kuvassa 6 esitetään perusrakenne malliprediktiivisestä säädöstä. Prosessimallilla ennustetaan vasteet optimaalisen ohjausliikkeen sekä aikaisemmin suoritettujen ohjauksien ja systeemin vasteiden avulla. (Camacho & Bordons 2004, s. 1–5)



Kuva 6. Malliprediktiivisen säädön perusrakenne (mukaiillen Schwenzer ym. 2021).

Prosessiteollisuudessa malliprediktiivisen säädön käyttö on vakiintunutta ja sen on kuvattu olevan standardi lähestymistapa implementoitaessa rajoituksellista monimuuttujasäätöä (Darby & Nikolaou 2012). Kemianteollisuuden ollessa suurin käyttökohde on malliprediktiiviset säätö olleet käytössä myös kymmenissä sovelluskohteissa sellu- ja paperiteollisuudessa jo 2000-luvun alussa (Qin & Badgewell 2003).

Laajojen sovelluskohteiden säätö on mahdollista toteuttaa useammalla säätimellä, vaikka yksi malliprediktiivinen säädin voisikin optimoida kyseisen prosessin. Ohjauksen

jakaminen useammalle säätimelle yksinkertaistaa suorituskyvyn seuranta, sekä vikatilanteessa estää koko säädön kaatumisen. Kaupallisissa sovelluksissa säädön kaatumisen estäminen on usein huomioitu erilaisilla rakenteilla säätimen toteutuksessa. Säädön ylläpito vaatii systemaattista seuranta ja kunnossapitoa eri osapuolilta. Seurattavia parametreja voivat olla esimerkiksi mallin hyvyys ja säätimen saturoituminen. Säädön seuranta vaatii myös sitä tekevältä säätöinsinööriltä osaamista MPC-tekniologiasta. (Forbes ym. 2015)

Kanon & Ogawan (2010) MPC-käyttäjille toteuttamassa kyselyssä kunnossapidon suurimmaksi ongelmaksi (44 %) koettiin teknologiaan liittyvän tiedonsiirto, johon vaikutti prosessiteollisuuden hallitsevien säätöinsinöörien puute. Toisena merkittävänä haasteena kunnossapidossa (33 % vastanneista) koettiin säädön suorituskyvyn heikentyminen ajan saatossa.

Adaptiivisia itse virittyviä muotoja malliprediktiivisestä säätimestä on kehitetty 1980-luvulta asti, niiden koskaan yleistymättä laajalti teolliseen mittakaavan prosesseihin. Haasteena adaptiivisessa MPC-algoritmissa on reaali maailman toteutuksen vaikeus. (Qin & Badgewell 2003)

4.3.2 Algoritmi

MPC on digitaalisesti toteutettava säädin, jonka peruskomponentit ovat kuvassa 6 esitetyt dynaaminen prosessimalli, tavoitearvo, rajoitusten käsittely ja optimointi. Valitusta säätöalgoritmista riippumatta MPC määrittää jokaisena säädön aikavälin määrittämänä diskreettinä ajanhetkenä prosessin tilan, tavoitetilan ja optimaalisen ohjausliikkeen tavoitetilaa kohti. Optimoinnissa määritetään ohjaussekvenssi asetusarvon saavuttamiseksi ja tästä sekvenssistä ensimmäinen ohjausliike toteutetaan. Seuraavalla näytteenottohetkellä proseduuri toistetaan. (Ikonen & Najim 2002, s. 182–183)

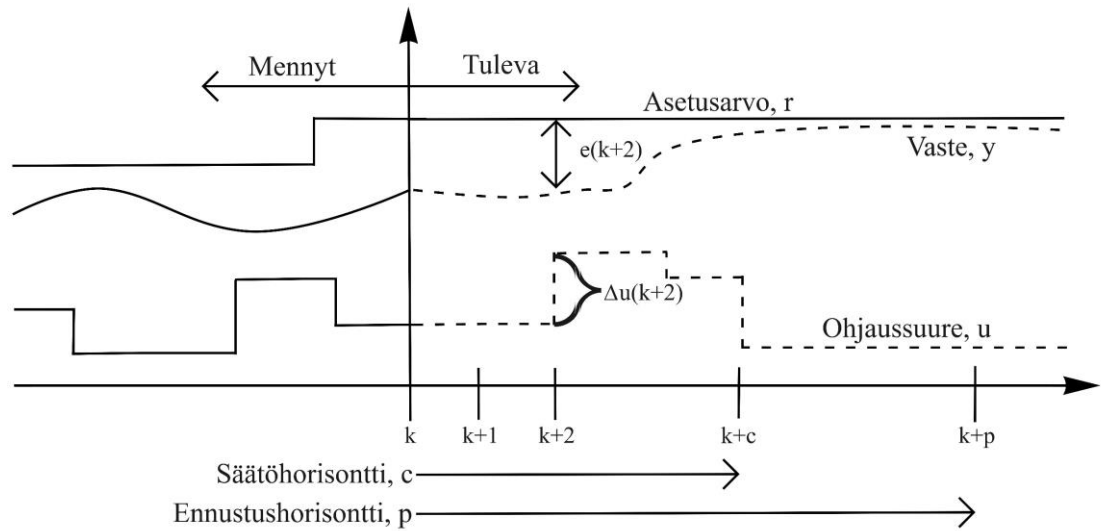
Optimoinnissa minimoitava kustannusfunktio vaihtelee hieman eri MPC-algoritmien välillä. Tavoitteena on löytää sekvenssi, jolla päästään haluttuun referenssiin, joka on usein asetusarvo. Kustannusfunktio sisältää yleisesti asetusarvon ja vastaavan ennusteen erotuksen, jonka neliöt summataan ennustushorisontin yli. On tavallista lisätä funktioon myös termi rauhoittamaan säädintä ja välttämään liian rajuja ohjauksia. Kaavassa (7) esitellään tyypillinen malliprediktiivisessä säädössä käytettävä kustannusfunktio (Rawlings 2000; Camacho & Bordons 2004, s. 18–22):

$$J = \sum_{i=1}^p (r(k+i) - \hat{y}(k+i))^2 + \alpha \sum_{i=0}^{c-1} \Delta u(k+i)^2, \quad (7)$$

missä p on ennustushorisontti,
 c on säätöhorisontti,
 $r(k)$ on asetusarvo hetkellä k ,
 $\hat{y}(k)$ on ennuste hetkelle k ,
 $\Delta u(k)$ on ohjausmuutos hetkellä k ja
 α on neliöllisen ohjausmuutoksen painotuskerroin.

Viritettävistä parametreista ennustushorisontti määrittää montako askelta prosessia kuvaavan mallin käyttäytymisestä tulevaisuuteen ennustetaan hetkellä k . Mikäli horisonttia kasvatetaan pitkäksi erityisesti suhteessa säädettävän prosessin aikavakioon, korostuu kustannusfunktiossa staattisen vaiheen termit ja transientti-vaiheen merkitys pienenee. Säätöhorisontilla määritetään, montako askelta tulevaisuuden ohjauksesta otetaan optimointiongelmassa huomioon. Tarkoituksena on rajoittaa optimoinnissa käytettävien ohjausmuutosten määrää, mikäli sitä kasvatetaan suhteessa ennustushorisonttiin, muuttuu säätö aggressiivisemmäksi. Usein säätöhorisontti asetetaan huomattavasti ennustushorisonttia lyhyemmäksi (Schwenzer ym. 2021). Ohjausmuutoksen painotuskertoimen kasvattaminen rankaisee suurista muutoksista ohjauksessa ja hidastaa ohjausta. (Agachi ym. 2017, s. 64–65)

Muita yleisesti käytössä olevia viritysparametreja ovat neliöllisen erosuureen painotuskerroin ja minimi ennustushorisontille (Camacho & Bordons 2004, s. 19). Kuvassa 7 esitetään malliprediktiivisen säädön perusidea ja yleiset parametrit.



Kuva 7. Malliprediktiivinen säätö säätö- ja ennustushorisonteilla (mukaillen Richalet ym. 1978).

Kaavan (7) kvadraattisen muodon kustannusfunktio on optimointiongelmana yksinkertainen, ja sen ratkaisu ei vaadi monimutkaisia optimointialgoritmeja. Käytännössä ongelma esitetään aina kaavan (8) mukaisesti haluttujen rajoitusten alaisena (Bequette 2007):

$$\begin{aligned}
 & \min_{\Delta u} J \\
 & y_{\min} < \hat{y} < y_{\max} \\
 & u_{\min} < u < u_{\max} \\
 & \Delta u_{\min} < \Delta u < \Delta u_{\max}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Yllä tavoitteena on löytää rajoitusten mahdollistamien toteuttamiskelpoisten ratkaisujen joukosta optimaalinen ratkaisu. Rajoitusten ollessa muotoiltuna optimointiongelman sisään voidaan mahdolliset tulevat rajojen ylitykset ennakoita ja pyrkiä estämään. (Bequette 2007)

Minimoitaessa kustannusfunktiota rajoitusten alaisen ja käytettäessä lineaarista prosessimallia voidaan hyödyntää kvadraattista ohjelmointia (Bequette 2007). Eri ohjelmointikielistä löytyy valmiina tehokkaita ja robusteja funktioita sen ratkaisuun. Rajoitusten hallinta sekä ratkaisun löytyminen optimointiongelmaan täytyy kuitenkin varmistaa käyttämällä jotain rajoitusten käsittelytekniikkaa, kuten järjestämällä rajoitukset arvojärjestykseen. Rajoitusten jaottelu koviin sekä pehmeisiin estää päätyksen toteuttamiskelvottomaan ratkaisuun, mikäli ratkaisua ei ole tai sellaista ei

säädön aikavälissä löydy. Kovat rajoitukset täytyy saavuttaa ja niitä asetetaan yleensä toimilaitteille, kuten pumpun nopeudelle. Pehmeistä rajoituksista voidaan joustaa, mikäli rajoitusten sisältä ei ratkaisua löydy. Pehmeiksi asetetaan tyypillisesti vasteiden rajoituksia. (Camacho & Bordons 2004, s. 206–209; Ikonen 2017)

4.3.3 Prosessimalli

Malli on kriittinen osa malliprediktiivistä säädintä ja toimiakseen se vaatii riittävän hyvän prosessimallin. Prosessin dynamiikkaa kuvaava prosessimalli on yksinkertaistus ohjattavasta prosessista; sen identifiointia voidaan sanoa säätimen implementoinnin tärkeimmäksi yksittäiseksi vaiheeksi. Valitusta algoritmista riippuen malli voi olla lineaarinen tai epälineaarinen ja empiirinen tai fysikaalinen. Käytännön sovelluksissa käytettävä malli on kuitenkin yleensä lineaarinen ja empiirisesti määritetty. (Qin & Badgewell 2003; Forbes ym. 2015)

Empiiriset mallit on prosessidatasta johdettu, kun taas fysikaalisissa malleissa hyödynnetään fysikaalisia ominaisuuksia, kuten massa- ja energiatasetta. Myös näiden yhdistelmiä on mahdollista käyttää, jolloin esimerkiksi fysikaalisen mallin tuntematonta parametria voidaan estimoida testidatasta (Qin & Badgewell 2003). Yleisimpiä käytössä olevia muotoja prosessimallille ovat äärellinen askelvastemalli (finite step response, FSR), äärellinen impulssivastemalli (finite impulse response, FIR), siirtofunktio ja tilamalli (Camacho & Bordons 2004, s. 14–16). Empiirisen mallin identifiointiin on kaupallisissa sovelluksissa yleensä kehitetty oma työkalu (Qin & Badgewell 2003).

Epälineaaraisia empiirisiä malleja, kuten neuroverkkoja hyödyntäviä menetelmiä on myös käytössä malliprediktiivisen säädön kanssa. Niiden kehitys voi olla nopeampaa kuin teoreettisten mallien ja useat ohjelmointikielet sisältävät helppokäyttöisiä kirjastoja, joita voidaan hyödyntää neuroverkkomallin kehityksessä (Bequette 2007). Tunnettuja ongelmia näillä menetelmillä ovat mallin koulutukseen käytetyn opetusdatan laatu sekä huono toiminta opetusdatan ulkopuolella operoitaessa (Qin & Badgewell 2003).

Askel- ja impulssivastemallit ovat lineaarisia ja empiirisiä; niitä voidaan kuvata approksimaatioksi siirtofunktiosta. Niissä muodostetaan ennuste systeemin vasteesta ohjauksen impulssiin (pulssiin) tai askeleeseen. Datasta määritetään prosessia kuvaava malli, joka on joukko parametreja. Menetelmät ovat hyvin intuitiivisia, eikä mallinnettavasta prosessista tarvita syvällistä tuntemusta. Niillä kyetään kuvaamaan

kompleksia dynamiikkaa kuten ei-minimivaiheista ja viivettä. Näiden menetelmien heikkoutena on mahdollinen yliparametrisointi sekä dimension suuri kasvu, erityisesti järjestelmän näytevälin ollessa pieni ja systeemin aikavakioiden suuria. Askel- tai impulssivastemallia käytettäessä tulee myös sovellettavan kohteen olla avoimen piirin stabiili. (Camacho & Bordons 2004, s. 9–16)

Askelvasteen määrittämisessä prosessiin tehdään kaavan (9) mukaisesti askel ja prosessin levosta lähtevä vaste mitataan (10). Vasteen transientin oletetaan loppuvan ja vasteen tasaantuvan uuteen arvoon jonkin äärellisen ajan n kuluessa. Vasteen arvot poimitaan suoraan mallin parametrien arvoiksi kaavan (11) vektoriin, jota kutsutaan äärellisen askelvasteen malliksi. Kaavassa (12) on yleinen muoto ennusteelle hetkellä k (Camacho & Bordons 2004, s. 14–15; Agachi ym. 2017, s. 43–48):

$$\mathbf{u} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T, u(k) = \begin{cases} 0, & k < 0 \\ 1, & k \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{y} = [0 \ y(1) \ y(2) \ y(3) \ \dots \ y(n-1) \ y(n) \cong y(n-1) \ \dots], \quad (10)$$

$$\mathbf{s} = [s(1) \ s(2) \ s(3) \ \dots \ s(n)]^T, \quad (11)$$

$$\hat{y}(k|k) = \sum_{i=1}^{n-1} s(i)\Delta u(k-i) + s(n)u(k-n), \quad (12)$$

missä $s(k)$ on askelvastemallin kerroin hetkellä k ,
 \mathbf{s} on äärellisen askelvasteen mallin kertoimet ja
 $\hat{y}(k|k)$ on ennuste hetkellä k .

Oletus prosessin levosta ennen askelta ohjausmuuttujaan ei ole aina toteutettavissa ja ilman matemaattista mallia prosessista se voi olla haastavaa. Askelvastemalli voidaan määrittää myös kokeellisesta datasta ja erilaisista sisäänmeno sekvensseistä. Huomiota tulee kuitenkin kiinnittää suoritettavien askeleiden suuruuteen. Askeleen ollessa liian suuri ajaututaan epälineariselle alueelle ja mikäli askel on liian pieni, se häviää kohinaan ja häiriöön. (Moon & Lee 2009)

Ennusteyhtälö yhden tulon ja lähdön prosessille askelvastemallin avulla on esitettynä kaavassa (13), joka voidaan jakaa aikaisemmista sisäänmenoista riippuvaan vapaaseen vasteeseen ja tulevista sisäänmenoista seuraavaan pakotettuun vasteeseen (Lee ym. 1994; Agachi ym. 2017, s. 51–53):

$$\hat{\mathbf{y}}(k+1|k)_{p \times 1} = \mathbf{y}(k+1|k-1)_{p \times 1} + \mathbf{S}_{p \times c} \Delta u(k)_{c \times 1} + \mathbf{b}(k+1|k)_{p \times 1}, \quad (13)$$

missä $\hat{\mathbf{y}}(k+1|k)$ on ennuste hetkellä k ja \mathbf{b} on virhe ennusteen ja mittauksen välillä.

Askelvastemalli ja ennuste on yksinkertainen muuttaa monimuuttuja tapaukseen. Tällöin tarvitaan malli jokaisesta ohjattavasta suureesta jokaiseen mitattavaan vasteeseen. Ennuste yhtälöön voidaan myös lisätä askelvastemalli kuvaamaan tunnettua häiriötä, mikäli sellainen on prosessista mitattavissa. (Moon & Lee 2009; Agachi ym. 2017, s. 51–53)

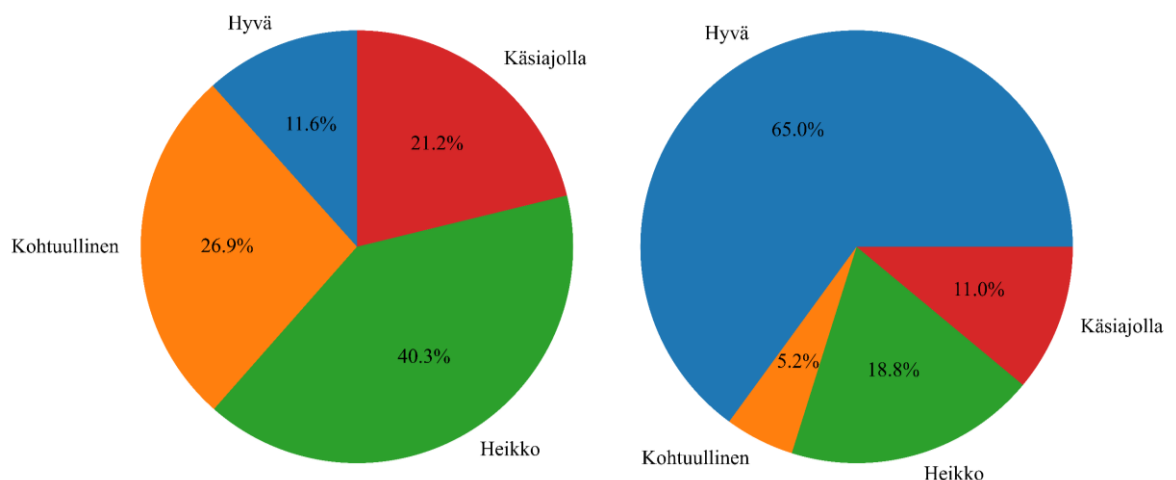
5 SÄÄDINTEN TOTEUTUS

Kappaleessa esitellään testeissä käytettävien säätimien toteutus ja kuvataan algoritmien toiminta. Kappaleessa käsitellään myös Stora Enson Heinolan tuotantolaitoksen automaation nykytila. Testausympäristöön toteutetut rajapinnat ja tiedonsiirrossa käytettävät menetelmät esitellään kappaleen lopussa.

5.1 Nykytila

Stora Enson omistuksessa oleva Heinolan flutingtehdas on integroitu sellu- ja kartonkitehdas, jossa tuotetaan aallotuskartonkina tunnettua puolikemiallista flutingia aaltopahviteollisuuden käyttöön. Vuonna 1961 perustettu tuotantolaitoksen vuotuinen kapasiteetti on 300 000 tonnia ja henkilöstömäärä 190. (Stora Enso 2022)

Heinolan flutingtehtaalla on käytössä Valmetin toimittama hajautettu ohjausjärjestelmä Valmet DNA, jonka sisälle kaikki säädöt ylätasoa mukaan lukien on toteutettu. Järjestelmä sisältää kokonaisuudessaan noin 900 säätöpiiriä. Lähes kaikki toteutetuista säädöistä on PID-tyyppisiä ja niistä valtaosa on PI-säätimiä. Käytössä on myös yksittäisiä muita säätöjä. Kuvassa 8 on säädön suorituskyvyn analyysi vuosien 2016 ja 2022 heinäkuulta. Vuoden 2016 suorituskyvyn analyysi on tehty Moilasan (2016) käsittelemällä Stora Enson CPE-työkalulla (control performance evaluation) ja vuoden 2022 analyysi on toteutettu Grafanassa vertailemalla mittausta asetusarvoon. (Luukkainen 2022)



Kuva 8. Säätöjen suorituskyvyn analyysi Heinolan flutingtehtaalla. Vasemmalla heinäkuu 2016 (mukaiillen Moilanen 2022) ja oikealla heinäkuu 2022 (mukaiillen Luukkainen 2022).

