

Salla Ojala

**Rullausprosessin säätöjen ja
värähtelynvaimennuksen integrointi
teollisuus-PC:lle**

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 26.5.2014.

Työn valvoja:

Dos. Kai Zenger

Työn ohjaaja:

DI Eero Vesaoja



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Tekijä: Salla Ojala		
Työn nimi: Rullausprosessin säätöjen ja värähtelynvaimennuksen integrointi teollisuus-PC:lle		
Päivämäärä: 26.5.2014	Kieli: Suomi	Sivumäärä:11+59
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professori: Systeemitekniikka		Koodi: AS-74
Valvoja: Dos. Kai Zenger		
Ohjaaja: DI Eero Vesaoja		
<p>Tässä työssä kehitetään integroitu säädin, jolla kontrolloidaan paperirullan muodostumista pituusleikkurin kiinnirullausprosessissa. Säädin yhdistää ensimmäistä kertaa uuden värähtelynvaimennusalgoritmin perinteiseen paikka- ja voimasäätöön. Onnistunut värähtelynvaimennuksen lisääminen prosessiin mahdollistaa pituusleikkurin ajonopeuden kasvattamisen, jolloin prosessin koko läpimenoaika lyhenee. Pituusleikkuri on ollut perinteisesti paperintuotannon pullonkaula, joten sen läpimenoaikojen lyhentymisen vaikuttaa positiivisesti koko tuotannon nopeuteen. Eri algoritmien sujuvan yhteistoiminnan varmistamiseksi säädin toteutetaan kokonaan uudelle alustalle. Rullausprosessin muu säätöjärjestelmä jätetään kuitenkin vanhalle alustalle, joten alustojen välille luodaan kommunikaatioyhteys. Työssä käsitellään sovellusalueen vaihtoon, rajapintoihin ja kommunikaatioon liittyviä ongelmia. Rullausprosessin dynamiikan ymmärtämiseksi paikka- ja voimasäädöille luodaan simulointimallit, joilla voidaan testata kehitettyä säädintä. Lopulta säätimen käyttäytymistä tutkitaan tehdaskokein pituusleikkurilla. Integroitu säädin todetaan toimivaksi, ja prosessin värähtelytasot laskevat selvästi värähtelynvaimentimen lisäyksen ansiosta.</p>		
Avainsanat: Pituusleikkuri, rullausprosessi, värähtelynvaimennus, kiinnirullaus		

Author: Salla Ojala		
Title: Integration of the controls and vibration damping of the winding process in an industrial PC		
Date: 26.5.2014	Language: Finnish	Number of pages:11+59
Department of Electrical Engineering and Automation		
Professorship: Control Engineering		Code: AS-74
Supervisor: Dos. Kai Zenger		
Advisor: M.Sc. (Tech.) Eero Vesaoja		
<p>In this thesis an integrated controller is developed for controlling the formation of a paper roll during the winding process of a winder. The controller integrates for the first time a new vibration damping algorithm with the traditional winder control system which consists of a place controller and a force controller. The successful addition of the vibration damping system makes it possible to increase the driving speed of the winder and thus also significantly increase the throughput. The winder has traditionally been the bottleneck in the paper production process, so increasing its throughput also shortens the whole manufacturing lead time. The integrated controller is implemented on a new platform in order to ensure smooth cooperation between the different control algorithms. The rest of the control system is left on the old platform, so a communication link between the two separate platforms is established. In this thesis the problems related to the platform changing, interfaces and communication are discussed. In order to understand the dynamics of the winding process, simulation models for the force control and place control are created. Finally, the behaviour of the integrated controller is studied in factory tests. The controller is proven to be working properly, and the vibration levels in the process decrease significantly due to the introduction of the vibration damper.</p>		
Keywords: Winder, winding process, vibration damping, rewinding		

Esipuhe

Tämä diplomityö toteutettiin osana TEKESin TULEVA-projektia Aalto-yliopiston Automaatio- ja systeemitekniikan laitoksella yhteistyössä Metso Paperin kanssa. Työhön liittyvät koeajot tehtiin Metso Paperin Järvenpään Emalikadun koelaitoksella.

Työn ohjaajana toimi Eero Vesaoja, jota haluan kiittää kaikesta yhteistyöstä, avusta ja asiantuntevasta ohjauksesta työn aikana. Haluan kiittää myös työn valvojana toiminutta Kai Zengeriä arvokkaasta palautteesta ja motivoinnista.

Suuri kiitos kuuluu myös kaikille Emalikadun koelaitoksen työntekijöille, erityisesti Arto Leskiselälle ja Sami Marttiselle, joita ilman koeajot eivät olisi onnistuneet. Samassa yhteydessä tahdon kiittää Timo Virtasta ja Ossi Valtosta perehdytyksestä alkuperäisen säätöjärjestelmän logiikkaan. Lisäksi Jari Paanasalo ja Asko Heikola ansaitsevat kiitokset lopullisen työn asiasisällön tarkastamisesta.

Lopuksi haluan kiittää vielä perhettäni ja ystäviäni, jotka ovat auttaneet ja tukeneet minua aina.

Espoo, 22. toukokuuta 2014

Salla Ojala

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	viii
1 Johdanto	1
1.1 Pituusleikkuri	1
1.2 Tutkimusongelman kuvaus	2
1.3 Tutkimuksen tavoite	3
1.4 Tutkimuksen rajaus	3
1.5 Työn sisältö	3
2 Kiinnirullausprosessissa vaikuttavat kontaktivoimat ja värähtely	4
2.1 Paperirullan muodostuminen	4
2.2 Kasvavien rullien kontaktivoimat	5
2.3 Muodostuvien rullien värähtely	8
2.4 Värähtelynvaimennusmenetelmät	11
2.4.1 Passiivinen vaimennus	11
2.4.2 Puoliaktiivinen vaimennus	12
2.4.3 Aktiivinen vaimennus	13
2.5 Prosessin häiriöiden seuraukset	13
3 Säättöalgoritmit	16
3.1 Säättöjärjestelmän kuvaus	16

3.2	Voima- ja paikkasäätö	16
3.3	Värähtelynvaimennus	18
3.3.1	Aktiivivaimennusmenetelmiä	19
3.4	Säädinten yhteistoiminta	21
4	Säädinten integrointi teollisuus-PC:lle	24
4.1	Siemens S7	24
4.2	Beckhoff TwinCAT 3	25
4.3	Profibus-kommunikaatio	27
4.4	Kontaktivoimien säätö	28
4.4.1	Voimasäätimen alipäästösuodatus	30
4.5	Paikan säätö	32
4.6	Värähtelyjen vaimennus	32
4.7	Graafinen käyttöliittymä	33
5	Säätöjärjestelmän simulointi	34
5.1	Paikkasäädön simulointi	34
5.2	Voimasäädön simulointi	39
6	Tehdaskokeet	46
6.1	Järjestelyt	46
6.2	Koeajot	46
6.2.1	Koeajot ilman paperia	46
6.2.2	Varhaisia koeajoja paperilla	47
6.2.3	Koeajoja säätimen kehityksen aikana	50
6.2.4	Koeajosarjat erilaisilla papereilla	51
7	Yhteenveto ja päätelmät	54