Vuoden 2022 tuloksissa kriteerinä säätöpiirien luokittelussa on käytetty asetusarvon ja mittauksen erotuksen keskiarvoa. Säätvirheen ollessa keskimäärin 3–10 prosenttia on säätö luokiteltu kohtuulliseksi, ja mikäli se on alle kolme prosenttia se luokitellaan hyväksi ja vastaavasti yli 10 prosentin säätövirhe heikoksi. Vuodet eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään, sillä vuoden 2016 tuloksissa luokittelun kriteereinä on käytetty myös muita mittareita. Suurin painoarvo vuoden 2016 tuloksissa on asetusarvon ja mittauksen erotuksella. Säätvirheen osalta vuonna 2016 säätö on luokiteltu kohtuulliseksi sen ollessa keskimäärin yhden ja neljän prosentin välillä. Jos se on alle yhden prosentin se luokitellaan hyväksi ja edelleen yli neljän prosentin säätövirhe taas heikoksi. Vuoden 2022 tarkastelussa on myös datan saatavuuden parantumisen myötä suurempi määrä säätöpiirejä tarkastelussa.

Vuoden 2022 heinäkuussa hyväksi luokiteltujen säätöpiirien määrää voi verrata vuoden 2016 heinäkuun hyväksi ja kohtuulliseksi luokitteluihin. Keskiarvoltaan alle kolmen prosentin säätövirheen säätöpiirien lukumäärä on kasvanut vuodesta 2016, joka viittaa säätöpiirien suorituskyvyn tason parantumiseen. Käsiäjolla olevien säätöpiirien suhteellinen määrä on myös laskenut selvästi vuodesta 2016.

Säätöpiirien asettaminen käsiäjolle tiedostetaan johtuvan heikosta virityksestä sekä instrumentoinnin kunnosta. Säätöpiirien ylläpidon on havaittu vaativan selkeät vastuut ja työnkulun, joka voidaan ratkaista ennakkohuoltojen ja tiiviimpien tarkastelujen avulla. Säätöpiirien seuranta sekä ylläpito vaatii työntekijältä osaamista säätötekniikasta ja ymmärrystä prosessiteollisuudessa tapahtuvista ilmiöstä. Vaatimukset täyttävää työvoimaa on ollut haastava löytää. (Luukkainen 2022)

Ylemmän tason säädöt vaativat toimiakseen perustason säätöjen kunnossapitoa. Säätöpiirien kunnossapidolla tiedostetaan olevan suora vaikutus myös prosessin laatuun, tehokkuuteen ja turvallisuuteen. Ympäristöarvot ovat Stora Ensolla tärkeitä ja ne pyritään huomioimaan kaikessa toiminnassa. Säätöpiirien kunnossapidolla on suora vaikutus myös ympäristöön, kuten minimoimalla energiankulutus sekä säädöistä johtuvat hävikkiä ja päästöjä aiheuttavat ylikaadot säiliöistä. (Luukkainen 2022)

5.2 PID-säädin

Testeissä implementoitava PID-säädin on Python ohjelmointikielellä toteutettu Martin Lundbergin (Github 2021) *simple-pid*-moduuli, joka on julkaistu vapaasti käytettäväksi. Säädin on toteutettu luokkamuotoisesti, joka mahdollistaa selkeän rakenteen ja modulaariset ratkaisut. Säätimen yksinkertaisen rakenteen takia Python standardikirjastosta säätimen käyttöön tarvitaan vain *time*-moduuli säädön aikavälin määrittämiseen sekä *warnings*-moduuli varoitusten määrittämiseen.

Säädin on toteutettu rinnakkaisrakenteisena, jolloin säätimen termeillä on omat vahvistuskertoimet, eivätkä ne ole vuorovaikutuksessa toisiinsa. Derivointitermi määritetään oletuksena suoraan mittauksesta. Suhdetermille määrittäminen mittauksesta on valinnainen, eikä oletuksena valittu. Säätimen toteutus esitetään kaavassa (14):

$$u(k) = K_P e(k) + (I(k-1) + (K_I e(k)h)) - K_D \frac{y(k) - y(k-1)}{h}, \quad (14)$$

missä

- y on vaste,
- I on integrointitermi,
- $e(k)$ on erosuure,
- h on näyteväli,
- k on näyteindeksi,
- $u(k)$ on säätimeltä lähtevä ohjaus,
- K_P on suhdetermin vahvistuskerroin,
- K_I on integrointitermin vahvistuskerroin ja
- K_D on derivointitermin vahvistuskerroin.

Määritettävät viritysparametrit säätimen käyttöönotossa ovat vahvistuskertoimet P, I ja D termeille sekä säädön aikaväli. Kaavan (14) vahvistuskertoimet korvaavat kappaleessa 4.1. käsitellyt integrointiajan ja derivointiajan. Säätimeen on lisäksi kehitetty rakenne, jolla voidaan rajoittaa siltä lähtevän ohjauksen arvo. Integraalitermin ajautumista on myös estetty asettamalla raja-arvot sen suuruudelle. Käytettävien funktioiden rakenteita tai säätimen viritysparametreja on selkeän rakenteen ansiosta mahdollista muokata tarpeen mukaan.

Testeissä säädintä käytetään PI-muotoisena, joka saadaan asettamalla derivointitermin vahvistuskerroin nolaksi. Säätimen viritys toteutetaan kokeellisesti Lambda- viritysmenetelmällä avoimen piirin askelvasteesta, mutta saatuja viritysparametrejä hienosäädetään edelleen optimaalisemman toiminnan saavuttamiseksi.

5.3 Sumea PI-säädin

Sumean säätimen toteutuksessa käytetään *SciPy*-paketille toteutettua *scikit-fuzzy*-kirjastoa (Github 2022). Kirjasto hyödyntää suurelta osin *NumPy*-pakettia. Säädin on toteutettu Mamdani-tyyppisenä, joten ohjaussuure on sumeutettu ja erillinen täsmällistäminen kuuluu säätimen rakenteeseen.

Scikit-fuzzy sisältää useita erillisiä funktioita, joilla voidaan nopeuttaa säätimen toimintaan saattamista. Esimerkiksi jäsenyysastefunktioiden määrittäminen on mahdollista automatisoida kokonaan asettamalla vain niiden lukumäärän tai käyttää erilaisia funktioita, joille parametrien avulla saadaan määritettyä haluttu muoto.

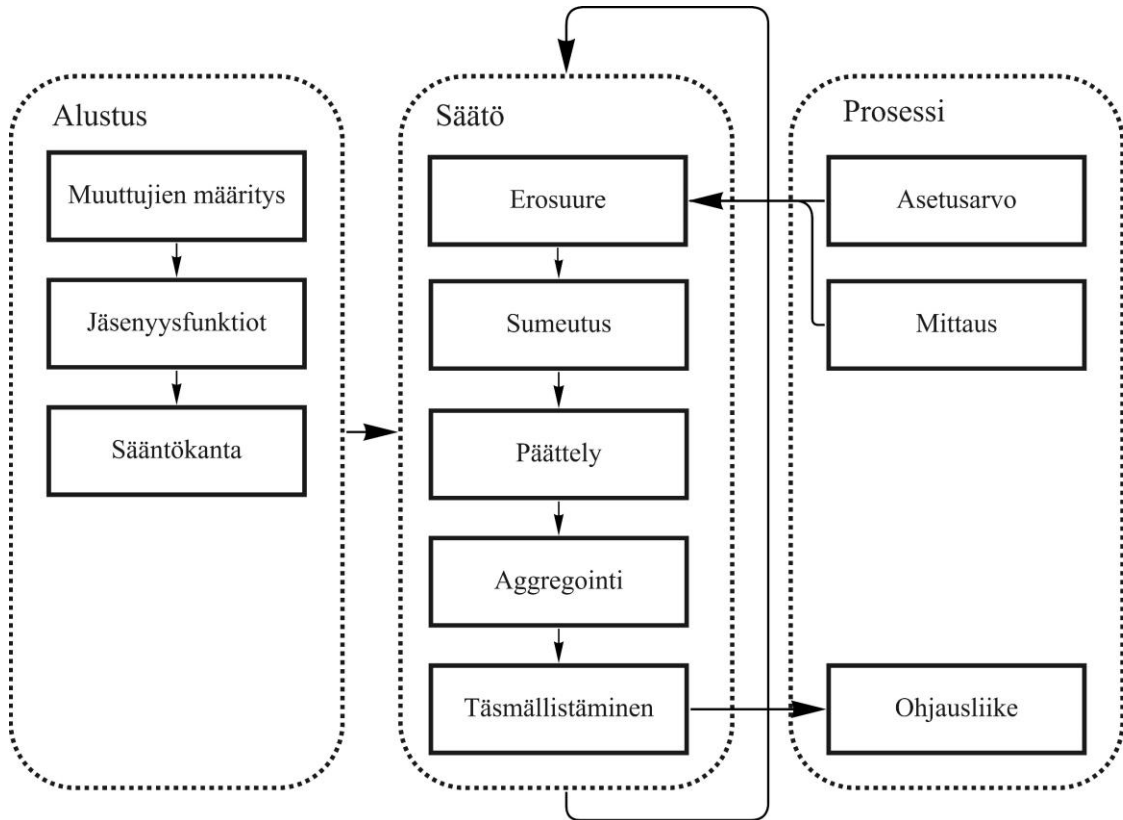
Testeissä käytettävä säädin on sumea PI-säädin. Siinä säätimen tulomuuttujina käytetään erosuuretta ja erosuureen muutosta. Säätimen lähtönä on ohjausmuutos. Sumea PI-säädin vastaa kaavassa (6) esitettyä inkrementtitilaa PID-säätimeistä, kun derivointitermi jätetään pois. Toteutettu säädin esitetään kaavassa (15):

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_I e(k), \quad (15)$$

missä $\Delta u(k)$ on ohjausmuutos ja $\Delta e(k)$ on erosuureen muutos.

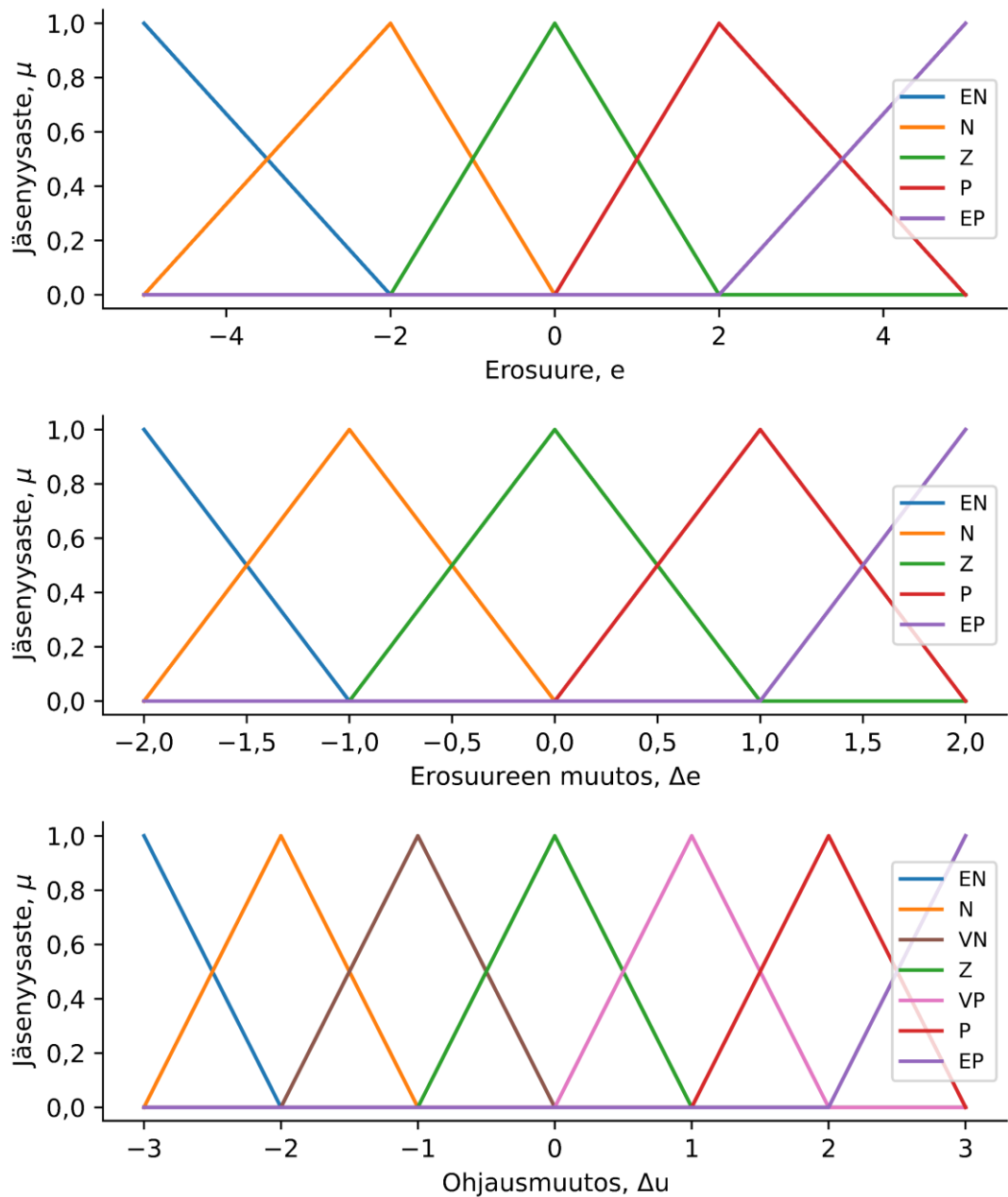
Ensimmäinen vaihe säätimen toteutuksessa on luoda säädössä käytettävät muuttujat ja asettaa niiden arvoille haluttu arvoasteikko. Tämän jälkeen muuttujille generoidaan halutun malliset jäsenyysastefunktiot ja toteutetaan tavoiteltavan toiminnan mukainen sääntökanta. Implikaatiomenetelmänä yksittäisen säännön lähdön määrittämisessä käytetään minimi-operaattoria. Sääntökannan tuottamat toimenpiteet on mahdollista aggregoida erilaisilla tavoilla, mutta tässä tapauksessa käytetään maksimi-menetelmää. Täsmällistäminen toteutetaan tässä säätimessä painopistemenetelmällä.

Kuvassa 9 on sumean PI-säätimen algoritmin rakenne lohkokaaaviona. Sumean säätimen algoritmin sisältämän alustuksen toimenpiteet määrietykset tehdään vain kerran, kun säädintä implementoidaan kohteeseen. Säätoosio toimii jatkuva-aikaisesti ja siinä tapahtuvat toimenpiteet suoritetaan jokaisena säädön aikavälin määrittämällä ajanhetkellä.



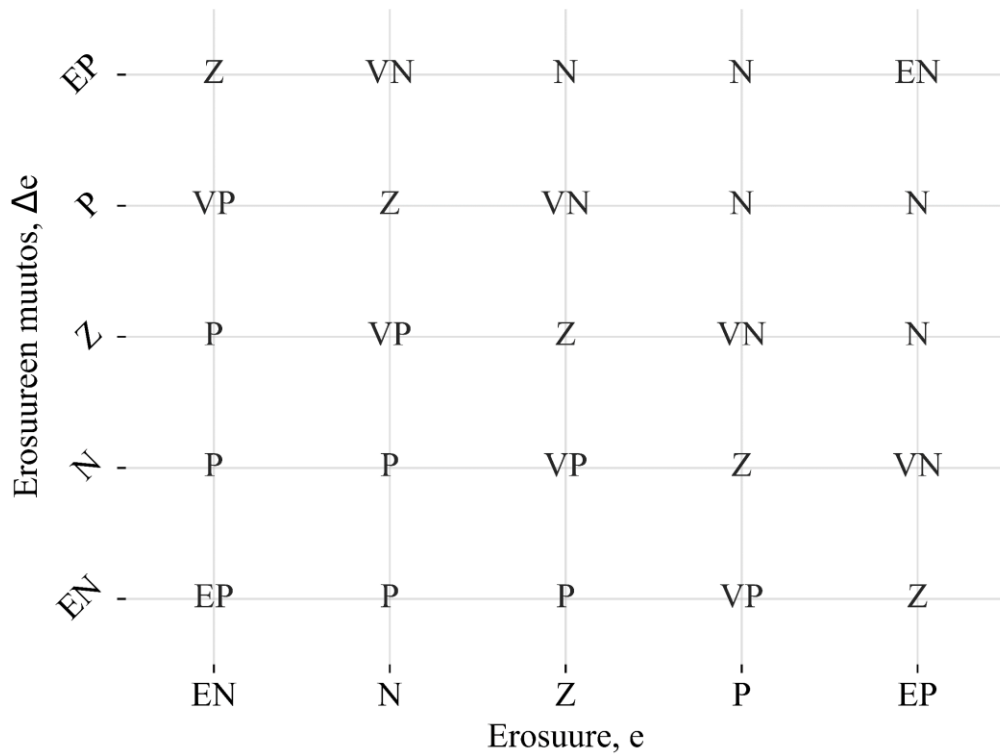
Kuva 9. Sumean PI-säätimen algoritmin rakenne lohkokaaaviona.

Kuvassa 10 on säätimessä käytettävät muuttujat ja niiden jäsenyysastefunktioit. Kaikkien muuttujien jäsenyysastefunktioit on toteutettu kolmikulmaisina. Erosuureella ja erosuureen muutoksella on samat lingvistiset arvot: erittäin negatiivinen (EN), negatiivinen (N), lähellä nollaa (Z), positiivinen (P) ja erittäin positiivinen (EP). Ohjausmuutoksella on niiden lisäksi lingvistiset arvot vähän negatiivinen (VN) ja vähän positiivinen (VP).



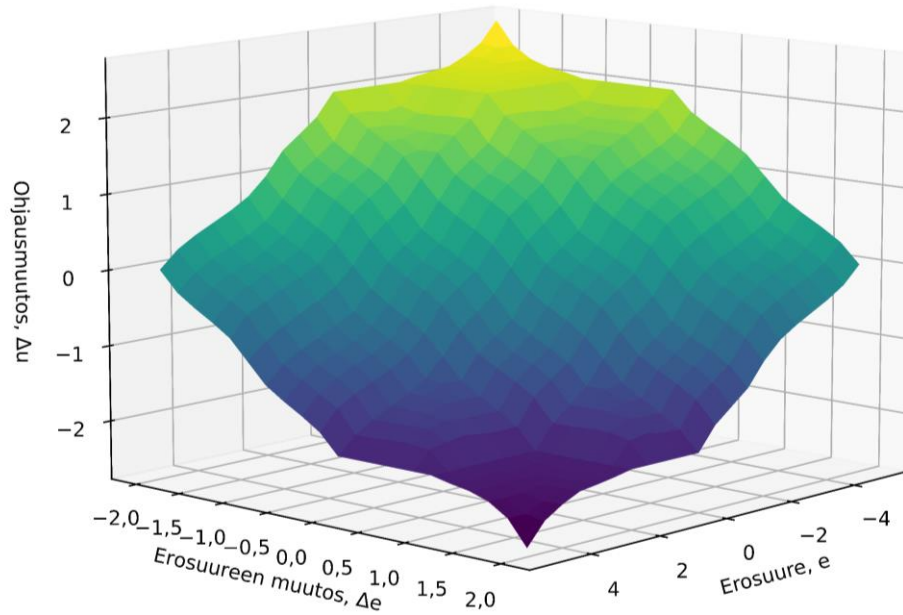
Kuva 10. Toteutetun sumean PI-säätimen muuttujien jäsenyysastefunktiot.