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

A	Systeemimatriisi
a_k	IIR-suodattimen määrittelyyn käytetty tulosignaalin kerroin
A_{syl}	Männän paineenalainen pinta-ala
A_{sylA}	Sylinterin männän ala
A_{sylB}	Sylinterin männänvarrenpuoleinen rengaspinta-ala
B	Ohjausmatriisi
b_m	IIR-suodattimen määrittelyyn käytetty lähtösignaalin kerroin
C	Lähtömatriisi
c_N	Nipin vaimennusvakio
c_V	Männänvarren vaimennusvakio
D	Suoravaikutusmatriisi
d	Paperirullan ja telan välinen etäisyys eli puristuma
d_{isku}	Männän iskunpituus
d_{rulla}	Rullan halkaisija
F	Voima
F_A	Männänpuoleinen voima
F_B	Männänvarrenpuoleinen voima
f_n	Kappaleen ominaistajuus
f_p	Päästökaistan rajataajuus
F_{rad}	Radiaalinen nippivoima
f_s	Estokaistan rajataajuus
F_{syl}	Hydraulisylinterin tuottama voima
F_μ	Sylinterikitkavoima
g	Putoamiskiihtyvyys
G_c	Säätimen siirtofunktio
G_{ff}	Säätimen myötäkytkentätermin siirtofunktio
G_p	Säädettävän prosessin siirtofunktio
H	Dynaaminen matriisi
h	Impulssivaste
I	Identiteettimatriisi
J	Kustannusfunktio
K	Kappaleen jäykkyysmatriisi

k	Kappaleen jäykkyyttä kuvaava jousivakio
k_N	Nipin jousivakio
K_P	PI-säätimen vahvistustermi
k_V	Männänvarren jousivakio
L	Optimaalinen vahvistus LQ-säätimelle
M	Kappaleen massamatriisi
m	Kappaleen massa
p	Paine
p_A	Männänpuoleinen paine
p_B	Männänvarrenpuoleinen paine
Q	Ulostulon painomatriisi
R	Ohjauksen painomatriisi
r_r	Paperirullan säde
r_t	Telan säde
S	Riccatin yhtälön ratkaisu
s	Laplace-muuttuja
t	Aika
T_I	PI-säätimen I-termi eli integrointiaika
U	Männän jännitesyöttö
u	Ohjaus
v_{ajo}	Ajonopeus
$v_{kierros}$	Rullan kierrosnopeus
v_r	Paperirullan nopeusvektori
v_{rrad}	Paperirullan nopeusvektorin radiaalikomponentti
v_{syl}	Männän nopeus
v_t	Telan nopeusvektori
v_{trad}	Telan nopeusvektorin radiaalikomponentti
x	Prosessin tulosignaali
x_0	Telan vertikaalinen paikka
x_1	Rullan vertikaalinen paikka
x_2	Männänvarren vertikaalinen paikka
y	Prosessin lähtösignaali
α	Kerroin jännitesyötteen ja männän varren nopeuden välillä
β_A	Voimasäädön mallin männänpuoleinen kerroin
β_B	Voimasäädön mallin männänvarrenpuoleinen kerroin
β_μ	Voimasäädön mallin kerroin männän nopeudelle

δ_p	Päästokaistan maksimipoikkeama
δ_s	Estokaistan maksimipoikkeama
η	Sylinterin hyötysuhde
λ	Järjestelmän ominaisarvo
ω_n	Kappaleen värähtelyn ominaiskulmataajuus

Lyhenteet

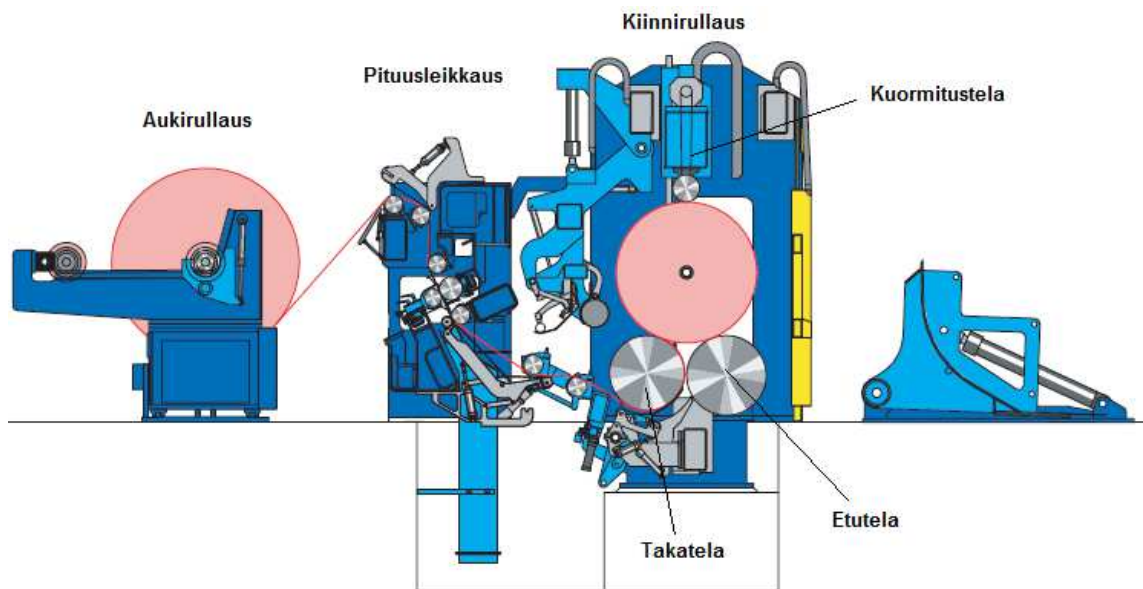
ATA	Advanced Technology Attachment, liitäntä sisäisen tai ulkoisen massamuistilaitteen kytkemiseksi tietokoneeseen
FBD	Function Block Diagram, lohkokaavio
FDATool	Filter Design and Analysis Tool, MATLABin työkalu suodattimien suunnitteluun
FIR	Finite Impulse Response
HC	Harmonic Control
IEC 61131-3	Kansainvälinen standardi, joka määrittelee ohjelmoitavien logiikoiden ohjelmointikielet
IEC 61158	Kansainvälinen kenttäväylästandardi
IEPE	Integrated electronic piezoelectric accelerometer
IHC	Instantaneous Harmonic Control
IIR	Infinite Impulse Response
IL	Instruction List
LQ	Linear-quadratic
MATLAB	Numeeriseen laskentaan tarkoitettu tietokoneohjelmisto
PI	Proportional-Integral
PID	Proportional-Integral-Derivative
PLC	Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikka
Profibus	Kenttäväyläjärjestelmä
S7	Siemens Simatic Step7 -ohjelmointilogiikka
SCL	Structured Control Language
SIMATIC	Siemensin kehittämä automaatiojärjestelmä
Simulink	MATLABin lisäosa dynaamisten järjestelmien simulointiin
ST	Structured Text
STL	Statement List
TcCOM	TwinCat Component Object Model
TNT	Torque, Nip, Tension

TwinCAT	The Windows Control and Automation Technology
XAE	Extended Automation Engineering -ohjelmointiympäristö
XAR	Extended Automation Runtime -ajoympäristö

1 Johdanto

1.1 Pituusleikkuri

Pituusleikkuri on yksi jälkikäsittelykoneista paperinvalmistusprosessissa. Ennen pituusleikkurille päätymistä paperi on valmistettu pitkälle automatisoidussa prosessissa paperikoneella. Paperinvalmistusprosessin alku- eli märkäässä paperimassasta muovataan useiden välivaiheiden kautta suuria konerullia, jotka voivat olla jopa kymmenen metriä pitkiä ja halkaisijaltaan nelimetrisiä. Tämän jälkeen konerullat siirretään valmistusprosessin kuivaan päähän jälkikäsittelyyn, jossa paperin pinta- ja painatusominaisuuksia parannellaan. Pituusleikkurilla leikataan valmiiksi käsitellyt konerullat pienemmiksi asiakasrulliksi, joita on helppoa kuljettaa ja varastoida. [1, s. 1]



Kuva 1: Kantotelaleikkuri [2]

Yleisimmät pituusleikkurityypit ovat kantotela- ja keskiörullainleikkuri. Kuvassa 1 on esitetty kantotelaleikkurin kaavakuva. Kuvasta nähdään pituusleikkausprosessin eri työvaiheet: aukirullaus, pituusleikkaus ja kiinnirullaus. Kuvan vasemmassa laidassa näkyy suuri konerulla, joka rullataan auki aukirullausprosessissa. Tämän jälkeen paperiraina levitetään suoraksi ja kireäksi. Levitetty raina leikataan pituusleikkauksivaiheessa pituussuunnassa oikeankokoisiksi osarainoiksi, jotka erotellaan toisistaan sopivalle etäisyydelle ja levitetään jälleen suoriksi. Kiinnirullausvaiheessa osarainat ohjataan takatelan alta rullautumaan kiinni valmiiksi asiakasrulliksi hylsyn ympä-

rille taka- ja etutelan päälle. Asiakasrullat voidaan vielä tämän jälkeen tarvittaessa kuljettaa jatkokäsittelyyn esimerkiksi kalanterille tai päällystyskoneelle. [3]

Keskiörollainleikkuri eroaa kantotelaleikkurista näkyvimmin siten, että siinä asiakasrullat muodostuvat vain yhden kantotelan päällä omilla rullausasemillaan leikkurin molemmiin puolin. Muodostuvan rullan hylsyn päät ovat kiinni keskiöistukoissa, jotka kannattelevat näin koko rullaa. Erillisten rullausasemien ansiosta kiinnirullausta voidaan säädellä rullakohtaisesti.

1.2 Tutkimusongelman kuvaus

Koko paperin jälkikäsittelyn aikana sama rulla saatetaan auki- ja kiinnirullata lukuisia kertoja erilaisia käsittelyprosesseja varten. Rullausprosessi johtaa epäonnistuuksaan paperirullan laadun heikkenemiseen tai pahimmillaan suuriin tuotantomennetyksiin, kun paperirata rikkoutuu kesken kiinnirullauksen. Onkin tärkeää, että rullien rakenne ja muoto pysyvät koko jälkikäsittelyn ajan korkealaatuisina, eikä toistuva rullaus aiheuta niihin vaurioita. [4, 5]

Pituusleikkurin on myös kyettävä tuottamaan laadukkaita rullia mahdollisimman suurilla nopeuksilla [4]. Paperitehtaat ovat nostaneet paperikoneidensa nopeuksia jatkuvasti säilyttääkseen kilpailukykynsä, ja tämä on asettanut myös paperin jälkikäsittelykoneille yhä kovempia nopeusvaatimuksia, jotta ne eivät muodostuisi paperintuotannossa pullonkaulaksi. Nopeuksien kasvaessa kuitenkin prosessin hallinta vaikeutuu ja pyörivään rullaan alkaa muodostua entistä helpommin haitallista värähtelyä. Rullausprosessin optimoiminen tehokkaaksi onkin paperiteollisuudelle tärkeä säätöongelma. [3, 6]

Tässä työssä tutkittavassa kiinnirullausprosessissa paperirullan muodostumista on aiemmin säädetty paikka- ja voimasäätimillä, jotka on toteutettu Siemensin S7-alustalla. Paikkasäädintä käytetään hylsyn asettamiseen oikealle paikalleen rullausta varten ennen rullaustapahtumaa. Voimasäädintä puolestaan käytetään rullauksen aikana kontrolloimaan paperiradan rullauskireyttä säätämällä muodostuvan rullan puristumista telaa vasten.

Viime aikoina rullausprosessiin on lisäksi kehitetty uudenlainen värähtelynvaimennusalgoritmi, joka on tarkoitus integroida prosessiin vanhojen säätimien rinnalle. Voimasäädin ja värähtelynvaimennin ovat molemmat toiminnassa koko kiinnirul-

lauksen ajan ja säättävät prosessia yhtäaikaaisesti. Säädinten yhdistämisessä oleellisin ongelma onkin pitää huolta siitä, että ne eivät ala toimia toisiaan vastaan millään taajuudella missään vaiheessa. Tämän välttämiseksi säätimet tulee siirtää toimimaan yhteiselle alustalle, jotta niiden välinen kommunikaatio onnistuu.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Diplomityön tavoitteena on kehittää integroitu säädin, joka ensimmäistä kertaa yhdistää paikka- ja voimasäädön värähtelynvaimennukseen uudella alustalla, Beckhoffin TwinCAT3:lla. Työssä käsitellään lisäksi sovellusalustan vaihtoon, rajapintoihin ja kommunikaatioon liittyviä ongelmia. Säätimen käyttäytymistä tutkitaan sekä simuloiden että tehdaskokein Metso Paperin Järvenpään koelaitoksen WinRoll-pituusleikkurilla.

1.4 Tutkimuksen rajaus

Värähtelynvaimennukseen käytettävät algoritmit ovat Juha Orivuoren väitöskirjansa [7] pohjalta kehittämiä, ja niitä ei tulla käsittelemään tässä työssä yksityiskohtaisesti. Sen sijaan työssä keskitytään enemmän voima- ja paikkasäätöjen algoritmeihin ja integroinnin ongelmiin. Värähtelynvaimennuksen lisääminen prosessin säätöjärjestelmään vaatii myös järjestelmän graafisen käyttöliittymän muokkausta, jota ei toteuteta tässä työssä. Oleelliset muutokset käsitellään kuitenkin periaateatasolla.

1.5 Työn sisältö

Luvussa 2 esitellään kiinnirullausprosessiin vaikuttavia voimia ja prosessin yhtälöitä. Luvussa 3 puolestaan perehdytään siihen, miten prosessin voimia ja värähtelyjä voidaan säätää algoritmitasolla. Säädinten toteutus ja integrointi teollisuus-PC:lle käsitellään luvussa 4.

Luvussa 5 kehitetään simulaatiomalli säätimen testausta varten, ja lopullista säädintä testataan tehdaskokein luvussa 6. Lopullinen yhteenveto työstä ja sen tuloksista esitellään luvussa 7.