Säätimen säätökanta on toteutettu systemaattisesti ja esitetty kuvassa 11. Kuvan vasemmalla pystyrivillä erosuureen muutoksen jäsenyysastefunktiot ja alhaalla vaakarivillä erosuureen jäsenyysastefunktiot. Niiden risteämiskohdissa eri tilanteissa aktivoituu ohjausmuutoksen jäsenyysastefunktio.



Kuva 11. Toteutetun sumean PI-säätimen sääntökanta.

Sääntökannalla ja jäsenyysastefunktiolla vaikutetaan säätimen toimintaan. Nämä ovat myös ensisijaiset keinot säätimen viritykseen ja mahdollistavat muokkauksen säätimen vastepintaan. Käyttämällä skaalauskerroimia voidaan toteutettu säädin siirtää eri kohteisiin ja säilyttää aiemmin määritetty vastepinta. Kuvassa 12 toteutetun sumean PI-säätimen vastepinta.



Kuva 12. Toteutetun sumean PI-säätimen vastepinta.

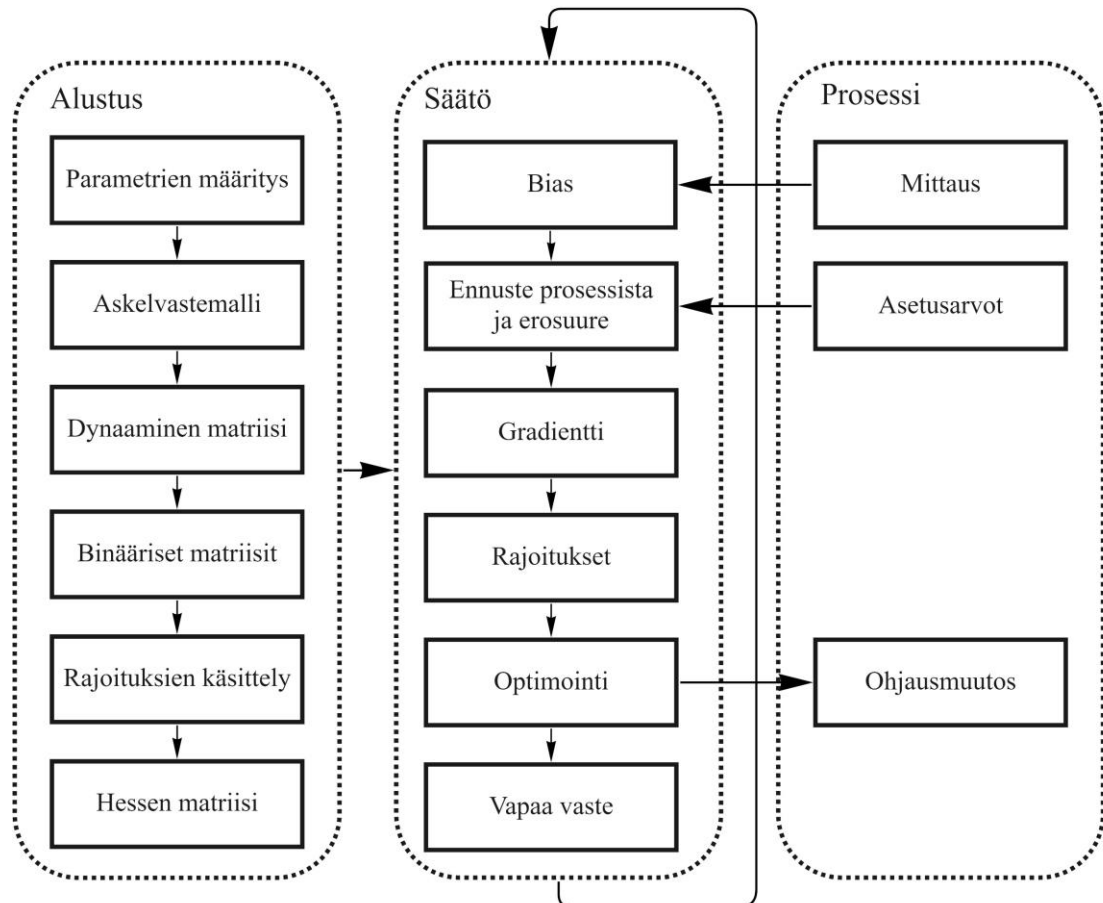
5.4 Mallipredikttiivinen säätö

Toteutettu mallipredikttiivinen säädin noudattaa suurelta osin Ikosen (2017) esittämän QDMC-algoritmin rakennetta. Algoritmi on tässä työssä ohjelmoitu Python-ohjelmointikielellä ja se on tarkoitettu yhden tai useamman ohjaussuureen ja vasteen sisältävään prosessiin. Toteutuksessa hyödynnetään pääosin *NumPy*-pakettia. Säätimen sisältämässä optimoinnissa käytetään *CVXOPT*-paketin kvadraattista optimointialgoritmia. Lisäksi käytössä on *time*- ja *warnings*-moduulit.

Säätimen rakenne voidaan jakaa alustukseen ja jokaisena säädön aikavälin ajanhetkenä määritettävään säätöosioon. Alustuksessa ensimmäinen vaihe on määrittää askelvastemalli jokaisesta toimilaitteesta jokaiseen mittalaitteen vasteeseen. Askelvastemalli määritetään suorittamalla yksikköaskel jokaiseen toimilaitteeseen ja tallentamalla mitatut vasteet. Vaste tulee mitata samalla aikavälillä kuin säädössä käytettävä aikaväli. Askeleen ollessa suuruudeltaan suurempi tai pienempi kuin yksikköaskel, tulee vaste skaalata ennen käyttöönottoa.

Säätimen alustuksessa määritetään myös kaikki komponentit, joita ei tarvitse alustuksen jälkeen päivittää. Dynaaminen matriisi on askelvastemallin kertoimista koostettu alakolmiomatriisi ja sitä käytetään gradientin määrittämisessä, osana kvadraattisen

ohjelmoinnin Hessen matriisia ja vasteiden rajoitusten käsittelyssä. Binääriset matriisit ovat diagonaali- ja alakolmiomatriiseja, joita käytetään rajoitusten käsittelyssä ohjausmuutoksen ja ohjauksen raja-arvoille. Binäärisiin matriiseihin kuuluvat myös matriisit, joilla päivitetään prosessin vapaa vaste ja poimitaan siitä ennustushorisontin määrittämä ajanjakso. Kuvassa 13 on työssä toteutetun algoritmin rakenne lohkokaaavana.



Kuva 13. Toteutetun QDMC-algoritmin rakenne lohkokaaavana.

Säättö toimii jatkuva-aikaisesti ja sen sisältämät laskennat toteutetaan säätövälein jokaisena ajanhetkenä. Säättöosassa ensimmäiseksi määritetään bias, joka on mittauksen ja askelvastemallin avulla määritetyn prosessin vapaan vasteen erotus. Ennusteen mahdollinen virhe saadaan korjattua summaamalla bias-termi vapaaseen vasteeseen. Erosuureen ja gradientin määrittämisen jälkeen suoritetaan optimointi ohjaushorisontin määrittämille ohjausliikkeille, joista ensimmäinen implementoidaan prosessiin. Seuraavaa säätöä varten määritetään järjestelmän vapaa vaste uudelleen.

Optimointiongelma muodostuu kaavan (16) mukaan, joka muotoillaan kvadraattiselle optimointialgoritmille sopivaan muotoon. Kustannusfunktio minimoidaan epäyhtälö muotoisten rajoitusten alaisena:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \mathbf{u}} J \\ J &= \boldsymbol{\gamma}^T \boldsymbol{\gamma} + \Delta \mathbf{u}^T \boldsymbol{\alpha} \Delta \mathbf{u}, \\ \mathbf{A} \Delta \mathbf{u} &\leq \mathbf{b} \end{aligned} \quad (16)$$

missä J on kustannus,
 $\boldsymbol{\gamma}$ on erosuure,
 $\Delta \mathbf{u}$ on ohjausmuutos,
 $\boldsymbol{\alpha}$ on ohjausmuutoksen painotuskerroin,
 \mathbf{A} on alustuksen jälkeen muuttumaton osa rajoitusten käsittelyä ja
 \mathbf{b} on rajoitusten päivittyvä osa.

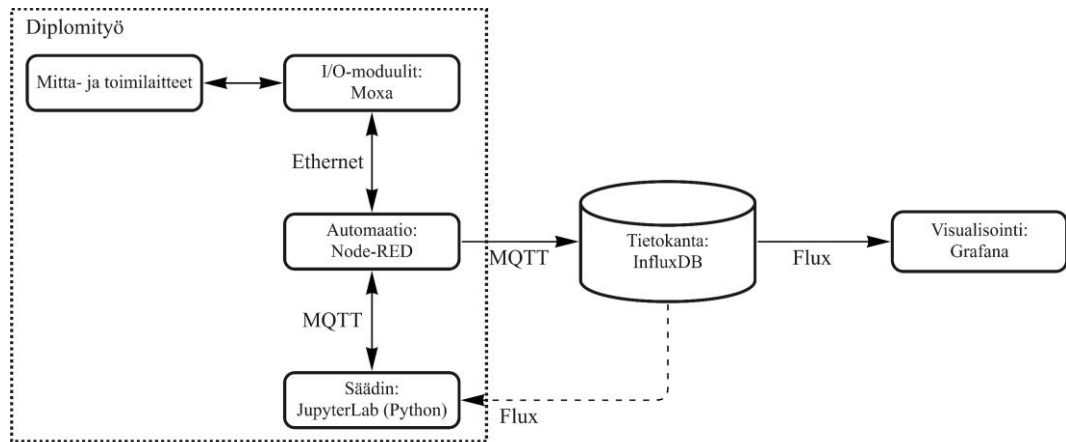
Algoritmi on ohjelmoitu luokkamuotoisesti ja komponenttien määritykset on toteutettu omiin funktioihin, joita pääohjelmasta kutsutaan. Säätimeen on viritysparametreina ohjelmoitu ennustushorisontti, ohjaushorisontti ja painotuskerroin ohjausmuutokselle. Rajoituksia säädettävällä prosessilla on mahdollista asettaa ohjauksen muutosnopeudelle sekä ohjauksen ja vasteen raja-arvoille. Vasteiden rajoitukset on mahdollista pehmentää ja kustannusfunktioon voidaan asettaa rangaistuskerroin pehmenettyjen rajoitusten rikkomisesta. Muita implementoidessa määritettäviä parametreja ovat ohjaussuureiden ja vasteiden lukumäärä, askelvastemallin dimensio sekä säädön aikaväli.

5.5 Tiedonsiirto ja rajapinnat

Tiedonsiirto sovelluksien välillä on pääosin toteutettu MQTT-viestinnällä (MQ telemetry transport), joka on ensisijaisesti koneiden väliseen viestintään tarkoitettu, julkaise ja tilaa (publish-subscribe) -pohjainen protokolla (MQTT 2022). Teollisuudessa yleisesti käytettävä OPC UA oli toinen vaihtoehto toteuttaa tiedonsiirto, mutta yksinkertaisen sovelluskohteen takia päädyttiin käyttämään kevyempään MQTT-protokollaa.

Automaatiojärjestelmää kuvaava Node-RED on ethernet-verkkokaapelilla yhteydessä I/O-moduuleihin. Node-RED julkaisee MQTT-viesteinä mittaustiedot, joita tietokanta ja säätimet tilaavat. Säätimet toimivat selainpohjaisessa JupyterLab-kehitysympäristössä.

Säätimien määrittämä ohjausliike julkaistaan automaatiota ja tietokantaan tallennusta varten. Kuvassa 14 on rajapinnat ja tiedonsiirrossa käytettävät menetelmät. Kuvassa on rajattu diplomityössä käytettävä osa järjestelmää.



Kuva 14. Rajapinnat ja tiedonsiirrossa käytettävät menetelmät. Katkoviiva tietokannasta Python-lohkoon kuvaa työssä esiteltävien tuloksien tiedonsiirtoa.

Tiedon tallennuksessa käytetään InfluxDB tietokantaa, joka on alustana kehitetty erityisesti aikasarjadataa varten. Reaaliaikaisen tarkastelun mahdollistamiseksi Grafanaa käytetään lukemaan tietokantaa ja visualisoimaan mittausarvot, asetusarvot ja säätimien tuottamat ohjaukset. Diplomityössä esiteltävät tulokset on kuitenkin luettu tietokannasta ja ne on selkeyden vuoksi visualisoitu erikseen.

6 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

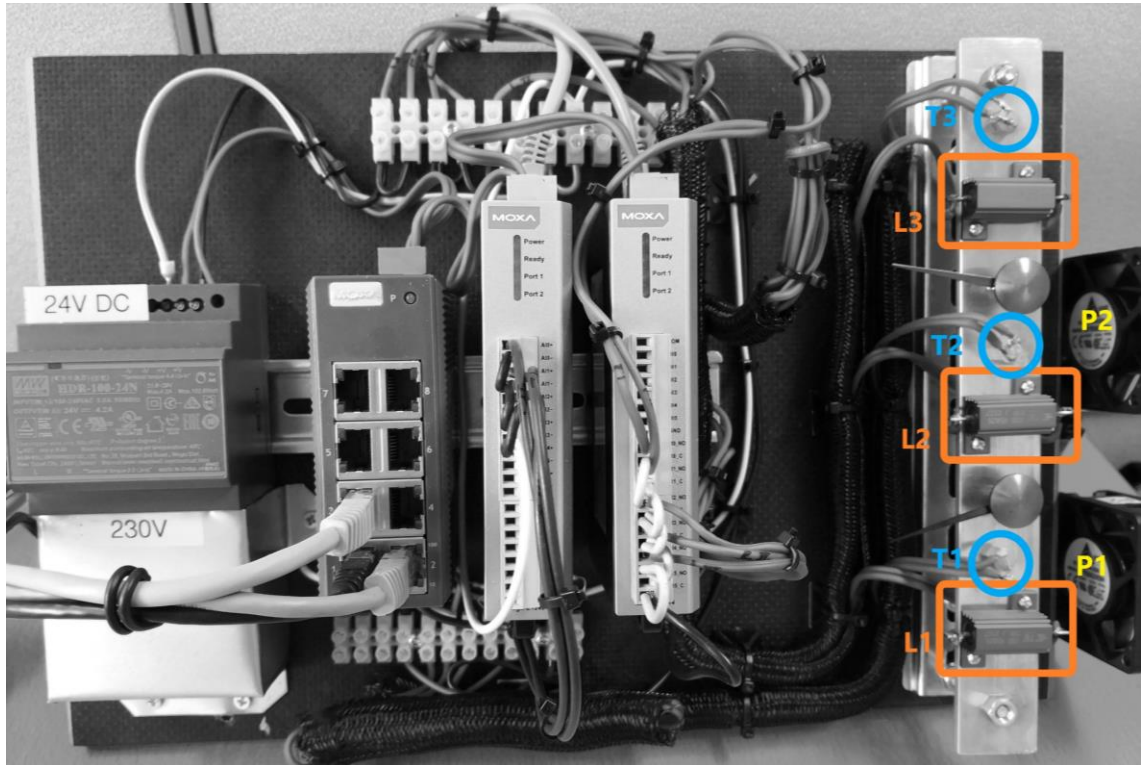
Kappaleessa esitellään testausympäristön rakenne ja eri säätimillä saavutetut säätötulokset. Tuloksien raportointi on jaettu yhden sekä kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötesteihin. Säätimillä saavutettujen tulosten vertailu sekä pohdinta käsitellään tulosten jälkeen. Lisäksi kappaleessa suunnitellaan säätimien ja säätöjärjestelmän jatkokehityskohteita.

6.1 Testausympäristö

Säädinten turvallisen testauksen mahdollistamiseksi toteutettiin testausympäristö. Siinä tavoitteena on säätää pituudeltaan noin 25,5 cm alumiinilatan lämpötilaa lämmitysvastusten avulla. Alumiinilatassa on kiinnitettyinä kolme lämmitysvastusta ja lämpötilamittaria. Lämmitysprosessit sisältävät tyypillisesti lämmönjohtumisesta seuraavaa viivettä, joka tulee ottaa ohjauksessa huomioon. Lämmitysvastukset eivät sijaitse vakioetäisyydellä lämpötilamittareista, jolloin muodostuva viive ei vastusten ja mittareiden välillä ole vakio. Ristikkäis vaikutus vastuksista eri mittareihin on alumiinilatan suhteellisen lyhyen pituuden takia voimakasta. Huomioitavaa on myös järjestelmän muuttuva dynamiikka lämmitettäessä ja jäähdytettäessä, sekä häviöiden kasvu lämpötilan noustessa. Työn ohjaajat Stora Ensolta toteuttivat ja suunnittelivat suuren osan instrumentoinnista ja testausympäristön tiedonsiirrosta.

Testausympäristössä käytettävät lämpömittarit ovat keskenään identtisiä ja toimintaperiaatteeltaan vastuslämpömittareita. Vastuslämpömittareiden muodostama resistanssi muuttuu lämpötilan mukaan, joka on mahdollista muuttaa celsiusasteiksi. Resistanssi on skaalattu lineaarisesti välille 130–0 celsiusastetta, jossa nolla on huoneenlämpötila eli noin 20 celsiusastetta. Skaalauksen todenmukaisuus toiminta-alueella on varmistettu optisella lämpömittarilla alumiinin pinnasta. Lämmitysvastukset ovat myös identtisiä ja niiden ohjaus on toteutettu kymmenportaisesti ja skaalattu välille 0–100 prosenttia. Ohjauksen arvon ollessa 10 on vastus päällä yhden sekunnin kymmenestä, kun ohjausta nostetaan kymmenellä on se aina yhden sekunnin pidempää päällä. Vastuksien ohjaukset pyöristetään järjestelmässä kymmeneen. Kuvassa 15 on toteutettu testausympäristö. Kuvaan on merkittynä oranssilla värillä lämmitysvastukset, jotka on nimetty alhaalta ylöspäin L_1 , L_2 ja L_3 . Lämpötilamittarit on merkitty kuvaan sinisellä, ja ne on nimetty alhaalta ylöspäin T_1 , T_2 ja T_3 . Testausympäristö sisältää myös

kaksi kuvaan keltaisella merkittyä puhallinta P_1 ja P_2 , joilla on mahdollista tuottaa jäähtyksen muodossa voimakasta häiriötä prosessiin. Puhaltimia ei käytetä testeissä.



Kuva 15. Toteutettu testausympäristö. Kuvan oikeassa reunassa sijaitsevat toimi- ja mittalaitteet. Lämpötilamittarit $T_{1,2,3}$ on merkitty sinisellä, lämmitysvastukset $L_{1,2,3}$ oranssilla ja puhaltimet $P_{1,2}$ keltaisella.