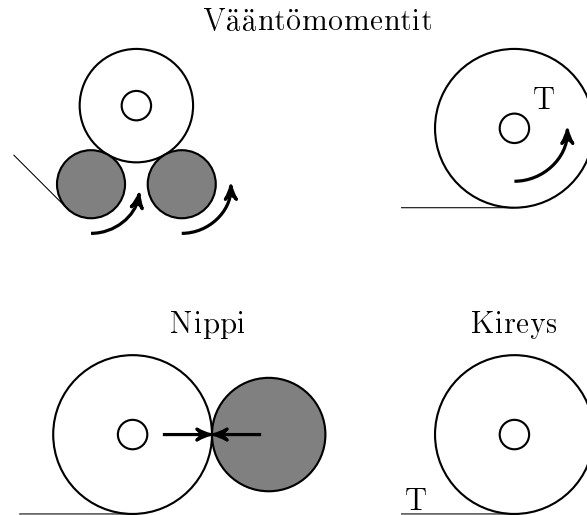
2 Kiinnirullausprosessissa vaikuttavat kontaktivoimat ja värähtely

Tässä luvussa käydään aluksi läpi paperirullan muodostumisen yleisiä pääkohtia sekä syitä sille, miksi kiinnirullausprosessin tarkka säätö ajon aikana on tarpeellista. Tämän jälkeen perehdytään ajon aikana rullaan vaikuttaviin kontaktivoimiin sekä niiden osuuteen rullan muodostumisessa. Luodaan myös katsaus prosessissa esiintyviin värähtelyihin sekä erilaisiin menetelmiin, joilla värähtelyjä voidaan vaimentaa. Lopuksi käydään vielä lyhyesti läpi yleisimpiä ongelmatapauksia, joita epäonnistunut kontaktivoimien säätö tai liiallinen värähtely voivat aiheuttaa rullassa.

2.1 Paperirullan muodostuminen

Paperin kiinnirullausprosessin lopputuote on asiakasrulla, jonka täytyy kestää kuljetusta ja varastointia sekä olla helposti käsiteltävissä asiakkaan painatus- tai muissa prosesseissa. Jotta rulla täyttäisi nämä vaatimukset, sen täytyy olla sekä rakenteeltaan kestävä että pinnaltaan pehmeä ja muokkautuva. Ulkomuodoltaan asiakasrullan pitää olla mahdollisimman pyöreä, jotta se aukirullautuu jälkikäsittelyprosesseissa tasaisesti. Rullan lopullinen rakenne ja muoto määräytyvät kiinnirullausprosessissa, joten on tärkeää säädellä prosessissa paperirainaan ja asiakasrullaan vaikuttavia kontaktivoimia mahdollisimman tarkasti koko ajon ajan. [8, 9]

Huonosti rakentunut asiakasrulla on altis muokkautumaan epäpyöreäksi vielä kiinnirullauksen jälkeisen jälkikäsittelynkin aikana puristusvoimien johdosta. Siihen saatetaan esimerkiksi kohdistua iskuja kuljetuksen aikana tai sitä varastoidaan pitkiä aikoja paikallaan, jolloin rulla puristuu hiljalleen lattiaa vasten. Epämuodostuneet ja rakenteeltaan epätasaiset rullat aiheuttavat myöhemmin ongelmia asiakkaan prosesseissa. Ne ovat pyöreitä rullia herkempiä värähtelyille ja saattavat aiheuttaa paperin ratakireyteen vaihtelua, mikä voi rikkoa paperiradan tai aiheuttaa kohdistusvirheitä painatuksessa. Asiakkaan painatusprosesseissa paperirataa pidetään yleensä erittäin kireänä kohdistusvirheiden välttämiseksi, joten pienetkin viat rullan rakenteessa tulevat tällöin esille. [10, 11]



Kuva 2: Havainnekuva kontaktivoimista [12, s. 7]

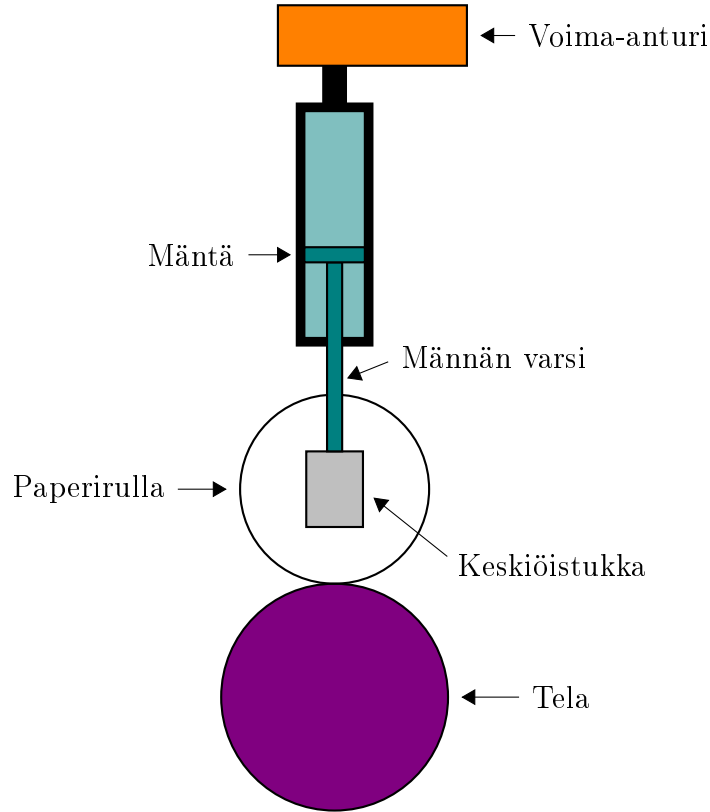
2.2 Kasvavien rullien kontaktivoimat

Rullan muodostumiseen voidaan vaikuttaa parhaiten säätelemällä rullausprosessissa vaikuttavia vääntömomenteja, nippivoimaa, paperiradan kireyttä ja rullausnopeutta. Kolmea ensin mainittua kutsutaan yleisesti yhteisnimityksellä TNT¹, ja niitä on havainnollistettu kuvassa 2. Minkä tahansa TNT-parametrin arvon kasvattaminen ajon aikana tekee yleensä rullasta tiiviimmän siitä kohdasta. [12, s. 6-7]

Perusperiaate rullan rakenteen oikeaoppiseen muodostumiseen on, että ensimmäiset kierrokset tulee rullata tiukasti hylsyn ympärille ja loput asteittain löyhemmin. Näin saadaan aikaan kestävä ja tukeva paperirulla, joka on myös helposti käsiteltävissä asiakkaan prosesseissa. [13] Tällainen rakenne saavutetaan, kun kaikkien TNT-parametrien arvot pienenevät lineaarisesti ajon aikana [12, s. 6].