Testausympäristössä on käytössä 24 V tasajännite-muuntaja, joka rajoittaa jännitettä ja estää ajautumisen huomattavan korkeille lämpötiloille. Mittareiden, vastusten ja puhaltimien kytkentä on toteutettu Moxa E1214 ja E1240 I/O-moduuleilla, jotka kuuluvat Moxan E1200 sarjaan (Moxa 2022). Puhaltimien ja vastusten ohjaus on toteutettu releillä.

6.2 Sääto

6.2.1 Yksi toimi- ja mittalaite

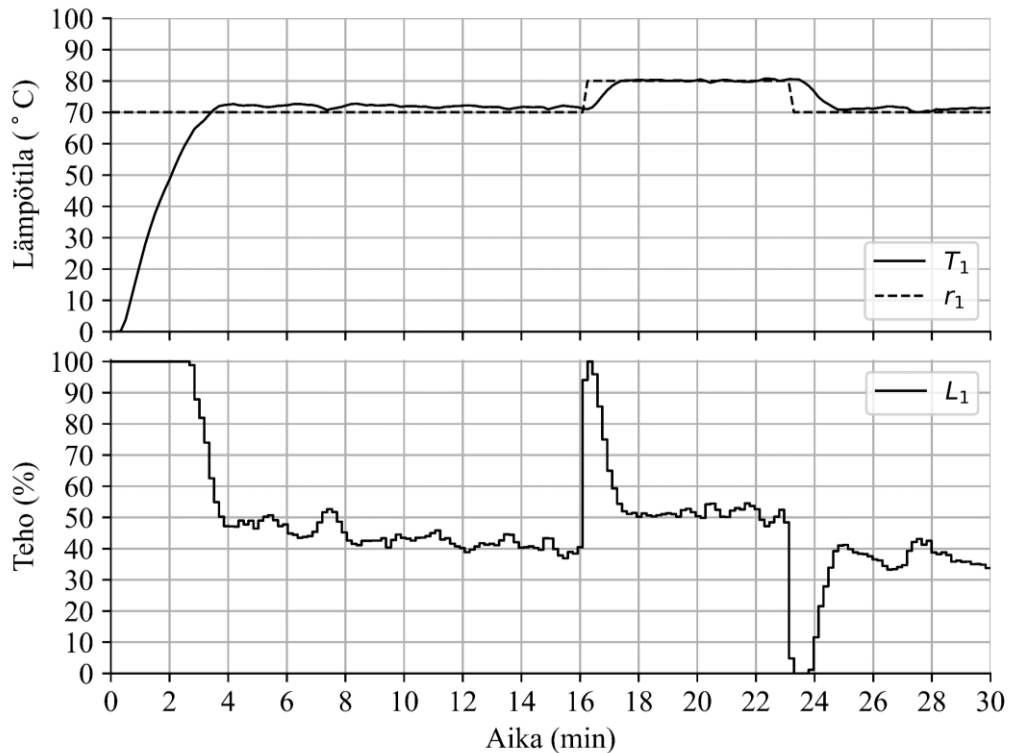
Testissä tarkoituksena on ohjata yhdellä lämmitysvastuksella yhtä lämpötilaa. Käytettävä toimilaite on L_1 ja mittalaite on T_1 . Aikavälin ohjauksen suuruus on rajoitettu välille 0–100 prosenttia, mutta ohjausmuutoksen suuruudelle ei ole asetettu rajoituksia. Säätojen aikaväli on säätoetissä 10 sekuntia. Testissä toteutetaan kolme kertaa muutos asetusarvoon. Ensimmäisessä ja suurimmassa muutoksessa lämpötila nostetaan järjestelmän ollessa huoneenlämpötilassa levossa ja vasteelle annetaan aikaa tasaantua.

Toisessa muutoksessa lämpötilaa nostetaan 10 astetta ja kolmannessa muutoksessa lämpötilaa lasketaan 10 astetta. Kahdessa jälkimmäisessä muutoksessa aikaikkuna on selvästi ensimmäistä lyhyempi. Taulukossa 2 on listattuna asetusarvossa r_I toteutetut kolme muutosta asetusarvoon ja muutosten aikaikkuna sekä suuruus.

Taulukko 2. Muutokset asetusarvossa r_I sekä muutosten aikaikkuna yhden toimi- ja mittalaitteen säätötestissä.

Parametri	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
Aetusarvo, r_I (°C)	70	80	70
Aikaikkuna (min)	0–16	16–23	23–30

PID-säädintä käytetään testeissä PI-muotoisena ja se on viritetty Lambda-viritysmenetelmällä. Käytetyt vahvistuskertoimet K_P on 5,9 ja K_I on 0,01. Kuvassa 16 on PI-säätimellä testausympäristössä yhden mittalaitteen T_I ja toimilaitteen L_I säätötestissä saavutettu säätötulos. Taulukossa 3 on listattuna PI-säätimen asettumisaika kahden $T_{S, 2\%}$ ja viiden $T_{S, 5\%}$ prosenttien putkiin, suurin prosentuaalinen ylitys δ_o tai alitus δ_u asetusarvon leikkaamisen jälkeen sekä keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE.



Kuva 16. PI-säädin yhden mittalaitteen T_1 ja toimilaitteen L_1 säätötestissä. Asetusarvo r_1 on aluksi 70 °C ja muuttuu 16 minuutin kuluttua 80 °C. Viimeinen muutos asetussarvossa on toteutettu 23 minuutin kuluttua, jolloin se lasketaan takaisin 70 °C. Ohjaussuure ja mitattu vaste on merkattu kuvaan yhtenäisellä viivalla. Asetusarvo on merkattu kuvaan katkoviivalla.

Taulukko 3. PI-säätimen asettumisaika T_S , suurin prosentuaalinen ylitys δ_o tai alitus δ_u asetussarvon leikkaamisen jälkeen sekä keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE. Yhden toimi- ja mittalaitteen säätötesti.

Tunnusluku	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
$T_{S,2\%}$ (min), T_1	Ei asetu	0,83	Ei asetu
$T_{S,5\%}$ (min), T_1	3,17	0,67	1,17
δ_o / δ_u (%), T_1	3,90	0,90	Ei alita asetussarvoa
MAE (°C), T_1	8,55	1,03	2,28
MSE (°C ²), T_1	360,20	5,60	12,73

Ensimmäisessä muutoksessa asetussarvo saavutetaan 3,5 minuutin kuluttua ja ylitys on suurimmillaan 3,9 prosenttia. Säätö ei ehdi poistamaan jatkuvuustilan virhettä ja

tasaantua kahden prosentin putkeen. Keskiarvoltaan virhe on 3,5–16 minuutin välillä 2,71 prosenttia. Ohjauksen trendi on hieman laskeva neljän minuutin jälkeen seuraavaan asetusarvon muutokseen asti, mutta mittauksessa merkittävää muutosta eroisuudessa ei näy.

Toisessa muutoksessa säädin tekee suuren askeleen ohjaukseen muuttuessa 40 prosentin tehosta suoraan 95 prosentin tehoon, käyden lopulta täydellä teholla. Ohjaus vakiintuu 18 minuutin jälkeen noin 50 prosentin teholle. Asetusarvo saavutetaan 1,17 minuutin kuluttua muutoksesta ja ylitys jää hyvin pieneksi ollen suurimmillaan 0,9 prosenttia. Pienen ylityksen ansiosta asettumisajat kahden ja viiden prosentin putkiin jäävät selvästi alle minuuttiin. Ensimmäisen muutoksen kaltaista säätövirhettä ei missään vaiheessa muodostu.

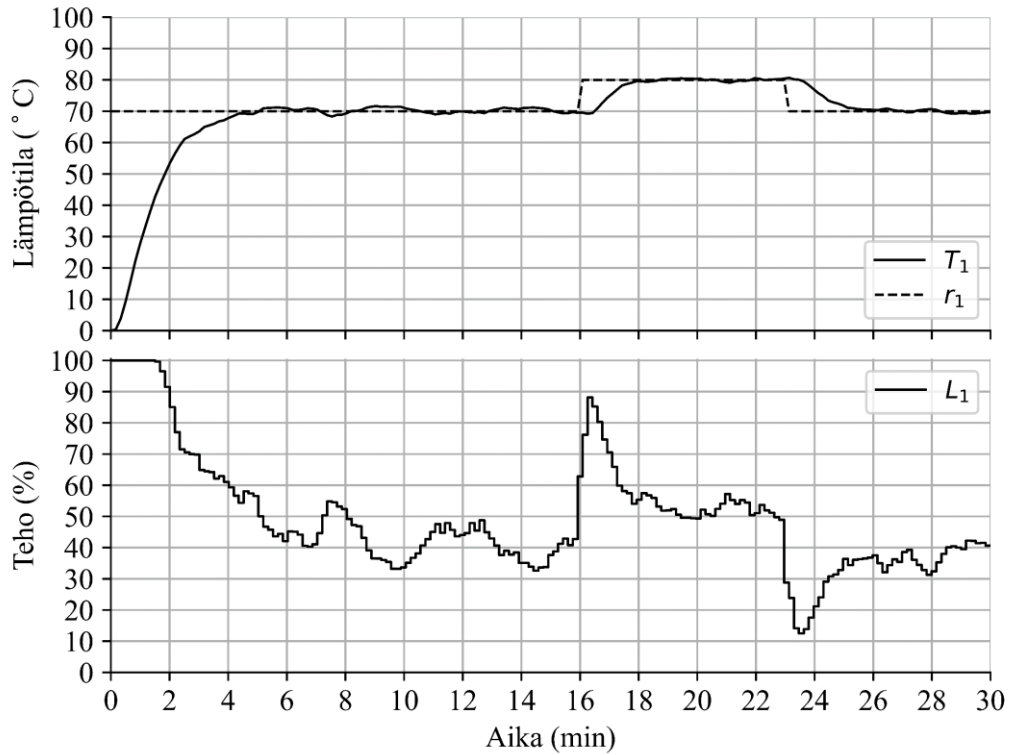
Kolmannessa muutoksessa ohjaus käy jälleen ääriasennossa ja menee hetkellisesti täysin kiinni. Mittaus ei kolmannessa muutoksessa käy asetusarvoa matalammissa lämpötiloissa. Säätö tasaantuu viiden prosentin putkeen reilussa minuutissa, mutta ei ehdi tasaantua kahden prosentin sisään. Säädin tekee suurempia korjausliikkeitä kuin toisen muutoksen aikana.

Sumean PI-säätimen sääntökanta ja jäsenyysastefunktiot on esitetty kokonaisuudessaan kappaleessa 5.3. Säädön toteuttamiseen käytettiin skaalauskerroimia eroisuuteen ja ohjausmuutokseen. Erosuure skaalataan sopivalle arvovälille jakamalla se viidellä. Ohjausmuutoksen skaalauskerroin muuttuu skaalaamattoman erosuureen itseisarvon suuruuden mukaan. Kaavassa (16) on ohjausmuutokseen käytettävät skaalauskerroimet:

$$K_{du} = \begin{cases} 50, & |e| > 40 \\ 10, & 40 > |e| > 10, \\ 5, & |e| < 10 \end{cases} \quad (16)$$

missä K_{du} on ohjausmuutoksen skaalauskerroin ja e on erosuure.

Kuvassa 17 on sumealla PI-säätimellä testausympäristössä yhden mittalaitteen T_I ja toimilaitteen L_I säätötestissä saavutettu säätötulos. Taulukossa 4 on listattuna sumean PI-säätimen asettumisaika kahden $T_{S, 2\%}$ ja viiden $T_{S, 5\%}$ prosentin putkiin, suurin prosentuaalinen ylitys δ_o tai alitus δ_u asetusarvon leikkaamisen jälkeen sekä keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE.



Kuva 17. Sumea PI-säädin yhden mittalaitteen T_I ja toimilaitteen L_I säätötestissä. Asetusarvo r_I on aluksi 70 °C ja muuttuu 16 minuutin kuluttua 80 °C. Viimeinen muutos asetusravossa on toteutettu 23 minuutin kuluttua, jolloin se lasketaan takaisin 70 °C. Ohjaussuure ja mitattu vaste on merkattu kuvaan yhtenäisellä viivalla. Asetusarvo on merkattu kuvaan katkoviivalla.

Taulukko 4. Sumean PI-säätimen asettumisaika T_S , suurin prosentuaalinen ylitys δ_o tai alitus δ_u asetusravon leikkaamisen jälkeen sekä keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE. Yhden toimi- ja mittalaitteen säätötesti.

Tunnusluku	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
$T_{S,2\%}$ (min), T_I	10	1,15	2
$T_{S,5\%}$ (min), T_I	3,67	1,17	1,33
δ_o / δ_u (%), T_I	2,41	1,15	1,13
MAE (°C), T_I	7,27	1,82	2,20
MSE (°C ²), T_I	310,88	13,07	14,82

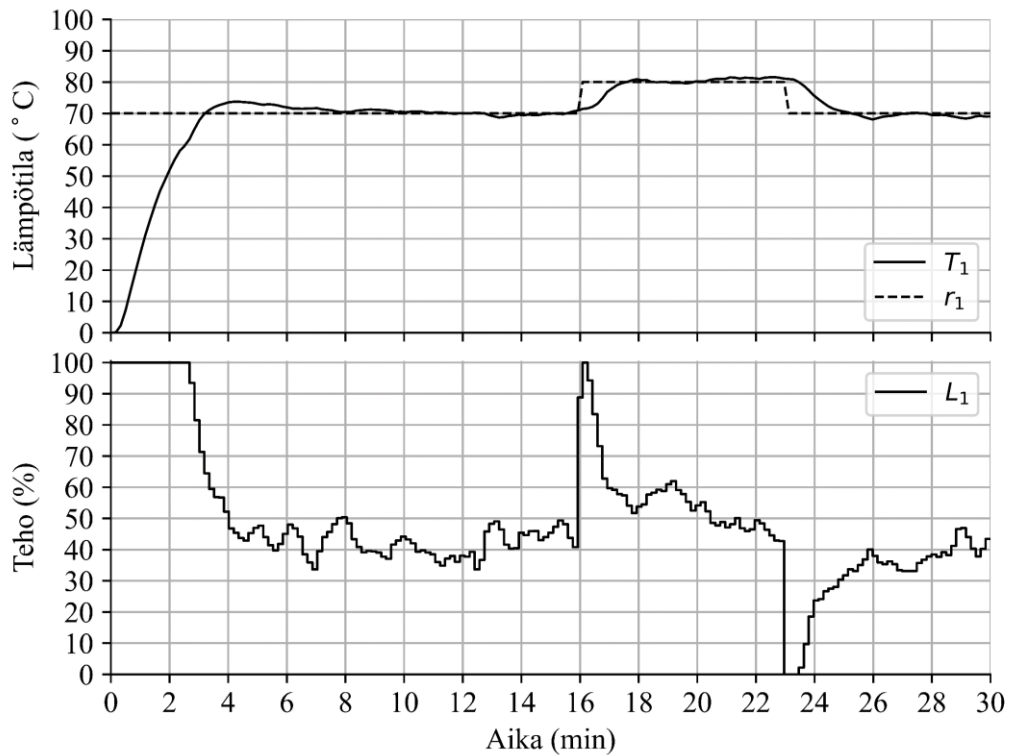
Ensimmäisessä muutoksessa asetusravo saavutetaan viiden minuutin kuluttua ja ero asetusravoon on suurimmillaan 2,41 prosenttia. Lämpötila ei tasaannu täysin

asetusarvoon, mutta virhe pysyy alle kahdessa prosentissa 10 minuutin jälkeen ja alle viidessä prosentissa 3,67 minuutin jälkeen. Ohjauksen trendi on laskeva ja säädin tekee useamman suuren korjausliikkeen.

Toisessa muutoksessa asetusrvo saavutetaan 2,6 minuutin kuluttua muutoksesta ja ero on tämän jälkeen suurimmillaan 1,15 prosenttia. Ohjaus nousee 88 prosentin tehoon 30 sekunnin kuluttua muutoksesta, jonka jälkeen laskee 50–60 prosentin tehoalueelle. Korjausliikkeet ovat huomattavasti ensimmäistä muutosta pienempiä. Kahden ja viiden prosentin putket saavutetaan alle 1,2 minuutin kuluttua muutoksesta

Kolmannessa muutoksessa asetusrvo alitetaan ensimmäisen kerran neljän minuutin kuluttua muutoksesta, alituksen pysyessä maltillisena. Suurimmillaan ero asetusrvoon sen saavuttamisen jälkeen on 1,13 prosenttia. Kahden prosentin putki saavutetaan kahdessa minuutissa ja viiden prosentin putki 1,33 minuutissa. Muutoksen aikana säädin käy hetkellisesti 12 prosentin teholla nousten 30–45 prosentin tehoalueelle, ohjauksen trendi on kuitenkin 24 minuutin jälkeen hieman nouseva.

Malliprediktiiviselle säätimelle käytettiin ennustushorisonttina arvoa kuusi ja ohjaushorisonttina arvoa kaksi. Painotuskerroin ohjausmuutoksille on 0,01. Askelvastemalli on määritetty 80 prosentin tehoista askeleesta ja skaalattu vasteen mittauksen jälkeen yksikköaskeleeksi. Kuvassa 18 on malliprediktiivisellä säätimellä testausympäristössä yhden toimilaitteen T_I ja mittalaitteen L_I säätötestissä saavutettu säätötulos. Taulukossa 5 on listattuna malliprediktiivisen QDMC-säätimen asettumisaika kahden $T_{S, 2\%}$ ja viiden $T_{S, 5\%}$ prosentin putkiin, suurin prosentuaalinen ylitys δ_o tai alitus δ_u asetusrvon leikkaamisen jälkeen sekä keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE.



Kuva 18. Malliprediktiiivinen QDMC-säädin yhden toimilaitteen T_I ja mittalaitteen L_I säätöttestissä. Asetusarvo r_I on aluksi 70 °C ja muuttuu 16 minuutin kuluttua 80 °C. Viimeinen muutos asetussarvossa on toteutettu 23 minuutin kuluttua, jolloin se lasketaan takaisin 70 °C. Ohjaussuure ja mitattu vaste on merkattu kuvaan yhtenäisellä viivalla. Asetusarvo on merkattu kuvaan katkoviivalla.

Taulukko 5. Malliprediktiiivisen QDMC-säätimen asettumisaika T_S , suurin prosentuaalinen ylitys δ_o tai alitus δ_u asetussarvon leikkaamisen jälkeen sekä keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE. Yhden toimi- ja mittalaitteen säätöttesti.

Tunnusluku	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
$T_{S,2\%}$ (min), T_I	7,16	1,17	6,33
$T_{S,5\%}$ (min), T_I	4,67	0,83	1,17
δ_o / δ_u (%), T_I	5,33	1,99	2,74
MAE (°C), T_I	7,58	1,62	2,15
MSE (°C ²), T_I	330,30	7,73	13,56

Pieni painotuskerroin ohjausmuutoksille ei rankaise suurista ohjausliikkeistä tai ohjausliikkeiden määrästä. Ohjaus käykin raja-arvoilla kaikkien muutoksien yhteydessä.

Ensimmäisessä asetusarvon muutoksessa mittaus ylittää asetusarvon 3,3 minuutin kuluttua ja ylitystä muodostuu 5,33 prosenttia. Mittaus tasaantuu kahden prosentin putkeen 7,16 minuutin jälkeen ja viiden prosentin putkeen 4,67 minuutin jälkeen. Neljän minuutin jälkeen ohjauksen taso vakiintuu 35–50 prosentin teholle, kuitenkin tehden korjausliikkeitä molempiin suuntiin.

Toisessa muutoksessa asetusarvo ylitetään 1,5 minuutin kuluttua ylityksen käydessä 1,11 prosentissa, mutta lähestyessä kolmatta muutosta ero hieman nousee ollen suurimmillaan 1,99 prosenttia. Kahden prosentin putki saavutetaan 1,17 minuutin kuluttua asetusarvon muutoksesta ja viiden prosentin putkeen päästään 0,83 minuutin kuluttua. Ohjaus muuttuu 20 sekunnin kuluttua muutoksesta kahdella askeleella 100 prosentin teholle, josta se putoaa 62–42 prosentin tehoalueelle. Ohjauksen trendi on laskeva 18 minuutin jälkeen, eikä ensimmäisen muutoksen kaltaista vakaampaa tasoa heti muodostu.

Kolmannessa muutoksessa asetusarvo alitetaan 2,2 minuutin kuluessa. Alitus käy suurimmillaan 2,74 prosentissa, jonka jälkeen säätö tasaantuu käyden kuitenkin kaksi kertaa yli kahden prosentin erotuksella asetusarvosta. Kahden prosentin putkessa pysytään 6,22 minuutin kuluttua asetusarvon muutoksesta ja viiden prosentin putkeen päästään 1,17 minuutin kuluttua. Asetusarvon muuttuessa ohjaus muuttuu yhdellä askeleella suoraan nollan prosentin teholle eli vastus lopettaa lämmityksen. Lämpötilan saavuttaessa asetusarvon on ohjauksen trendi nouseva.

6.2.2 Kolme toimi- ja mittalaitetta

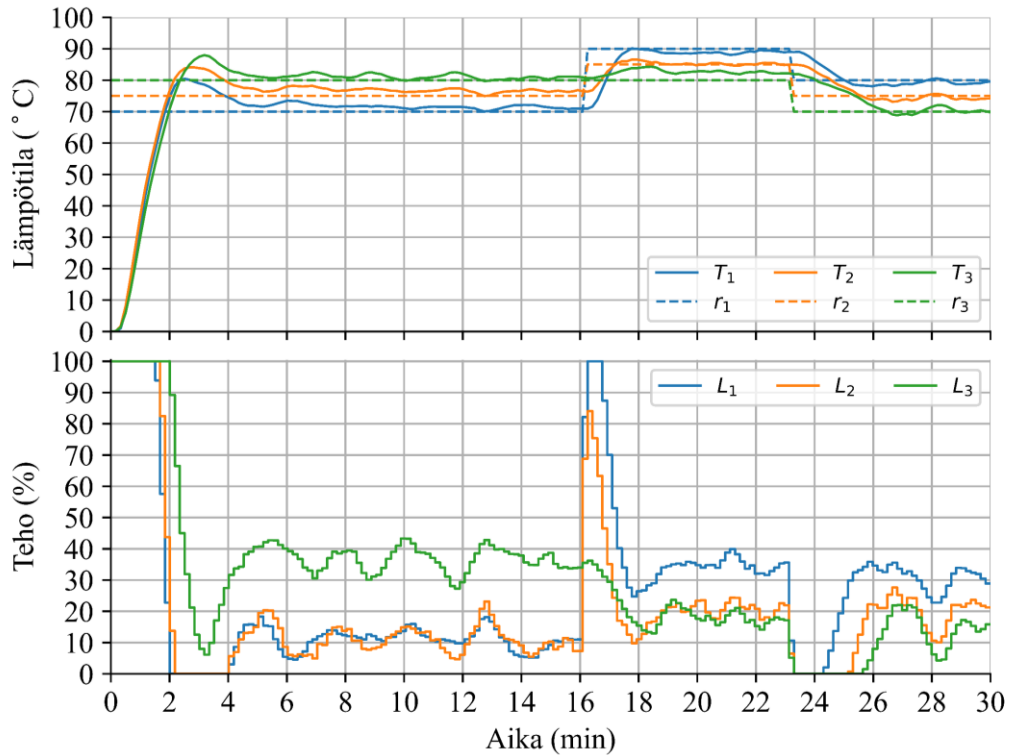
Testissä ohjataan kolmella lämmitysvastuksella kolmea lämpötilaa. Käytettävät toimilaitteet ovat L_1 , L_2 ja L_3 . PI- ja sumea säätö toteutetaan kolmella erillisellä säätimellä, jossa jokainen vastus säätää yhtä lämpötilaa T_1 , T_2 tai T_3 . Mallipredikttiivisellä säätimellä säätö toteutetaan monimuuttujasäätönä. Aikavälin ohjauksen suuruus on rajoitettu välille 0–100 prosenttia, mutta ohjausmuutokselle ei ole asetettu rajoituksia. Säätöjen aikavälinä kaikilla säätimillä on 10 sekuntia. Kaikkien testien lähtötilanteessa järjestelmä on levossa huoneenlämpötilassa. Testeissä toteutetaan kolme kertaa muutoksia asetusarvoihin. Ensimmäisessä ja suurimmassa muutoksessa lämpötilat nostetaan 70–80 celsiusasteeseen viiden asteen välein toisistaan. Toisessa muutoksessa kahta lämpötiloista nostetaan ja yksi pyrkii pitämään lämpötilansa. Kolmannessa muutoksessa kaikkia lämpötiloja lasketaan 10 astetta. Yhden toimi- ja mittalaitteen säätötestin kaltaisesti muutoksille kaksi

ja kolme on vähemmän aikaa. Taulukossa 6 listattuna asetusarvoissa r_1, r_2 ja r_3 toteutetut muutokset sekä muutosten aikaikkuna.

Taulukko 6. Muutokset asetusarvoissa $r_{1,2,3}$ sekä muutosten aikaikkuna kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä.

Parametrit	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
Asetusarvo, r_1 (°C)	70	90	80
Asetusarvo, r_2 (°C)	75	85	75
Asetusarvo, r_3 (°C)	80	80	70
Aikaikkuna (min)	0–16	16–23	23–30

PID-säätö toteututetaan kolmella säätimellä, jotka ovat kaikki PI-muotoisia. Viritys kaikille säätimille on toteutettu erikseen Lambda-viritysmenetelmällä. Ensimmäisen säätimen toimilaite on L_1 ja mittalaite on T_1 , siinä käytetty vahvistuskerroin K_P on 5,9. Toisen säätimen toimilaite on L_2 ja mittalaite on T_2 , siinä käytetty vahvistuskerroin K_P on 7,3. Kolmannen säätimen toimilaite on L_3 ja mittalaite on T_3 , siinä käytetty vahvistuskerroin K_P on 5,5. Vahvistuskerroin K_I on kaikilla säätimillä sama 0,01. Kuvassa 19 on PI-säätimillä testausympäristössä kolmen toimilaitteen $T_{1,2,3}$ ja mittalaitteen $L_{1,2,3}$ säätötestissä saavutettu säätötulos.



Kuva 19. PI-säätimet kolmen mittalaitteen $T_{1,2,3}$ ja toimilaitteen $L_{1,2,3}$ säätötestissä. Asetusarvot $r_{1,2,3}$ on asetettu aluksi viiden asteen välein 70–80 °C. Asetusarvot muuttuvat 16 minuutin kuluttua siten, että r_1 nousee 20 °C, r_2 nousee 10 °C ja r_3 pysyy muuttumattomana. Asetusarvot muuttuvat vielä 23 minuutin kohdalla, jolloin kaikki asetuservat $r_{1,2,3}$ laskevat 10 °C. Ohjaussuureet ja mitatut vasteet on merkattu kuvaan yhtenäisillä viivoilla. Asetuservat on merkattu kuvaan katkoviivoilla.

Taulukossa 7 on listattuna PI-säätimillä saavutetut asettumisajat kahden $T_{s,2\%}$ ja viiden $T_{s,5\%}$ prosenttien putkiin jokaiselle mitatulle vasteelle. Taulukon suurimmat prosentuaaliset ylitykset δ_o tai alitukset δ_u on määritetty asetuservon leikkaamisen jälkeen kaikissa muissa tapauksissa paitsi asetuservon muutoksessa kaksi vasteen T_2 osalta, jossa suurin ylitys tai alitus katsotaan koko muutoksen aikaikkunalta. Keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE on määritetty vaste- ja muutoskohtaisesti.

Taulukko 7. PI-säätimien asettumisajat T_S kahden ja viiden prosentin putkiin. Suurimmat prosentuaaliset ylitykset δ_o tai alitukset δ_u asetusarvon leikkaamisen jälkeen. Keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE määritettynä vaste- ja muutoskohtaisesti. Kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötesti.

Tunnusluku	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_1$	14,83	5,17	3,67
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_2$	Ei asetu	0,83	3,67
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_3$	12,17	Ei asetu	5,33
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_1$	6,17	1,00	1,17
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_2$	4,17	0,67	1,5
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_3$	4	2,5	2,5
$\delta_o / \delta_u (\%), T_1$	14,95	2,15	2,39
$\delta_o / \delta_u (\%), T_2$	12,11	1,83	2,45
$\delta_o / \delta_u (\%), T_3$	9,95	5,37	2,97
MAE (°C), T_1	7,16	2,90	2,18
MAE (°C), T_2	7,58	1,10	2,59
MAE (°C), T_3	8,02	2,56	3,60
MSE (°C ²), T_1	281,58	31,11	10,76
MSE (°C ²), T_2	317,44	5,31	15,51
MSE (°C ²), T_3	408,50	7,29	28,76

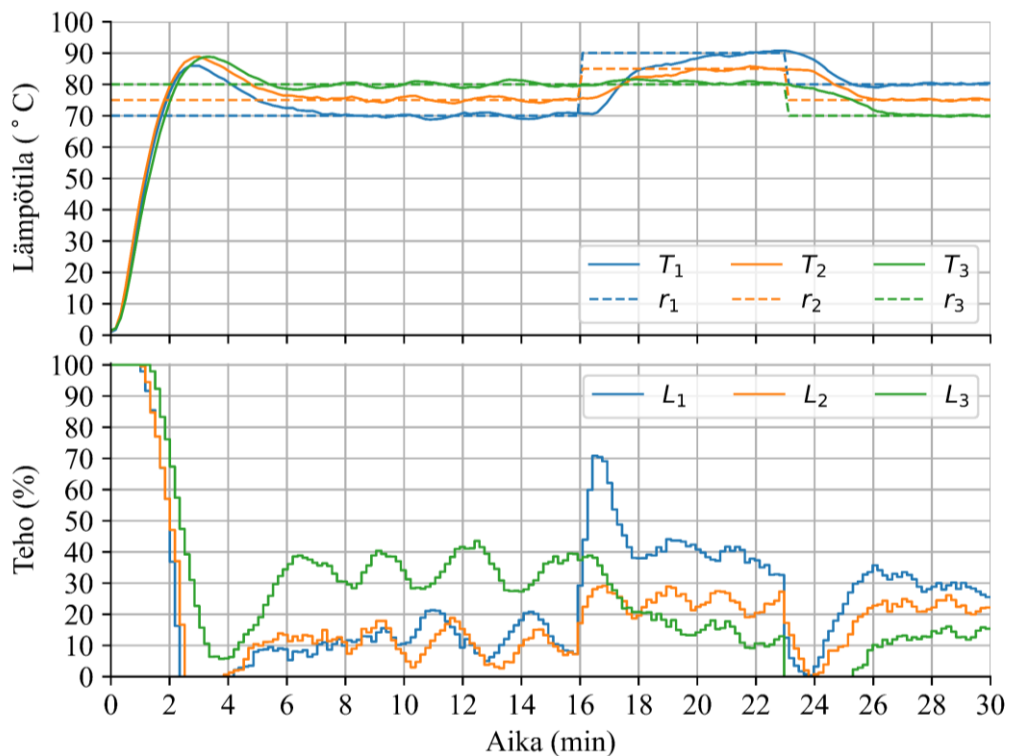
Ensimmäisessä muutoksessa kaikki säätimet muuttavat ohjauksen heti täydelle teholle. Toimilaitteista vastuksen L_1 teho lähtee laskemaan ensimmäisenä, 10 sekuntia ennen vastusta L_2 ja 30 sekuntia ennen vastusta L_3 . Ylitystä muodostuu kaikilla lämpötiloilla, mutta suurin ylitys on vasteella T_1 14,95 prosenttia. Ohjaukset vakiintuvat neljän minuutin jälkeen. Toimilaitteen L_3 teho vaihtelee vakiintumisen jälkeen noin 28–43

prosentin välillä. Vastusten L_1 ja L_2 tehot pysyvät lähes samoina, asettuen 5–25 prosentin tehoalueelle. Kaikki säätimet tekevät korjausliikkeitä vakiintumisen jälkeen, mutta lämpötilat pysyvät viiden prosentin putkessa. Vasteiden T_2 ja T_3 asettumisajat ovat 4,17 ja neljä minuuttia. Vasteen T_1 asettumisaika viiden prosentin putkeen on pisin 6,17 minuuttia. Kahden prosentin putkeen vaste T_2 ei asetu, mutta T_1 ja T_3 asettuvat 14,83 ja 12,17 minuutin kuluttua. Keskimääräinen absoluuttinen virhe ja keskineliövirhe on pienin vasteella T_1 .

Toisessa muutoksessa vastukset L_1 ja L_2 kasvattavat tehoa heti suurilla askeleilla, vastuksen L_1 jatkaessa seuraavalla säätöhetkellä täydelle teholle. Vastuksen L_3 teho lähtee laskemaan maltillisesti noin 30 sekuntia muutoksen jälkeen. Ylitystä vasteille T_1 ja T_2 muodostuu kahden prosentin molemmin puolin, mutta vasteen T_3 ylitys nousee yli viiden prosentin. Ohjaukset vakiintuvat noin 18 minuutin kuluttua, jolloin vastusten L_2 ja L_3 tehot ovat hyvin lähellä toisiaan noin 15–25 prosentin tehoalueella. Vastuksen L_1 teho on samalla alueella kuin vastuksella L_3 ensimmäisessä muutoksessa, kuitenkin korjausliikkeet ovat huomattavasti pienempiä. Ensimmäisen muutoksen tavoin kaikki lämpötilat pysyvät viiden prosentin putkessa. Vasteen T_1 asettumisaika viiden prosentin sisään on lyhin 0,67 minuuttia ja vasteen T_3 pisin 2,5 minuuttia. Kahden prosentin putkeen vaste T_3 ei asetu, mutta vasteet T_1 ja T_2 asettuvat 5,17 ja 0,83 minuutin kuluttua. Keskimääräisellä absoluuttisella virheellä ja keskineliövirheellä mitattuna parhaaseen tulokseen päästään vasteella T_2 .

Kolmannessa muutoksessa kaikki vastukset menevät muutoksen tapahtuessa hetkellisesti kiinni. Vastuksen L_1 teho lähtee nousemaan ensimmäisenä noin minuutti muutoksesta, jonka jälkeen vastusten L_2 ja L_3 tehot lähtevät nousemaan. Alitusta muodostuu kaikilla lämpötiloilla niiden pysyen kuitenkin alle kolmessa prosentissa. Ohjaukset eivät vakiinnu samalla tavalla kuin toisessa muutoksessa ja kaikki säätimet tekevät suuren korjausliikkeen 28 minuutin jälkeen. Korkeinta lämpötilaa ohjaavan vastuksen L_1 tehoalue pysyy lähes samana kuin muutoksessa kaksi 26 minuutin jälkeen. Vastusten L_2 ja L_3 tehot ovat edelleen hyvin lähellä toisiaan. Kaikilla vasteilla päästään tässäkin muutoksessa viiden prosentin putkiin. Kahden prosentin putkeen vasteet T_1 ja T_2 pääset samaan aikaan 3,67 minuutin kuluttua. Vasteella T_3 asettumisaika kahden prosentin putkeen on 5,33 minuuttia. Keskimääräisellä absoluuttisella virheellä ja keskineliövirheellä mitattuna parhaaseen tulokseen päästään vasteella T_2 .

Sumea säätö on testeissä toteutettu kolmella sumealla PI-säätimellä, jotka ovat keskenään identtisiä. Ensimmäisen säätimen toimilaitte on L_1 ja mittalaitte on T_1 . Toisen säätimen toimilaitte on L_2 ja mittalaitte on T_2 . Kolmannen säätimen toimilaitte on L_3 ja mittalaitte on T_3 . Sumeiden PI-säätimien säätökanta sekä jäsenyysastefunktiot on esitetty kokonaisuudessaan kappaleessa 5.3. Säädon toteuttamiseen käytettiin skaalauskerroimia eroisuureeseen ja ohjausmuutokseen. Erosuure skaalataan sopivalle arvovälille jakamalla se viidellä. Ohjausmuutoksen skaalauskerroin muuttuu skaalaamattoman eroisuureen itseisarvon suuruuden mukaan kaavan (16) mukaisesti. Kuvassa 20 on sumeilla PI-säätimillä testausympäristössä kolmen mittalaitteen $T_{1,2,3}$ ja toimilaitteen $L_{1,2,3}$ säätötestissä saavutettu säätötulos.



Kuva 20. Sumeat PI-säätimet kolmen mittalaitteen $T_{1,2,3}$ ja toimilaitteen $L_{1,2,3}$ säätötestissä. Asetusarvot $r_{1,2,3}$ on asetettu aluksi viiden asteen välein 70–80 °C. Asetusarvot muuttuvat 16 minuutin kuluttua siten, että r_1 nousee 20 °C, r_2 nousee 10 °C ja r_3 pysyy muuttumattomana. Asetusarvot muuttuvat vielä 23 minuutin kohdalla, jolloin kaikki asetuservat $r_{1,2,3}$ laskevat 10 °C. Ohjaussuureet ja mitatut vasteet on merkattu kuvaan yhtenäisillä viivoilla. Asetusarvot on merkattu kuvaan katkoviivoilla.

Taulukossa 8 on listattuna sumeilla PI-säätimillä saavutetut asettumisajat kahden $T_{S, 2\%}$ ja viiden $T_{S, 5\%}$ prosentin putkiin jokaiselle mitatulle vasteelle. Taulukon suurimmat prosentuaaliset ylitykset δ_o tai alitukset δ_u on määritetty asetusarvon leikkaamisen jälkeen kaikissa muissa tapauksissa paitsi asetusarvon muutoksessa kaksi vasteen T_2 osalta, jossa suurin ylitys tai alitus katsotaan koko muutoksen aikaikkunalta. Keskimääräinen

absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE on määritetty vaste- ja muutoskohtaisesti.

Taulukko 8. Sumeiden PI-säätimien asettumisajat T_S kahden ja viiden prosentin putkiin. Suurimmat prosentuaaliset ylitykset δ_o tai alitukset δ_u asetusravon leikkaamisen jälkeen. Keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE määritettynä vaste- ja muutoskohtaisesti. Kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötesti.

Tunnusluku	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_1$	7,00	4,00	1,83
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_2$	5,83	3,33	2,33
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_3$	6,5	2	3
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_1$	5,5	2,33	1,5
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_2$	5	1,67	2
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_3$	4,5	0	2,67
$\delta_o / \delta_u (\%), T_1$	22,72	0,86	1,25
$\delta_o / \delta_u (\%), T_2$	18,37	0,88	0,73
$\delta_o / \delta_u (\%), T_3$	11,00	2,06	0,41
MAE (°C), T_1	7,23	5,23	2,17
MAE (°C), T_2	7,07	2,62	2,56
MAE (°C), T_3	7,49	0,75	3,09
MSE (°C ²), T_1	259,43	65,61	15,60
MSE (°C ²), T_2	279,96	15,95	18,89
MSE (°C ²), T_3	357,55	0,79	21,88

Ensimmäisessä muutoksessa kaikki säätimet muuttavat ohjauksen heti täydelle teholle ja lähtevät laskemaan 20 sekunnin sisällä toisistaan, vastuksen L_I ollessa ensimmäinen.