Nipillä tai nippikontaktilla tarkoitetaan sitä kohtaa, missä kasvava paperirulla, syötettävä paperiraina ja pyörivä tela kohtaavat. Muodostuvan rullan rullauskireyttä säädellään pääsääntöisesti nippivoimilla. Mitä enemmän rullaa painetaan telaa vasten, sitä suurempi nippivoima on ja sitä tiiviimpi rullasta tulee. Rullan rakenteen säätelyn lisäksi nipin avulla estetään turhan ilman pääseminen paperikerrosten väliin, mikä osaltaan estää häiriöiden muodostumista rullan pinnalle. Jos ilmaa pääsee nipin ohi paperirullan sisälle, se vaikuttaa koko loppurullan laadun progressiiviseen heikkenemiseen. [3, 11, 14]

¹Torque, Nip, Tension



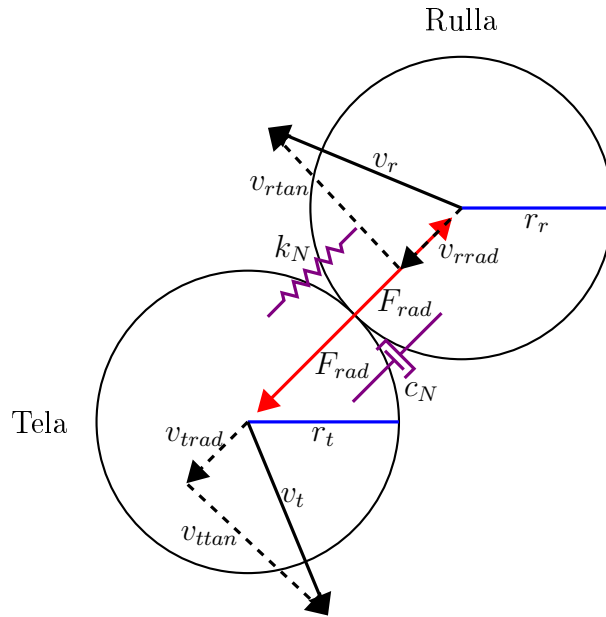
Kuva 3: Keskiörullaimen malli [15]

Kuvassa 3 on esitetty malli kiinnirullausprosessista keskiörullaimella. Kuten kuvassa 1, tässäkin paperirulla muodostuu hydraulivoimien puristuksessa. Telan ja rullan välisiin nippivoimiin vaikutetaan säätämällä rullan vertikaalista asentoa hydraulisesti männän avulla. Männän varren liikkeisiin puolestaan vaikutetaan syöttämällä prosessiin sopivaa ohjausjännitettä. Rullan ja telojen välisiä nippikontakteja voidaan kuvata jousivakioilla. Nippikontaktin mallintamiseksi on kehitelty useita erilaisia malleja, mutta prosessin yleisen dynamiikan ymmärtämisen kannalta jousi-massa-vaimennin kuvaa tilannetta riittävän hyvin, kunhan jousi- ja vaimennusvakiot valitaan tarkasti.

Kuvassa 4 on esitetty rullan ja telan välinen nippikontakti. Kuvassa esiintyvä radiaalinen nippivoima F_{rad} voidaan laskea kaavalla

$$F_{rad} = k_N(d - r_r - r_t) + c_N(v_{rrad} - v_{trad}) , \quad (1)$$

jossa k_N on jousivakio, c_N vaimennusvakio, r_r paperirullan säde, r_t telan säde ja d kappaleiden välinen etäisyys eli puristuma. Radiaaliseen voimaan vaikuttavat myös



Kuva 4: Telan ja rullan nippikontakti [16, s. 13]

kuvassa 4 näkyvien kappaleiden nopeusvektoreiden v_r ja v_t radiaalikomponentit v_{rrad} ja v_{ttrad} . [16, s. 13–14]

Kun rullausprosessi alkaa, paperia rullataan pelkän hylsyn ympärille, jolloin hylsyn jäykkyys muodostaa huomattavan osan nipin jousivakiosta. Myöhempien kierrosten aikana hylsyn vaikutus vähenee ja merkittävään asemaan nousee itse paperin ominaisuudet. Tästä johtuen nipin jousivakio pienenee yleensä rullan halkaisijan kasvaessa. [17, s. 66]

Jos nippipuristuksessa olevat paperikerrokset pääsevät liikkumaan suhteessa toisiinsa kiinnirullauksen aikana, lopullinen paperirulla epämuodostuu herkästi. Tällaisen lipsumisen kannalta tärkeä tekijä on se, miten rullauksen aikana rullaan kohdistunut nippipaine on jakautunut [18]. Vaihteleva paine aiheuttaa rullausjännityksen vaihtelua koko rullan leveydellä, mikä tekee rakenteeltaan yhtenäisen rullan muodostamisesta mahdotonta [11]. Lipsumisen välttäminen on niin merkittävä asia paperirullan rakenteellisen muodostumisen kannalta, että valmiin rullan sisäisten paineiden laskemiseksi on luotu useita erilaisia menetelmiä, jotta lopputuotteen laatu paranisi [19].

Good ja Fikes [20] ovat esimerkiksi tutkineet kokeellisesti keskiörullaimella muodostuvan paperirullan sisäisiä jännityksiä paperirainan pinnalle asetettujen voima-

antureiden avulla. Zwart ja Tarnowski [21] puolestaan ovat mallintaneet paperin sinimuotoisen paksuusvaihtelun vaikutusta rullan epäkeskisyyteen. Mallin mukaan vaihtelulla ei ole juurikaan vaikutusta ennen kuin sen aallonpituus on sama kuin muodostuvan rullan ympärysmitta. Tässä vaiheessa rullan epäkeskisyydessä tapahtuu askelmainen muutos, joka toistuu aina rullan halkaisijan kasvaessa seuraavaan monikertaan.

2.3 Muodostuvien rullien värähtely

Kaikki pyörivät laitteet ovat alttiita värähtelylle, ja pituusleikkurin kiinnirullain kärsii pohjimmiltaan samasta perusongelmasta [17, s. 81]. Värähtely johtuu tyypillisesti pyörivän rullan epätasapainoisuudesta tai akselin kohdistusvirheestä, minkä takia hallitseva värähtelytaajuus on usein yhteydessä rullan pyörimisnopeuteen ja sen harmonisiin monikertoihin [21, 22]. Pahimmillaan värähtely on silloin, kun rullaa ajetaan kriittisellä nopeudella, eli kun rullan pyörimistaajuus on sama kuin sen ominaistaajuus. Tämä johtuu siitä, että ominaistaajuuden stimulointi voi aiheuttaa rullassa liiallisen suuren vasteen, joka voi teoriassa kasvaa loputtomiin vaimentamattomassa ja lineaarisessa järjestelmässä. [23, s. 15]

Vaimentamattoman, yhden vapausasteen kappaleen värähtelyn ominaiskulmataajuus ω_n (rad/s) saadaan kaavasta

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

jossa m on värähtelevän kappaleen massa ja k sen jäykkyyttä kuvaava jousivakio [24, s. 5].