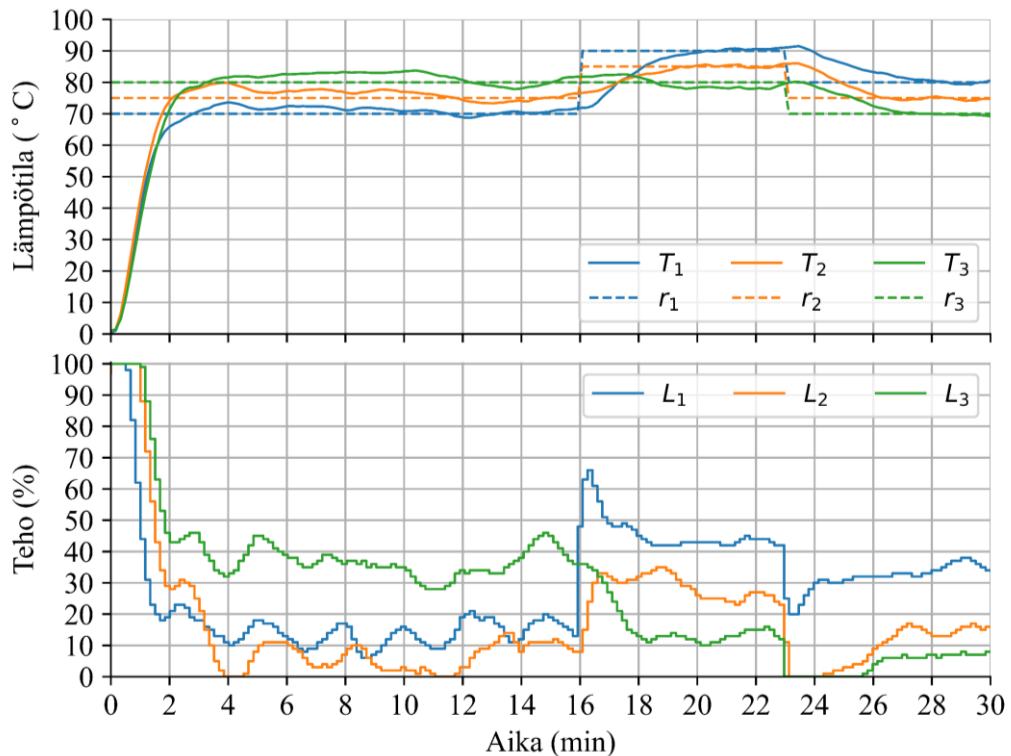
Kaikilla vasteilla ylitystä muodostuu reilusti. Vasteella T_1 ylitys nousee yli 20 prosentin. Vastusten L_2 ja L_3 ohjaukset vakiintuvat ensimmäisinä 5–21 prosentin tehoalueelle viiden minuutin kuluttua, tämän jälkeen ne tekevät lähes samat ohjausliikkeet pienellä vaiheerolla. Vastus L_1 vakiintuu kuuden minuutin jälkeen vaihdellen 28–33 prosentin tehoalueella. Kaikki vasteet pääsevät ja pysyvät viiden prosentin putkessa, saavuttaen ne puolen minuutin välein toisistaan 4,5–5,5 minuutin välillä. Vasteen T_1 asettumisaika viiden prosentin putkeen on pisin 5,5 minuuttia. Kahden prosentin putkeen päästään myös kaikilla vasteilla, aikojen vaihdellessa 6,5 minuutista seitsemään minuuttiin. Keskimääräinen absoluuttinen virhe on pienin vasteella T_2 ja keskineliövirhe on pienin vasteella T_1 .

Toisessa muutoksessa vastus L_1 kasvattaa tehoa useammalla hieman suuremmalla askeleella nousten hetkellisesti 70 prosentin tehoon, josta se laskee noin 40 prosentin tehoon. Vastuksen L_2 teho nousee rauhallisesti 20–30 prosentin teholle, jossa se pysyy seuraavaan muutokseen asti. Vastuksen L_3 teho lähtee laskemaan noin 30 sekuntia muutoksen jälkeen ja trendi pysyy laskevana kolmanteen muutokseen asti. Ylitystä muodostuu vasteilla T_1 ja T_2 alle prosentti ja vasteella T_3 hieman yli kaksi prosenttia. Vasteet T_1 ja T_2 pääsevät viiden prosentin asettumisaikaan 2,33 ja 1,67 minuutissa. Kahden prosentin putkeen päästään myös kaikilla vasteilla, aikojen vaihdellessa kahden ja neljän minuutin välillä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe ja keskineliövirhe on pienin vasteella T_3 .

Kolmannessa muutoksessa toteutuessa kaikki vastukset käyvät hetkellisesti kiinni ja vakiintuvat omille tasoilleen noin 26 minuutin kuluttua. Vastusten L_2 ja L_3 tehot ovat lähes samalla tasolla kuin muutoksessa kaksi, mutta vastuksen L_1 teho on hieman aikaisempaa muutosta matalampi. Ero asetusravoon ei muodostu missään vaiheessa suureksi ja pysyy leikkaamisen jälkeen selvästi alle prosentissa vasteiden T_2 ja T_3 osalta. Vasteella T_1 suurin ero on 1,25 prosenttia. Vasteet pääsevät viiden prosentin asettumisaikaan 1,5–2,67 minuutin sisällä. Kahden prosentin putkeen päästään kaikilla vasteilla 1,83–3 minuutin sisällä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe ja keskineliövirhe on pienin vasteella T_1 .

Malliprediktiivinen säätö toteutettiin testissä monimuuttujasäätönä. Viritysparametreista ennustushorisonttina käytettiin arvoa 10 ja ohjaushorisonttina arvoa kaksi. Painotuskerroin ohjausmuutoksille on 0,2. Askelvastemallina käytettiin samaa mallia kuin yhden muuttujan testeissä, mutta nyt aikaisemmin pois jätetyt muiden mittalaitteiden

vasteet otetaan huomioon. Kuvassa 21 on malliprediktiivisellä säätimellä testausympäristössä kolmen mittalaitteen $T_{1,2,3}$ ja toimilaitteen $L_{1,2,3}$ säätötestissä saavutettu säätötulos.



Kuva 21. Malliprediktiivinen QDMC-säädin kolmen mittalaitteen $T_{1,2,3}$ ja toimilaitteen $L_{1,2,3}$ säätötestissä. Asetusarvot $r_{1,2,3}$ on asetettu aluksi viiden asteen välein 70–80 °C. Asetusarvot muuttuvat 16 minuutin kuluttua siten, että r_1 nousee 20 °C, r_2 nousee 10 °C ja r_3 pysyy muuttumattomana. Asetusarvot muuttuvat vielä 23 minuutin kohdalla, jolloin kaikki asetukset $r_{1,2,3}$ laskevat 10 °C. Ohjaussuureet ja mitatut vasteet on merkattu kuvaan yhtenäisillä viivoilla. Asetusarvot on merkattu kuvaan katkoviivoilla.

Taulukossa 9 on listattuna malliprediktiivisellä QDMC-säätimellä saavutetut asettumisajat kahden $T_{S,2\%}$ ja viiden $T_{S,5\%}$ prosenttien putkiin jokaiselle mitatulle vasteelle. Taulukon suurimmat prosentuaaliset ylitykset δ_o tai alitukset δ_u on määritetty asetustarvon leikkaamisen jälkeen kaikissa muissa tapauksissa paitsi asetustarvon muutoksessa kaksi vasteen T_2 osalta, jossa suurin ylitys tai alitus katsotaan koko muutoksen aikaikkunalta. Keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE on määritetty vaste- ja muutoskohtaisesti.

Taulukko 9. Malliprediktiivisen QDMC-säätimen asettumisajat T_S kahden ja viiden prosenttien putkiin. Suurimmat prosentuaaliset ylitykset δ_o tai alitukset δ_u asetustarvon

leikkaamisen jälkeen. Keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE määritettynä vaste- ja muutoskohtaisesti. Kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötesti.

Tunnusluku	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_1$	Ei asetu	3,17	3,83
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_2$	13,17	2,83	2,83
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_3$	Ei asetu	6,67	3,33
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_1$	4,17	2,17	2,5
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_2$	4,5	1,5	2,17
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_3$	2,33	0	2,67
$\delta_o / \delta_u (\%), T_1$	5,18	1,12	0,89
$\delta_o / \delta_u (\%), T_2$	6,52	1,12	1,22
$\delta_o / \delta_u (\%), T_3$	4,67	3,15	1,20
MAE (°C), T_1	5,87	4,53	3,76
MAE (°C), T_2	6,45	2,23	3,00
MAE (°C), T_3	7,89	1,69	3,28
MSE (°C ²), T_1	239,97	53,24	28,20
MSE (°C ²), T_2	270,376	12,04	23,01
MSE (°C ²), T_3	362,84	3,14	23,57

Ensimmäisessä muutoksessa kaikki säätimet muuttavat ohjauksen yhdellä askeleella täydelle teholle ja lähtevät laskemaan 30 sekunnin sisällä toisistaan. Vastuksen L_1 teho laskee ensimmäisenä 40 sekunnin kuluttua, jonka jälkeen vastukset L_2 ja L_3 lähtevät laskemaan lähes samaan aikaan. Vastusten L_1 ja L_2 tehot vakiintuvat omille tasoilleen noin kolmen minuutin kuluttua, tehden maltillisia ohjausliikkeitä. Vastus L_2 käy hetkellisesti kiinni noin neljän sekä 11 minuutin kohdilla ja tehon ollessa selvästi vastusta

L_1 matalampi. Kaikki lämpötilat pääsevät viiden putkeen, mutta kahden prosentin putkessa pysyy vain vaste T_2 . Ylitystä muodostuu kaikilla lämpötiloilla ja suurin ylitys on vasteen T_2 6,52 prosenttia, muiden ylityksien ollessa viiden prosentin molemmin puolin. Vasteet pääsevät viiden prosentin asettumisaikaan 2,33–4,5 minuutin sisällä. Vasteen T_2 asettumisaika viiden prosentin putkeen on pisin 4,5 minuuttia. Kahden prosentin putkeen ei päästä vasteilla T_1 ja T_3 . Keskimääräinen absoluuttinen virhe ja keskineliövirhe on pienin vasteella T_1 .

Muutoksessa kaksi vastus L_1 nousee 30 sekunnin aikana 66 prosentin teholle, jonka jälkeen laskee noin 18 minuutin kuluttua reilun 40 prosentin tehoon tehden vain pieniä ohjausliikkeitä. Vastuksen L_2 teho nousee rauhallisesti ensin reiluun 30 prosenttiin, mutta laskee 25 prosentin teholle 20 minuutin jälkeen. Vastuksen L_3 teho lähtee laskemaan noin 30 sekuntia muutoksen jälkeen hieman yli 10 prosentin teholle, jossa se pysyy seuraavaan muutokseen asti. Ylitystä vasteille T_1 sekä T_2 muodostuu 1,12 prosenttia ja vasteen T_1 ylitys on 3,15 prosenttia. Vasteen T_3 erosuure ei missään vaiheessa kasva yli viiden prosentin. Vasteet T_1 ja T_2 pääsevät viiden prosentin asettumisaikaan 2,17 ja 1,5 minuutissa. Kahden prosentin asettumisajat vasteilla on 3,17–6,67 minuutin sisällä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe ja keskineliövirhe on pienin vasteella T_3 .

Muutoksessa kolme vastukset L_2 ja L_3 käyvät hetkellisesti kiinni. Vastus L_1 vakiintuu reilun 30 prosentin teholle 24 minuutin jälkeen. Vastukset L_2 ja L_3 vakiintuvat 26 minuutin jälkeen noin 15 ja kahdeksan prosentin tehoille. Eroa asetusarvoon sen leikkauksen jälkeen vasteille T_2 ja T_3 muodostuu noin 1,22 ja 1,2 prosenttia. Vasteen T_1 ylitys pysyy alle prosentissa. Vasteet pääsevät viiden prosentin asettumisaikaan 2,5–2,67 minuutin sisällä. Kahden prosentin putkeen päästään kaikilla vasteilla 2,83–3,83 minuutin sisällä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe ja keskineliövirhe on pienin vasteella T_2 .

6.3 Vertailu

Yhden toimi- ja mittalaitteen säätötestin ensimmäisessä asetusarvon muutoksessa suurin ylitys muodostui malliprediktiivisellä QDMC-säätimellä. QDMC-säädin pysyi ohjauksen vakiinnuttua samalla tehoalueella, kun muiden säätimen tehon trendi oli laskeva. PI-säätimellä muodostunut jatkuvuustilan virhe ei poistunut muutoksen aikaikkunassa ja on ainoa säätömuoto, jolla säätövirhettä jäi. Sumea PI-säädin pysyi muita säätömuotoja lyhyemmän ajan täydellä teholla ja teho myös laski hitaammin kuin muilla säätimillä.

Toisessa ja kolmannessa muutoksessa säädinten välille ei muodostunut yhtä suurta eroa kuin ensimmäisessä. Toisessa muutoksessa PI- ja QDMC-säädin tekivät selvästi suurimmat ohjausliikkeet ja saavuttivat asetusrvon nopeimmin. PI-säädin löysi teholle oikean tason ja pysyi siinä seuraavaan asetusrvon muutokseen asti ilman merkittävää säätövirhettä. Muilla säätimillä ohjauksen trendi oli selvästi laskeva. Kolmannessa muutoksessa PI-säädin ei alittanut asetusrvoa tarkastellussa aikaikkunassa ja muidenkin säädinten alitus jäi hyvin maltilliseksi.

Taulukossa 10 on listattuna yhden toimi- ja mittalaitteen säätötestissä parhaiten suoriutuneet säätimet mitattuna asettumisajalla kahden $T_{S, 2\%}$ ja viiden $T_{S, 5\%}$ prosentin putkiin, prosentuaalisten ylityksien δ_o tai alitusten δ_u suuruudella, keskimääräisellä absoluuttisella virheellä MAE ja keskineliövirheellä MSE.

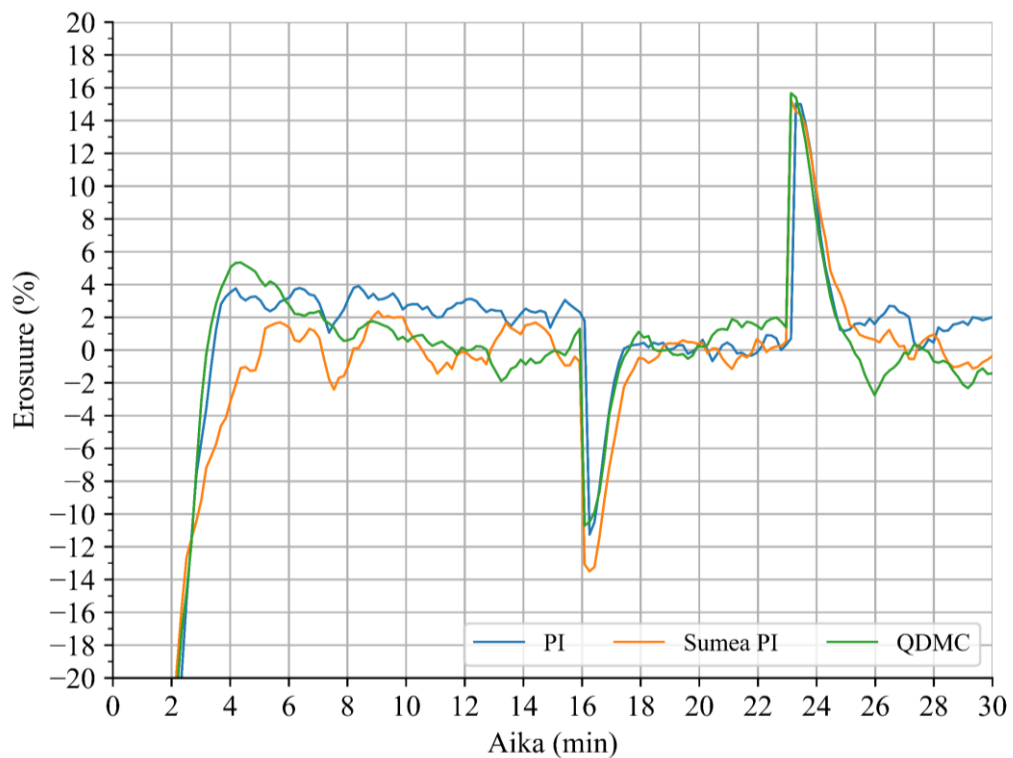
Taulukko 10. Asettumisajan T_S , suurimpien prosentuaalisten ylityksien δ_o tai alitusten δ_u , keskimääräisen absoluuttisen virheen MAE ja keskineliövirheen MSE perusteella parhaiten suoriutuneet säätimet. Yhden toimi- ja mittalaitteen säätötesti.

Tunnusluku	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
$T_{S, 2\%} (\text{min}), T_I$	QDMC	PI	Sumea PI
$T_{S, 5\%} (\text{min}), T_I$	PI	PI	PI ja QDMC
$\delta_o / \delta_u (\%), T_I$	Sumea PI	PI	Sumea PI
MAE ($^{\circ}\text{C}$), T_I	Sumea PI	PI	QDMC
MSE ($^{\circ}\text{C}^2$), T_I	Sumea PI	PI	PI

Tuloksista erottuu erityisesti PI-säätimen suorituskyky asetusrvon muutoksessa kaksi, sen ollen paras kaikilla käytetyillä mittareilla. Laskettaessa tunnuslukukohtaisia parhaita suorituksia koko testin ajalta PI-säätimellä on eniten parhaita suorituksia, jonka jälkeen tulee sumea PI-säädin. PI-säädin on kuitenkin ainoa säätömuoto, jolla ei päästy kaikissa muutoksissa kahden prosentin putkeen erosuureesta.

Keskineliövirhe korostaa suuria virheitä ja niille muodostuu suurempi painoarvo verrattuna keskimääräiseen neliölliseen virheeseen. Keskimääräisen absoluuttisen virheen ja keskineliövirheen mukaan sumea PI-säädin oli paras ensimmäisessä ja

suurimmassa muutoksessa, PI ja QDMC kolmannessa. Tarkasteltaessa koko testin ajalta keskimääräistä absoluuttista virhettä ja keskineliövirhettä sumea PI-säädin suoriutui molemmilla mittareilla parhaiten, sen MAE oli 4,82 °C ja MSE oli 172,31 °C². Toiseksi näillä mittareilla tuli QDMC, jonka MAE oli 4,92 °C ja MSE oli 181,13 °C². PI-säätimen MAE oli 5,31 °C ja MSE oli 198,31 °C². PI-säätimen osalta koko testiä tarkastellessa keskimääräistä absoluuttista virhettä ja keskineliövirhettä nostivat selvästi heikoin suoriutuminen ensimmäisestä asetusravon muutoksesta. Kuvassa 22 on erosuureet yhden toimi- ja mittalaitteen säätötestistä.



Kuva 22. Erosuureet yhden toimi- ja mittalaitteen säätötestistä. PI-säätimen MAE oli 5,37 °C ja MSE oli 198,31 °C². Sumean PI-säätimen MAE oli 4,82 °C ja MSE oli 172,31 °C². QDMC säätimen MAE oli 4,92 °C ja MSE oli 181,13 °C². Erosuureen mittakaava on -20–20 %.

Suuri ero erosuureista näkyy ensimmäisen muutoksen ajalta 0–16 minuutin aikaikkunalta. Sumean PI-säätimen erosuureen derivaatta oli selvästi muita säätimiä pienempi kahden minuutin jälkeen ennen asetusravon tasaantumista. Ensimmäisessä muutoksessa QDMC-säätimen erosuureen laskeva trendi eroaa selkeästi muista säätömuodoista. Asetusravon muuttuessa 16 minuutin kohdalla sumea PI-säädin reagoi muutokseen muita säätimiä hitaammin ja saavutti kahden prosentin putken viimeisenä. Sama käyttäytyminen ilmeni kolmannessa muutoksessa 23 minuutin kohdalla. Kolmannessa

muutoksessa erosuuretta tarkasteltaessa oli sumea PI-säädin ainoa, joka ei pysynyt kahden prosentin putkessa sen saavutettuaan.

Kolmen toimi- ja mittalaitteen testissä erot säätimien välillä oli suuremmat. Ohjausta tarkasteltaessa malliprediktiivinen QDMC-säädin käyttäytyi testissä muita säätimiä rauhallisemmin, eikä tehnyt yhtä suuria ohjausliikkeitä kuin muut säätimet asetusarvon muuttuessa. Yhden toimi- ja mittalaitteen testistä poiketen ensimmäisessä suuressa asetusarvon muutoksessa kaikilla vasteilla selvästi pienin ylitys muodostui QDMC-säätimellä, jonka takia se suoriutui vasteiden T_1 ja T_2 osalta parhaiten myös keskimääräisellä absoluuttisella virheellä ja keskineliövirheellä mitattuna. PI-säätimellä ei muodostunut samanlaista jatkuvuustilan virhettä kuin yhden toimi- ja mittalaitteen testissä, mutta säätö ei kaikkien vasteiden osalta täysin vakiintunut asetusarvoon.

Ensimmäisessä muutoksessa QDMC-säädin vakiintui kahden prosentin putken sisään yhden ja PI-säädin kahden vasteen osalta. Sumea PI-säädin on ainoa säätömuoto jolla siihen päästiin kaikilla kolmella vasteella. Ensimmäisen muutoksen aikaikkunassa 0–16 minuutin välillä vastusten L_1 ja L_2 tehot olivat hyvin samankaltaiset PI-säätimellä ja sumealla PI-säätimellä. QDMC-säätimellä vastuksen L_2 teho on selvästi vastusta L_1 matalampi. PI-säädin piti vastukset myös kolmen toimi- ja mittalaitteen testissä pisimpään täydellä teholla.

Toisessa muutoksessa PI-säädin käytti vastusten L_1 ja L_2 tehot selvästi muita säätömuotoja korkeammalle, jonka seurauksena myös vaste T_3 nousi. Sumea PI-säädin onnistui pitämään vasteen T_3 ohjauksen vakiintuessa lähimpänä asetusarvoa. Huomioitavaa on myös vastusten teho, sillä QDMC-säädin piti vastuksen L_1 tehon muita säätömenetelmiä korkeammalla ja L_3 tehon muita matalammalla. Yksittäisten vasteiden tunnusluvuilla mitattuna PI- ja sumea PI-säädin suoriutuivat parhaiten muutoksesta.

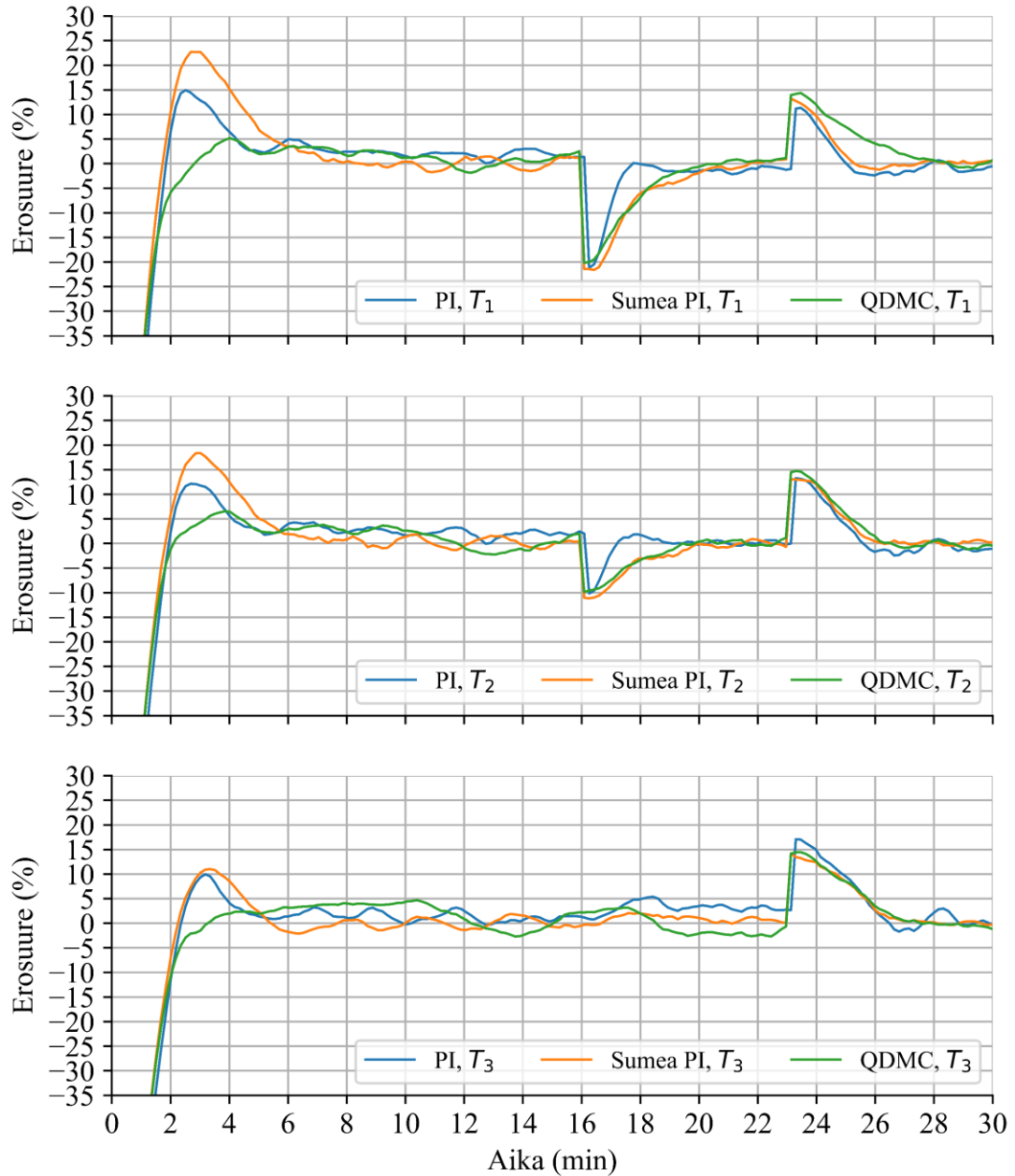
Kolmannessa muutoksessa oli sama ilmiö kuin aikaisemmissa asetusarvon muutoksissa, sillä PI-säädin teki suurimmat ohjausliikkeet. QDMC-säädin piti edelleen vastuksen L_1 tehon muita säätömuotoja korkeammalla, ja vastusten L_2 ja L_3 tehon muita matalammalla. Yksittäisten vastusten tunnusluvuilla mitattuna sumea PI-säädin erottui tässä muutoksessa suoriutumalla parhaiten suurimassa osassa tunnuslukuja.

Taulukossa 11 on listattuna parhaiten suoriutuneet säätimet kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä mitattuna asettumisajalla kahden $T_S, 2\%$ ja viiden $T_S, 5\%$ prosentin putkiin,

prosentuaalisten ylityksien δ_o tai alitusten δ_u suuruudella, keskimääräisellä absoluuttisella virheellä MAE ja keskineliövirheellä MSE. Kuvassa 23 on erosuureet säädin ja vaste kohtaisesti kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestistä.

Taulukko 11. Asettumisajan T_S , suurimpien prosentuaalisten ylityksien δ_o tai alitusten δ_u , keskimääräisen absoluuttisen virheen MAE ja keskineliövirheen MSE perusteella parhaiten suoriutuneet säätimet. Kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötesti.

Tunnusluku	Toteutettu muutos 1	Toteutettu muutos 2	Toteutettu muutos 3
$T_{S,2\%}(\text{min}), T_1$	Sumea PI	QDMC	Sumea PI
$T_{S,2\%}(\text{min}), T_2$	Sumea PI	PI	Sumea PI
$T_{S,2\%}(\text{min}), T_3$	Sumea PI	Sumea PI	Sumea PI
$T_{S,5\%}(\text{min}), T_1$	QDMC	PI	PI
$T_{S,5\%}(\text{min}), T_2$	PI	PI	PI
$T_{S,5\%}(\text{min}), T_3$	QDMC	Sumea PI ja QDMC	PI
$\delta_o / \delta_u (\%), T_1$	QDMC	Sumea PI	QDMC
$\delta_o / \delta_u (\%), T_2$	QDMC	Sumea PI	Sumea PI
$\delta_o / \delta_u (\%), T_3$	QDMC	Sumea PI	Sumea PI
MAE ($^{\circ}\text{C}$), T_1	QDMC	PI	Sumea PI
MAE ($^{\circ}\text{C}$), T_2	QDMC	PI	Sumea PI
MAE ($^{\circ}\text{C}$), T_3	Sumea PI	Sumea PI	Sumea PI
MSE ($^{\circ}\text{C}^2$), T_1	QDMC	PI	PI
MSE ($^{\circ}\text{C}^2$), T_2	QDMC	PI	PI
MSE ($^{\circ}\text{C}^2$), T_3	Sumea PI	Sumea PI	Sumea PI



Kuva 23. Erosuureet kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä. PI-säätimen MAE oli 5,22 °C ja MSE oli 188,56 °C². Sumean PI-säätimen MAE oli 5,15 °C ja MSE oli 170,24 °C². QDMC-säätimen MAE oli 5,03 °C ja MSE oli 166,37 °C². Erosuureen mittakaava on -35–30 %.

Erosuureista ilmenee selkeästi kolmen minuutin kohdalta QDMC-säätimen pienimmät ylitykset. Muutoksen kaksi aikana 16–18 minuutin välillä erosuureet vasteille T_1 ja T_2 lähestyivät PI-säätimellä nopeimmin nollaa ja samalla erosuure vasteelle T_3 kasvaa. Sumean PI- ja QDMC-säätimen erosuureet vasteille T_1 ja T_2 käyttäytyivät hyvin samankaltaisesti muutoksessa kaksi, mutta vasteelle T_3 QDMC-säätimen osalta erosuure oli selvästi sumeaa PI-säädintä suurempi. Kolmannessa muutoksessa 23 minuutin jälkeen

erosuuret käyttäytyivät myös samankaltaisesti lukuun ottamatta QDMC-säätimen erosuuretta vasteelle T_1 , joka laski selvästi muita rauhallisemmin.

Taulukossa 12 on listattuna keskimääräinen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE vastekohtaisesti ja kaikkien vasteiden keskiarvona kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä. Keskimääräisen absoluuttisen virheen ja keskineliövirheen mukaan QDMC-säädin suoriutui parhaiten ollen paras kaikkien vasteiden keskiarvolla mitattuna.

Taulukko 12. Keskimääräisen absoluuttinen virhe MAE ja keskineliövirhe MSE vastekohtaisesti ja kaikkien vasteiden keskiarvona. Kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötesti.

Tunnusluku	PI	Sumea PI	QDMC
MAE (°C), T_1	5,03	5,58	5,06
MAE (°C), T_2	4,93	4,98	4,66
MAE (°C), T_3	5,74	4,89	5,37
MAE (°C), keskiarvo	5,22	5,15	5,03
MSE (°C ²), T_1	161,45	157,31	146,99
MSE (°C ²), T_2	175,84	157,44	152,38
MSE (°C ²), T_3	228,39	195,99	199,75
MSE (°C ²), keskiarvo	188,56	170,24	166,37

Säädinten ohjaamien vastusten energian kulutusta voidaan arvioida integroimalla vastusten käyttämä teho. Integrointi toteutettiin ottamalla kumulatiivinen summa kymmenen tarkkuuteen pyöristetyistä säädinten ohjauksista, joka kerrottiin käytetyllä säätöjen aikavälillä. Yhden toimi- ja mittalaitteen säätötestissä pienin energian kulutus oli PI-säätimellä. QDMC-säädin käytti 0,7 prosenttia ja sumea PI-säädin 0,1 prosenttia enemmän energiaa. Kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä pienin energian kulutus oli QDMC-säätimellä. PI-säädin käytti 2,4 prosenttia ja sumea PI-säädin 0,7 prosenttia enemmän energiaa.

6.4 Pohdinta

Keskimääräistä absoluuttista virhettä ja keskineliövirhettä tarkastellessa PI-säädin oli heikoin molemmissa säätötesteissä. Samoilla mittareilla sumea PI-säädin oli paras yhden ja malliprediktiivinen QMDC-säädin kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä. Kolmen toimi- ja mittalaitteen testissä voidaan havaita PI-säätimien suurien vahvistuksien voimistavan ristikkäisvaikutuksia, kuitenkin käyttämällä suuria vahvistuksia päästiin parempaan säätötulokseen. PI-säädin ja sumea säätö käytetyssä muodossa ovat takaisinkytkettyjä säätimiä, joten ne reagoivat virheeseen vasta kun se havaitaan mittauksessa. Suuri viive aiheuttaa tyypillisesti haasteita takaisinkytketyille säätimille. Malliprediktiivinen säädin sisältää takaisinkytkennän sekä mallin sisältämän ohjattavan prosessin dynamiikan, joten se ei ole puhtaasti takaisinkytketty säädin. Testausympäristön portaallinen kymmenen välein toteutettu ohjaus myös lisää viivettä ja toisaalta suosii hieman suurempia ohjausliikkeitä, sillä pieni muutos ohjauksessa ei todellisuudessa muuta säätimen tehoa vaan ohjaus pyörästettiin järjestelmässä kymmeneen.

PI-säätimen viritystä lähdettiin ensin toteuttamaan yritys-erehdys-iteroimalla, jonka jälkeen kokeiltiin Ziegler-Nichols-menetelmää. Säätimen toiminta ei ollut toivotun kaltaista kummallakaan lähestymistavalla, vaan ohjaus muuttui epästabiiliksi ja värähteli paljon tai toisaalta toiminta muuttui liian hitaaksi. Kolmantena kokeiltiin Lambda-viritysmenetelmää, jolla saavutettiin paras lähtötila vitysparametreille. Yhden toimi- ja ohjaussuureen säätötestissä ensimmäisessä asetusarvon muutoksessa jatkuvuustilan virhe ei ehdi poistua, vaikka säädin laskee tehoa seuraavaan asetusarvon muutokseen asti ja olisi todennäköisesti asettunut asetusarvoon pidemmällä aikaikkunalla. Kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä ristikkäisvaikutukset ja suuret vahvistuskertoimet tulivat esille ensimmäisen asetusarvon muutoksessa suurena ylityksenä ja toisessa asetusarvomutoksessa vasteelle T_3 , jonka lämpötila nousi nopean virityksen seurauksena enemmän kuin hitaammin toimineelta sumealla PI-säätimellä.

Virityksen ja konfiguroinnin näkökulmasta sumea PI-säädin oli haastavin toteuttaa. Säätimen vitysparametreja haettiin yksinkertaisen dynamiikan simulaattorissa, jonka jälkeen se siirrettiin skaalauskerroimia käyttämällä testausympäristöön. Muuttujille sopivan arvoskaalan hakeminen, sääntökannan määrittely ja jäsenyysastefunktioiden toteuttaminen oli työlästä jo ennen sen vientiä testausympäristöön. Testeissä viive aiheutti

suuria haasteita, jonka takia säätö ei yhdellä ohjausmuutoksen skaalauskerroimella toiminut stabiilisti. Ohjauksen hidastaminen skaalauskerroimia muuttamalla vasteen lähestyessä asetusarvoa ratkaisi ongelman erityisesti yhden toimimittalaitteen säätötestissä. Säädin oli tämän jälkeen helposti siirrettävissä testien seuraavaan osaan, jossa sillä päästiin heti kohtalaiseen säätötulokseen. Ristikkäisvaikutukset ja PI-säädintä hitaampi toiminta ilmenivät kuitenkin säätimen muodostaessa suurimmat ylitykset ensimmäisessä ja suurimmassa asetusarvon muutoksessa kolmen toimimittalaitteen säätötestissä.

QDMC-säätimen viritys oli helpoin toteuttaa, eikä säädin useita viritysparametriyhdistelmiä testatessa muuttunut epästabiiliksi. Säätimen viritysparametreja vaihtelemalla säätimen toimintaa on tämän tuloksen perusteella yksinkertaista muovata erilaisten säätötavoitteiden mukaiseksi. Ohjauksen painotuskerrointa nostamalla ohjausta oli mahdollista rauhoittaa ja toisaalta laskemalla siitä saatiin nopeampi. Askelvastemalli oli yksinkertaista toteuttaa testausympäristössä, sillä siihen riitti ohjauksessa askeleen toteuttaminen ja sen vasteen mittaaminen. Tuotannossa olevassa prosessissa erillisen askelvastetestin toteuttaminen ei välttämättä aina ole mahdollista. Mallin määrittämisessä käytettävän askelmuutoksen tulisi kuvata prosessin dynamiikkaa toiminta-alueella, mikä voi olla vajavaista toteutettuna yhdellä askeleella. Dynamiikan muuttuminen eri tehoalueilla tuonee malliin epätarkkuutta, joka ilmenee ylityksinä suurissa asetusarvo muutoksissa. Mahdollisesti paremmin prosessin dynamiikkaa kuvaavaan malliin päästäisiin määrittämällä malli useasta erisuuruudesta askeleesta. Siitä huolimatta mallipohjaisella säätömenetelmällä päästiin molemmissa testeissä muihin testattuihin menetelmiin verrattuna hyvään lopputulokseen ja säätimen siirtäminen monimuuttujatestiin oli yksinkertaista.

Siirrettävyyden kannalta jokaisessa testatussa säätimessä on omat vahvuudet ja ongelmakohdat. PI-säädin tulee käytetyssä muodossa virittää uudelleen implementoitaessa säätöä toiseen kohteeseen, eikä siten ole siirrettävyydeltään korkealla tasolla. PID-muotoisen säätimen viritykseen on kuitenkin laajasti tunnettu ja kirjallisuudessa on paljon erilaisia viritysmenetelmiä erilaisen dynamiikan sisältäviä kohteita varten. Käytetty *simple-pid*-moduuli on toteutukseltaan yksinkertainen, mutta mahdollistaa haluttujen toiminnallisuuksien lisäämisen. Yleisesti PID-säätimille on kehitetty ja käytössä laajasti myös adaptiivisia automaattisen virityksen sisältäviä

rakenteita, joissa viritysparametreja estimoidaan. (Sato ym. 2018). Adaptiivinen rakenne parantaisi siirrettävyyttä käytetyn PID-säätimen kohdalla

Toteutettu sumea PI-säädin on siirrettävissä skaalauskerroimien avulla, mutta mikäli sen toimintaa halutaan muokata enemmän, muuttuu implementointi huomattavasti työläemmäksi. Sumean säätimen toteutuksessa käytetty *scikit-fuzzy*-kirjasto mahdollistaa monipuolisesti erilaisten sumeiden säätimien toteutukset. Myös sumealla säätimelle on ollut pitkään käytössä adaptiivisia muotoja, jotka mahdollistavat sääntökannan ja jäsenyysastefunktioiden automaattisen virityksen (Nie & Linkens 1995, s. 7–11). Adaptiivisen rakenteen kehittäminen parantaisi myös sumean säätimen siirrettävyyttä. QDMC-säätimellä siirrettävyyden kannalta työläin osio on mallin määrittäminen, joka vaatii prosessitestejä tai data-analytiikkaa aiemmin mitatusta prosessidatasta. Muuten säädin on toteutetussa muodossa mahdollista siirtää käyttöön erilaisiin käyttökohteisiin.