Kappaleen ominaistaajuus f_n (Hz) saadaan puolestaan laskettua tästä yksinkertaisesti

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3)$$

Vastaavasti useamman vapausasteen järjestelmässä, kuten esimerkiksi rullauspro-

sessissa, ominaiskulmataajuudet saadaan lasketuksi kaavalla [24, s. 17–18]

$$\omega_n = \sqrt{\lambda_n}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

jossa N on vapausasteiden lukumäärä ja λ_n järjestelmän ominaisarvot. Ominaisarvot ovat järjestelmän karakteristisen polynomin juuria, jotka voidaan laskea yhtälöstä

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{H}| = 0, \quad (5)$$

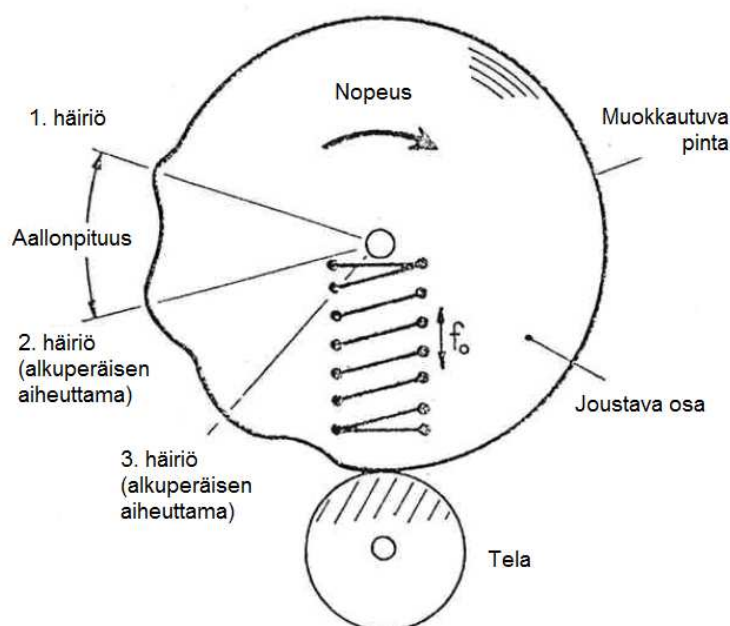
jossa \mathbf{I} on identiteettimatriisi ja \mathbf{H} dynaaminen matriisi, joka on määritelty massa- ja jäykkyyssmatriisien \mathbf{M} ja \mathbf{K} perusteella

$$\mathbf{H} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}. \quad (6)$$

Kaavoista (3)–(6) nähdään selvästi, että värähtelyn ominaistaajuus riippuu kappaleen massasta ja jäykkyydestä, jotka molemmat ovat rullausprosessin tapauksessa aikavariantteja suureita.

Rullan jatkuva kasvu ajon aikana sekä massaltaan että halkaisijaltaan vaikuttaakin ratkaisevasti prosessin värähtelyherkkyyteen. Rullat myös muovautuvat ajon aikana helposti lievästi epäpyöreiksi, ja jo tämä epäsymmetria saattaa olla aiheuttavana tekijänä värähtelyiden synnyssä. Kun rulla lähtee värähtelemään, se voi värähdellä joko horisontaalisesti, vertikaalisesti, keinoen tai jollain edellisten yhdistelmällä. [2, 22, 25] Rullausprosessissa esiintyvät tyypilliset värähtelyt ovat kaikin puolin monimuotoisempia ja vaikeammin kontrolloitavia kuin esimerkiksi paperikoneilla, joilla ajetaan tuotantoa tasaisella nopeudella ja tasaisilla massoilla [17, s. 81].

Dalyn jo vuonna 1967 esittämän teorian mukaan [26] rullausprosessin erityinen värähtelyherkkyys johtuu paperirullan ja telan ominaisuuksista. Pyörivän rullan oma pinta on pehmeä ja muokkautuva, ja sillä on tunnettu ominaisvärähtelytaajuus. Rulla pyörii jatkuvassa nippikosketuksessa telan päällä, joka puolestaan on kova ja muokkautumaton. Värähtelyn herätteenä voi toimia esimerkiksi paperiradan pinnalla oleva pieni epämuodostuma, joka joutuessaan rullan ja telan väliin saa aikaan värähtelyn synnyn rullassa, sillä rulla on telaa huomattavasti alttiimpi häiriöille elastisuutensa takia. Alkuperäinen häiriö kertaantuu rullan pyöriessä pyörimisnopeuden



Kuva 5: Häiriön vaikutus rullaan [26]

ja rullan ominaistajuuden funktiona. Kuvassa 5 on havainnollistettu, miten häiriö lähtee kertautumaan. Mikäli häiriö osuu joka kierroksen jälkeen samaan kohtaan rullaa, värähtely voi alkaa voimistua jopa siinä määrin, että rulla lopulta irtaantuu kokonaan nippikontaktista ja alkaa pomppia telan päällä. Tämä voi pahimmillaan johtaa paperiradan katkeamiseen ja koko asiakasrullan hylkäämiseen.

Kaikki paperirullat eivät kuitenkaan värähtelevä yhtä herkästi, vaan eri paperilaaduilla on havaittavissa huomattavia eroavaisuuksia. Osa paperilaaduista aiheuttaa tarpeeksi suurilla nopeuksilla jopa ilman erillistä häiriötekijää itsestään haitallista värähtelyä. Tällaisia papereita ovat esimerkiksi hienopaperi, pergamentti ja aaltopahvin päällyskartonki [2]. Paperin värähtelyherkkyyteen vaikuttavat varsinkin paperikerrosten välinen paine sekä kitkavoima. Kumman tahansa kasvaessa myös paperin alttius värähtelyille kasvaa. Esimerkiksi sanomalehtipaperilla ei juuri esiinny värähtelyongelmia, koska sen paperikerrosten välillä on verrattain pieni kitkavoima eikä sen rullauksessa voida koskaan käyttää kovin suuria nippivoimia repeytymisvaaran vuoksi. [26]

Jorkama ja von Herten [27] ovat jakaneet rullan itsensä herättämät värähtelyt yleisesti kolmeen kategoriaan. Ensimmäinen on alkukiihdytyksestä johtuva värähtely, jota esiintyy, kun rullaimen nopeutta kasvatetaan nopeasti nolasta maksiminopeuteensa. Värähtelyä esiintyy varsinkin aivan kiihdytysvaiheen lopussa ohuilla

ja päällystetyillä paperilaaduilla. Värähtely saa paperirullan liikkumaan akselinsa suuntaisesti, mikä muokkaa rullan reunoista epätasaiset. Tämäntyyppistä värähtelyä esiintyy rullan ollessa vielä melko pieni, joten värähtelytaajuus on suhteellisen korkea.

Toinen värähtelykategoria kattaa vakavimmat ongelmat, eli rullan epäkeskisyydestä johtuvan rullan pomppimisen. Sitä esiintyy etenkin siistatulla eli puhdistetusta keräyspaperista valmistetulla sanomalehtipaperilla ja paperipusseilla. Yleensä nämä laadut rullautuvat aluksi kauniisti, mutta 500–700 mm halkaisijan saavutettuaan alkavat hiljalleen muotoutua epäkeskiseksi. Värähtelytaajuus on aina sama kuin rullan pyörimistaajuus. [27]

Kolmatta värähtelytyyppiä esiintyy ensisijaisesti silloin, kun rulla pyörii jo tasaisella nopeudella ja sen pyörimistaajuuden monikerta korreloi telan ominaistajuuden kanssa. Tästä aiheutuu resonanssivärähtelyä varsinkin päällystämättömällä hienopaperilla sekä säkkipaperilaaduilla. [27]

Koska värähtelyt vaikuttavat keskeisesti paperirullien laatuun, on niitä pyritty mallintamaan useaan otteeseen. Onnistuneen mallin luominen edesauttaa värähtelyn synnyn mekanismien ymmärtämistä ja toimii alustana värähtelynvaimennusmenetelmien suunnittelulle [28]. Ilman kunnollista suunnittelua rullan ensimmäinen ominaistajuus saattaa esimerkiksi lähestyä sen pyörimistaajuutta [29].