Tavoite säätöjä toteutettaessa oli säätövirheen minimointi. Teollisuudessa yleisien ohjattavien toimilaitteiden kuten venttiilien säätö halutaan tavanomaisesti olevan rauhallinen, sillä levoton ja suuria liikkeitä tekevä säätö voi rasittaa toimilaitteita. Testausympäristössä vastukset eivät rasitu suuristakaan ohjausliikkeistä, jonka takia sitä ei huomioitu. QDMC-säädin mahdollistaa monipuolisimmat työkalut ottaa huomioon vaste tai ohjauksuure kohtaisia rajoituksia, joita testeissä ei kuitenkaan parhaan säätötuloksen mahdollistamiseksi käytetty. Kehittyneet säädöt mahdollistavat myös muiden ylemmän tason säätötavoitteiden huomioimisen, kuten energiankulutuksen.

6.5 Jatkokehitys

Siirrettävyyden parantaminen ja monipuolisempien säätöratkaisujen toteuttamisen mahdollistaminen vaatii käytetyn PID-algoritmin kehitystä. Suuri vaikutus siirrettävyyden parantamiseen saataisiin adaptiivisen muodon kehittämisellä, mutta myös skaalautuvuuden vaatimia perustoiminnallisuuksia tulee kehittää. Harjun & Marttisen (2000, s. 61–62) mukaan valmistajasta riippuen PID-säätimen perustoiminnallisuuksia ovat käytetyn algoritmin sisältämien toiminnallisuuksien lisäksi muun muassa mahdollisuuden ohjausmuutoksen rajoittamiselle, D-termin alipäästösuodatukselle sekä myötäkylkennälle ja käsiohjaukselle. Mainituista erityisesti myötäkylkennän, ohjausmuutosten rajoittamisen ja käsiohjauksen lisääminen algoritmiin voi ajatella olevan tärkeä osa monipuolista skaalautuvaa PID-säädintä.

PID-säätimen tapaan myös sumean säätimen siirrettävyys parantuisi adaptiivisen rakenteen kehittämiseksi. Perustoiminnallisuuksista sumean säätimen toteuttamiseen käytetty *scikit-fuzzy*-kirjasto ei sisällä suoraan mahdollisuutta rajoittaa ohjausta tai ohjausmuutosta. Ohjauksen rajoittaminen testeissä toteutettiin *Numpy*-paketin sisältämällä funktioilla. Sumea säädin PI-muotoisena sisältää ohjausmuutoksen rajoituksen, joka riippuu sille asetetuista jäsenyysastefunktioista. Niin käytettynä skaalauskerroimet muuttavat samalla myös suurinta ja pienintä arvoa ohjausmuutokselle.

QDMC-säätimelle mahdollisuus toteuttaa askelvastemalli useammasta kuin yhdestä askeleesta on selkeä jatkokehityskohde ja sen vaikuttavuus mallin tarkkuuteen ja säätötulokseen testausympäristössä on mielenkiintoinen selvittävä. Toteutetussa moduulissa ei ole mahdollista asettaa eri suuruisia painotuskertoimia ohjaussuureille, joka voi olla hyödyllinen ominaisuus monipuolisten säätöjen mahdollistamiseksi. Järjestelmässä säädön visualisoinnin yhteydessä olisi hyödyllistä visualisoida myös mallin tuottama ennuste ja siten näyttää suunta, johon prosessi on menossa. Seuraamalla myös mallin tarkkuutta, sen heikkeneminen voidaan havaita ajoissa ja toteuttaa uudelleen määrittäminen.

Järjestelmän kehitys monikäyttöiseksi ja siirrettäväksi vaatii myös jatkokehitystä ja on kokonaisuutena yksittäisen säätömenetelmän kehitystä suurempi. Tiedonsiirtomenetelmän muuttaminen MQTT-protokollasta monipuolisempaa kappaleessa 3.3.2 käsiteltyyn useiden automaatiojärjestelmien tukemaan OPC UA-protokollaan on todennäköisesti lopullisena vaihtoehtona parempi. Järjestelmän helppokäyttöisyyttä edistää vakioitujen funktioiden toteuttaminen muun muassa kohinaisen mittauksen suodatukseen ja virheellisen mittauksen tunnistamiseen. Vakioituilla funktioilla vältetään myös kohdekohtaiset toteutukset. Säädön suorituskykyä seuraavien mittareiden kehittäminen järjestelmän sisään mahdollistaisi säätöjen seurannan ja mahdollisessa vikatilanteessa säätöön puuttumisen.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Yhden toimi- ja mittalaitteen viiveellistä prosessia on mahdollista ohjata hyvillä tuloksilla niin yksinkertaisella PI-säätimellä, kuin kehittyneemmällä sumealla ja malliprediktiivisellä säätimellä. Kolmen toimi- ja mittalaitteen prosessissa testausympäristön lämmitysvastusten tuottama ristikkäisvaikutus vaikuttaa takaisinkytkettyjen säätimien toimintaan suurilla asetusarvon muutoksilla enemmän kuin pienillä. Järjestelmän dynamiikka vaati PI-säätimeltä suuria vahvistuskertoimia, joiden havaittiin edelleen voimistavan ristikkäisvaikutuksia. Malliprediktiivisen säätimen sisältämä järjestelmän dynamiikkaa kuvaava malli mahdollistaa ristikkäisvaikutusten huomioimisen yksinkertaisella tavalla, joka ilmenee selvästi muita säätömenetelmiä pienempinä ylityksinä.

Virityksen onnistumisen havaittiin säätötuloksen kannalta olevan erityisen kriittistä takaisinkytketyillä sumealla ja perinteisellä PI-säätimellä. Säädon siirrettävyyden haasteellisuus on tapauskohtaista. Toteutettu sumea PI-säädin on toteutuksen jälkeen siirrettävissä skaalauskerroimien avulla eri kohteisiin, mutta mikäli sen toimintaa halutaan muokata, on uudelleen viritys työlästä. Käytetyssä PID-algoritmissa säädin tulee virittää kohdekohtaisesti. PID-säätimen ja sumean säätimen skaalautuvuutta ja siirrettävyyttä voitaisiin parantaa kehittämällä adaptiivisia rakenteita viritykseen. Malliprediktiivisen säätimen viritys todettiin intuitiiviseksi ja vähintään kohtuulliseen säätötulokseen molemmissa testeissä päästiin useilla eri viritysparameetri kombinaatioilla. Malliprediktiivinen QDMC-säädin vaatii askelvastemallin määrittämiseen prosessitestejä, joiden toteuttaminen voi kohteesta riippuen olla haasteellisia.

Ensimmäinen versio testauslaitteiston ympärille toteutetusta säätöjärjestelmästä toimi kaikissa testeissä hyvin mittausdatan tallennuksen, reaaliaikaisen visualisoinnin ja säädinten toiminnan osalta. Suuria ongelmia ei ilmennyt testeissä käytettyjen kymmenien tuntien aikana.

8 YHTEENVETO

Tämä diplomityö on osa itsenäisen ja pääosin ylätason säätöjen toteutukseen tarkoitetun järjestelmän kehitystä. Työn tavoitteena oli kehittää ja tutkia säätömenetelmiä järjestelmän käyttöön. Työssä tavoitteena oli myös suunnitella ja toteuttaa ensimmäinen versio tavoitellusta järjestelmästä. Työn kirjallisuusosassa käsiteltiin säätöjärjestelmiin ja ylätason säätöihin liittyviä periaatteita ja käsitteitä. Tämän jälkeen esiteltiin teollisuudessa yleisien hajautettujen ohjausjärjestelmien rakennetta ja ylätason optimoinnin tarkoitusta automaation muodostamassa kokonaisuudessa. Kokeellisessa osuudessa käytettävien PID, sumean ja malliprediktiivisen säätimien perusteoria käsiteltiin omilla kappaleillaan. Kirjallisuusosassa käsiteltiin myös säätömenetelmiltä ja järjestelmältä vaadittavia ominaisuuksia skaalautuvuuden ja joustavuuden mahdollistamiseksi.

Työn kokeellisessa osuudessa rakennettiin teollisuuden lämmitysprosessia havainnollistava testauslaitteisto. Testauslaitteiston yhteyteen toteutettiin ensimmäinen versio tavoitellusta järjestelmästä, joka toimi läpi testien ilman suurempia ongelmia. Säätömenetelmien suorituskykyä ja konfigurointia arvioitiin testausympäristössä toteutetuissa säätötesteissä. Testeissä käytettyjen säätimien toteutus esiteltiin kokeellisen osuuden alussa. Testausympäristön lämmitysvastusten tuottama ristikkäisvaikutus havaittiin vaikuttavan erityisesti takaisinkytkettyjen PI-säätimen ja sumean PI-säätimen toimintaan. Malliprediktiivisen QDMC-säätimen sisältämä järjestelmän dynamiikkaa kuvaava malli mahdollistaa ristikkäisvaikutusten huomioimisen yksinkertaisella tavalla, joka ilmenee muita säätömenetelmiä pienempinä ylityksinä. Säätömenetelmien vertailuluvut kolmen toimi- ja mittalaitteen säätötestissä olivat PI-säätimellä MAE 5,22 °C ja MSE 188,56 °C². Sumealla PI-säätimellä MAE oli 5,15 °C ja MSE oli 170,24 °C². QDMC-säätimellä MAE oli 5,03 °C ja MSE oli 166,37 °C².

Käytetyn PID-algoritmin siirrettävyys ei ole korkealla tasolla, sillä se tulee virittää uudelleen eri kohteisiin siirrettäessä. Toteutettu sumea PI-säädin on mahdollista siirtää sellaisenaan käyttämällä skaalaukertoimia muuttujiin, mutta säätimen uudelleen viritys on työlästä. QDMC-säädin on mahdollista siirtää uusiin kohteisiin määrittämällä askelvastemalli uudelleen. Säätötesteissä käytetyt säätömenetelmät on modulaarisesti toteutettu, joka mahdollistaa haluttujen toiminnallisuuksien lisäämisen.

LÄHDELUETTELO

Agachi, PS., Cristea, MV., Csavdri, AA. & Szilágyi, B., 2017. Advanced process engineering control, 1 painos, Boston: Walter de Gruyter GmbH & Company, 344 s. ISBN 3-11-038816-2

Antoniou, A. & Lu, W., 2021. Practical Optimization: Algorithms and Engineering Applications, 2 painos, New York: Springer, 722 s. ISBN 1-0716-0843-6

Bequette, BW., 2007. Non-Linear Model Predictive Control: A Personal Retrospective. Canadian journal of chemical engineering, 85 (4), s. 408-415.

Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J. & Watson, T., 2018. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. Computers in industry, 101, s. 1-12.

Breivold, HP. & Sandström, K., 2015. Internet of Things for Industrial Automation – Challenges and Technical Solutions. Teoksessa: 2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems, s. 532-539. ISBN 978-1-5090-0214-6

Bruckner, D., Stanica, M., Blair, R., Schrieger, S., Kehrer, S., Seewald, M. & Sauter, T., 2019. An Introduction to OPC UA TSN for Industrial Communication Systems. Proceedings of the IEEE, 107 (6), s. 1121-1131.

Camacho, EF. & Bordons C., 2004. Model predictive control, 2 painos, Lontoo: Springer, 405 s. ISBN 978-1-85233-694-3

Darby, ML. & Nikolaou, M., 2012. MPC: Current Practice and Challenges. Control engineering practice, 20 (4), s. 328-342.

Di Pasquale, V., De Simone, V., Miranda, S. & Riemma, S., 2021. Smart operators: How Industry 4.0 is affecting the worker's performance in manufacturing contexts. Procedia computer science, 108, s. 958-967.

Dorf, RC. & Bishop, RH., 2017. Modern control systems, 13 painos, Harlow: Pearson, 1025 s. ISBN 978-1-292-15297-4

Forbes, MG., Patwardhan, RS., Hamadah, H. & Gopaluni, RB., 2015. Model Predictive Control in Industry: Challenges and Opportunities. IFAC-PapersOnLine, 48 (8), s. 531-538.

Friedrich, J., Scheifele, S., Verl, A. & Lechler A., 2015. Flexible and Modular Control and Manufacturing System. Procedia CIRP 2015, 33, s. 115-120.

Gafa, C., 2020. A very brief introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Systems [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://towardsdatascience.com/a-very-brief-introduction-to-fuzzy-logic-and-fuzzy-systems-d68d14b3a3b8> [viitattu 20.6.2022].

Goguen, JA., 1996. Parameterized programming and software architecture. Teoksessa: Fourth IEEE International Conference on Software Reuse, s. 2-10. ISBN 0-8186-7301-X

Golan, M., Cohen, Y. & Singer, G. 2020. A framework for operator - workstation interaction in Industry 4.0. International journal of production research, 58 (8), s. 2421-2432.

Harju, T. & Marttinen, A., 2000. Säättöpiirin virityksen perusteet, Espoo: Control CAD, 166 s. ISBN 952-91-1930-5

Hu, B., Mann, G. & Gosine, R., 2001. A systematic study of fuzzy PID controllers-function-based evaluation approach. IEEE transactions on fuzzy systems, 9 (5), s. 699-712.

Ikonen, E. & Najim, K., 2002. Advanced process identification and control. New York: Marcel Dekker, 310 s. ISBN 0-8247-0648-X

Ikonen, E., 2017. Model Predictive Control and State Estimation [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://moodle oulu.fi/pluginfile.php/53647/mod_resource/content/1/477607S_lecture_notes.pdf [viitattu 1.6.2022].

Kano, M. & Ogawa, M., 2010. The state of the art in chemical process control in Japan: Good practice and questionnaire survey. Journal of process control, 20 (9), s. 969-982.

Lee, JH., Morari, M. & Garcia, CE., 1994. State-space interpretation of model predictive control. *Automatica*, 30 (4), s. 707-717.

Lequesne, D., 2017. *Predictive Control*, 1 painos, Elsevier, 300 s. ISBN 1-78548-262-9

Lukac, D., 2015. The fourth ICT-based industrial revolution “Industry 4.0” – HMI and the case of CAE/CAD innovation with EPLAN P8. Teoksessa: 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), s. 835-838. ISBN 978-1-5090-0055-5

Luukkainen, S., 2022. Suullinen ja kirjallinen tiedonanto [Teams-ympäristö]. Keskusteltu: 1.9.2022 klo 10:30–12:00 (GMT +0200).

Mehta, BR. & Reddy, YJ., 2014. *Industrial Process Automation Systems: Design and Implementation*, 1 painos, Oxford: Butterworth-Heinemann Inc, 668 s. ISBN 978-0-12-800939-0

Moilanen, E., 2016. Development and utilization of a tool for systematic control loop performance analysis [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201610052881> [viitattu 7.9.2022].

Moilanen, E., 2022. Heinolan säädön suorituskyvyn analysoinnin taustaa [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Konsta Simonen. Lähetetty: 2.9.2022 klo 15:26 (GMT +0200).

Moon, U. & Lee, K., 2009. Step-Response Model Development for Dynamic Matrix Control of a Drum-Type Boiler-Turbine System. *IEEE transactions on energy conversion*, 24 (2), s. 423-430.

Moxa, 2022. Products, Industrial edge connectivity, Controllers & I/Os, Universal controllers & I/Os, ioLogik E1200 Series [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.moxa.com/en/products/industrial-edge-connectivity/controllers-and-ios/universal-controllers-and-i-os/iologik-e1200-series#models> [viitattu 25.8.2022].

MQTT, 2022. Mqtt [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://mqtt.org> [viitattu 26.8.2022].

Nie, J. & Linkens, DA., 1995. Fuzzy-neural control: principles, algorithms and applications, 1 painos, New York: Prentice Hall, 243 s. ISBN 0-13-337916-7

O'Dwyer, A., 2009. Handbook of PI and PID controller tuning rules, 3 painos, Lontoo: Hackensac, 623 s. ISBN 1-282-44170-1

OPC Foundation, 2022. OPC technologies, OPC UA [verkkodokumentti]. Scottsdale: OPC Foundation. Saatavissa: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua> [viitattu 5.7.2022].

Ogata, K., 2002. Modern control engineering, 4 painos, Upper Saddle River (N.J.): Prentice-Hall, 964 s. ISBN 0-13-060907-2

Precup, R. & Hellendoorn, H., 2011. A survey on industrial applications of fuzzy control. Computers in industry, 62 (3), s. 213-226.

Qin, SJ. & Badgewell TA., 2003. A survey of industrial model predictive control technology. Control engineering practice, 11 (7), s. 733-764.

Rawlings, J., 2000. Tutorial overview of model predictive control. IEEE Control Systems Magazine, 20 (3), s. 38-52.

Richalet, J., Rault, A., Testud, J. & Papon, J., 1978. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes. Automatica, 14 (5), s. 413-428.

Savolainen, J. & Vaittinen, R., 2003. Sääätötekniikan perusteita, 5 painos, Helsinki: Opetushallitus, 248 s. ISBN 952-13-1671-3

Sato, T., Tajika, H., Vilanova, R. & Konishi, Y., 2018. Adaptive PID control system with assigned robust stability. IEEJ transactions on electrical and electronic engineering, 13 (8), s. 1169-1181.

Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T. & Abel, D., 2021. Review on model predictive control: an engineering perspective. International journal of advanced manufacturing technology, 117 (5-6), s. 1327-1349.

Stora Enso, 2022. Tietoa Stora Ensosta, Stora Enson yksiköt, Heinolan flutingtehdas [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-stora-enso/stora-enso-locations/heinola-fluting-mill> [viitattu 7.9.2022].

Github, 2022. scikit-fuzzy [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://github.com/scikit-fuzzy> [viitattu 11.8.2022].

Github, 2021. m-lundberg, simple-pid [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://github.com/m-lundberg/simple-pid> [viitattu 10.8.2022].

Smith CL., 2010. Advanced process control: beyond single loop control, Hoboken N.J: Wiley, 464 s. ISBN 1-118-03521-6

Van Overschee, P. & De Moor, B., 2000. RAPID: The End Of Heuristic PID Tuning. IFAC Proceedings Volumes, 33 (4), s. 595-600.

Venkrbec, V., Galić, M. & Klanšek, U., 2018. Construction process optimization – review of methods, tools and applications. Građevinar (Zagreb), 70 (7), s. 593-606.

von Krogh, G. & von Hippel, E., 2006. The Promise of Research on Open Source Software. Management Science, 52 (7), s. 975-983.

Zhang, P., 2010. Advanced industrial control technology, 1. painos, Boston: Elsevier, 865 s. ISBN 1-282-77036-5

Åström. KJ. & Hägglund, T., 1995. PID Controllers, 2 painos. Pohjois-Carolina: Instrument Society of America, 343 s. ISBN 1-55617-516-7