2.4 Värähtelyn vaimennusmenetelmät

Erilaiset värähtelyn vaimennusmenetelmät jaetaan yleisesti kolmeen pääkategoriaan: passiiviseen, puoliaktiiviseen ja aktiiviseen vaimennukseen. Tässä osiossa käydään lyhyesti läpi jokaiselle kategorialle tyypilliset ominaisuudet ja käyttötarkoitukset.

2.4.1 Passiivinen vaimennus

Perinteisesti prosessien värähtelyä on vaimennettu lisäämällä järjestelmään passiivinen vaimennin. Tällainen voisi olla esimerkiksi suurehko massakappale, jonka lisääminen systeemin osaan alentaa sen ominaistajuutta. Muita passiivisia vaimentimia ovat iskunvaimentimet ja viritetyt massavaimentimet. Iskunvaimennin sijoitetaan pieneen kaappiin, ja se voi olla esimerkiksi vierivä pallo tai roikkuva metalliketju.

Kun värähtely saavuttaa kaapin, lähtee irtokappale liikkeelle ja kuluttaa energiaa törmäilemällä seiniin. Massavaimennin puolestaan viritetään samaan ominaistajuuteen kuin vaimennettava kappale ja kiinnitetään siihen jousella. Lopputuloksena järjestelmällä on kaksi resonanssitaajuutta yhden sijaan, ja ne sijaitsevat alkuperäisen molemmiin puolin. [17, s. 82–85]

Passiivisten vaimentimien idea on kuluttaa kineettistä värähtelyenergiaa pois tuomatta kuitenkaan uutta energiaa järjestelmään, jolloin prosessi pysyy myös aina stabiilina. Ne ovat halpoja ja erittäin monikäyttöisiä pienten kertalukujen systeemeissä. Ne eivät kuitenkaan toimi dynaamisesti tai ole suunniteltavissa helposti suurten kertalukujen järjestelmiin, kuten kiinnirullausprosessiin. [7, s. 15–18]

2.4.2 Puoliaktiivinen vaimennus

Puoliaktiivinen vaimennus vastaa monilta osin passiivista vaimennusta: siinäkään ei tuoda systeemiin ulkopuolista energiaa, joten prosessin stabiilisuuskaan ei muutu. Puoliaktiivinen vaimennus kuitenkin tukee vaimentimen parametrien dynaamista muuttamista, eli se ei ole ihan niin jäykkä kuin passiivinen vaimennus. Vaimennuksen suunnittelussa voidaankin ottaa huomioon prosessin käyttäytyminen vaihtelevissa toimintatilanteissa ja muuttaa esimerkiksi vaimennuskerrointa sen mukaisesti. [7, s. 18–19] Järjestelmän parametrien muuttamiseen tarvitaan hiukan ulkopuolista energiaa, mutta se on vähäistä verrattuna aktiivisen vaimennuksen tarpeisiin [17, s. 86].

Puoliaktiiviset vaimentimet voidaan jakaa kahteen joukkoon, joista toisilla on vaihteleva jäykkyys ja toisilla vaihteleva nopeus. Ensimmäiseen joukkoon kuuluvat muun muassa hydrauliset venttiilit ja jouset, joilla on mekaanisesti muuttuva jäykkyys. Jälkimmäiseen joukkoon puolestaan kuuluvat esimerkiksi elektro- ja magnetoreologiset vaimentimet. [7, s. 18–19]

Rullausprosessin kannalta puoliaktiivisen vaimennuksen käyttö on kuitenkin yhtä ongelmallista kuin passiivisenkin. Vaikka säätimen parametreja kyetäänkin muuntelemaan prosessin tilan mukaan, on kyseessä kuitenkin hyvin jäykkä järjestelmä, joka pitää räätälöidä erikseen kullekin prosessille. Monimutkaisen järjestelmän kohdalla tämä on lähestulkoon mahdoton suunnittelutehtävä. [7, s. 18–19]

2.4.3 Aktiivinen vaimennus

Aktiivinen vaimennus on värähtelynvaimennusmenetelmistä tehokkain, sillä siinä järjestelmään tuodaan ulkopuolista energiaa kompensoimaan värähtelyenergiaa. Yksinkertaistetusti kyseessä on siis yleensä värähtelylle vastakkaisvaiheisen sinisignaalin käyttö. Suunnittelun kannalta aktiivinen vaimennus on helpoin toteuttaa, sillä se ei välttämättä vaadi uusien fyysisten osien lisäämistä prosessiin ja siten prosessin muokkaamista. Värähtelyä voidaanakin tarkastella perinteisenä säätöongelmana, jonka ratkaisemiseksi voidaan käyttää kaikkia säätötekniikan työkaluja ja menetelmiä. Aktiivinen vaimennus vaatii kuitenkin jatkuvaa ulkopuolista energiaa ja laskenta-tehoja. Suurin ongelma aktiivisessa vaimennuksessa tosin on se, ettei sen kohdalla voida varmuudella taata, että systeemi on suljetussa muodossa jatkuvasti stabiili. [7, s. 19–23]

Aktiivinen värähtelynvaimennusjärjestelmä koostuu tavallisen säätöjärjestelmän tapaan yleensä toimilaitteista, sensoreista ja ohjausyksiköistä. Sensorit välittävät informaatiota prosessin tilasta ohjausyksikölle, joka toteuttaa säätöalgoritmia. Toimilaitteet puolestaan toteuttavat itse ohjauksen ohjausyksikön ohjeen mukaisesti. Eri toiminnallisuudet voidaan yhdistää myös sulautetuksi järjestelmäksi. [23, s. 15]

Aktiiviset vaimennusmenetelmät voidaan jakaa kahteen joukkoon sen perusteella, onko niiden tarkoituksena värähtelyn poisto vai sen eristäminen. Ensimmäiseen joukkoon kuuluvissa säätimissä itse värähtelyn lähde poistetaan tai kompensoidaan pois. Tämä on luonnollisesti parempi vaihtoehto, mutta on käytännössä usein mahdotonta toteuttaa, sillä vaimennukseen tarvittavat voimat voivat olla liian suuria eikä niitä aina voida kohdentaa suoraan värähtelyn lähteeseen. Värähtelyn eristämiseen perustuvissa menetelmissä puolestaan prosessin annetaan värähdellä vapaasti, ja ainoastaan värähtelyn siirtymistä rakenteesta toiseen rajoitetaan. [7, s. 19–23]

Kiinnirullausprosessi on suuren kertaluvun monimutkainen ja aikavariantti järjestelmä, jossa värähtelyä tapahtuu laajalla taajuusalueella, joten sen kohdalla aktiivisen vaimennuksen käyttö on toimivin ratkaisu [22].

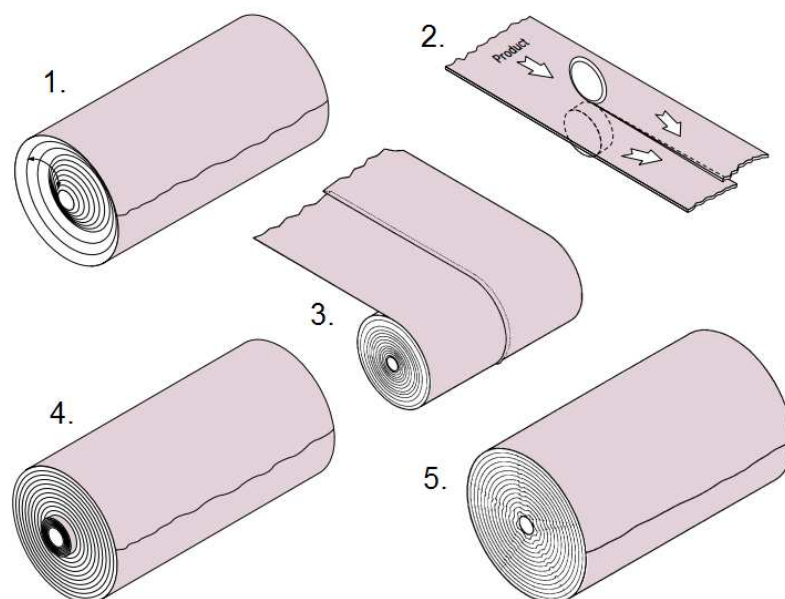
2.5 Prosessin häiriöiden seuraukset

Rullausprosessissa esiintyvät häiriöt voivat vaikuttaa monin eri tavoin paperirullan ja sen laatuun. Suurilla nopeuksilla ajettaessa pienikin häiriö saattaa aiheuttaa

huomattavia laatuongelmia lopputuotteessa.

Lefkowitz ja Boino ovat tutkimuksessaan [11] tarkastelleet yli 360 000 rullaa ja niiden käyttäytymistä painatusprosesseissa. Tutkimuksessa oli mukana yli kahdeksan paperilaatua 24 valmistajalta. Rullissa havaittiin yhteensä yli 85 erilaista vioittumistapaa. Vääränlaisesta rullan rakenteesta johtuvista ongelmista kaksi yleisintä olivat rullan epäpyöreys ja hylsyn epäkeskisyys.

Kuvassa 6 on kuvattu viisi eri tavoin epämuodostunutta rullaa.



Kuva 6: Vioittuneiden rullausprosessien tulosta [6]

Kuvassa 6 numerolla 1 oleva rulla muodostuu, kun rullaa ei pidetä tarvittavalla voimalla paikallaan kiinnirullauksen aikana, vaan se pääsee liikkumaan vähitellen akselinsa suunnassa. Liike näkyy lopputuotteessa paperin kuperana reunana. Tällainen häiriö johtuu yleensä kuormitustelan, kantotelan tai keskiöistukan kohdistusvirheestä. [6]

Rullassa numero 2 puolestaan on epäonnistunut pituusleikkauksen jälkeinen osarainojen erottaminen tarpeeksi kauaksi toisistaan ennen kiinnirullausta, ja ne ajautuvat lomittain. Tästä aiheutuu se, että vierekkäiset asiakasrullatkin hitsautuvat kiinni toisiinsa, ja niiden irrottaminen siististi on usein mahdotonta. [6] Tämänäyttöisiä ongelmia ei esiinny keskiörullainleikkureilla, sillä asiakasrullat eivät muodostu vierekkäin.

Rullaan numero 3 on syntynyt keskelle vekki, koska paperiradassa ei ole ollut kiin-

nirullausvaiheessa tasaista jännitystä. Epätasainen jännitys voi johtua esimerkiksi rullan kohdistusvirheestä. Paperin pintaan on päässyt tällöin muodostumaan esimerkiksi rullan tai telan värähtelyn seurauksena pieni ryppy, joka on nippipuristukseen joutuessaan prässäytynyt suuremmaksi vekiksi. [6]

Rullassa numero 4 näkyy askelmainen offset-virhe, joka voi aiheutua esimerkiksi kuormitustelan kohdistusvirheestä. Virheen takia nippikuorma on epäyhtenäinen. [6]

Numerolla 5 olevaan rullaan puolestaan on ensimmäiset kierrokset rullattu liian helästi, ja myöhemmät tiukemmat kierrokset ovat romahduttaneet ne. Lopputuotteessa tämä näkyy tähdenmuotoisena kuviona paperin reunassa. [6]

Suoraan rullissa näkyvien virheiden lisäksi etenkin värähtelyt rasittavat koko prosessin laitteistoa ja saattavat aiheuttaa osien ennen aikaista kulumista ja rikkoutumista. Rakenteiden väsyminen lisää ylläpitokustannuksia ja tuotannon seisokkeja, kun kulumuneita osia pitää huoltaa tai vaihtaa kokonaan uusiin. [22] Voimakkaasti värähtelevä systeemi on myös melu- ja turvallisuusriski lähistöllä työskenteleville ihmisille.

3 Säätöalgoritmit

Tässä luvussa tutustutaan kiinnirullausprosessin säätöjärjestelmään ja ajonaikaisessa säädössä käytettäviin algoritmeihin. Lopuksi käsitellään erilaisten säädinten integrointiin liittyviä ongelmia ja mahdollisia ratkaisuja näihin.

3.1 Säätöjärjestelmän kuvaus

Tutkittavan kiinnirullausprosessin säätöjärjestelmä koostuu voima- ja paikkasäädöistä sekä värähtelynvaimennuksesta. Tässä työssä säätimet yhdistetään yhdeksi integroiduksi säätimeksi, joka toteuttaa kaikkien kolmen erillisen säätimen toiminnallisuudet.

Säätimen prosessille antama jännitesignaali on välillä $-10\text{ V} \dots 10\text{ V}$, ja se vastaa männän kaksisuuntaisen venttiilin aukeamaa välillä $-100\% \dots 100\%$. Tutkittavassa rullausprosessissa lopullinen rulla muodostuu kahden erillisen männän varren välille, joita kutsutaan A- ja B-varsiksi.

3.2 Voima- ja paikkasäätö

Kuten kappaleessa 2.2 jo mainittiin, rullausprosessin voimasäädöllä tarkoitetaan nippivoiman säätämistä hydraulisyntlerin liikkeiden kautta. Nippivoimalla hallitaan paperirullan muodostumista oikeanlaiseksi.

Nippivoimaa säädetään epäsuorasti takaisinkytketyllä järjestelmällä, missä männän sylinterin paineen asetusarvo lasketaan nippivoiman asetusarvon sekä rullausmekanismin kuormitusten perusteella. Männän sylinterin paineen muutoksilla hallitaan männän varren liikkeitä. Säädon onnistumisen kannalta on tärkeää, että asetusarvot lasketaan riittävällä tarkkuudella ja laskuissa käytettävät tiedot esimerkiksi pituusleikkurin mittasuhteista, massoista ja kitkavoimista vastaavat mahdollisimman tarkasti todellisia arvoja. [9]

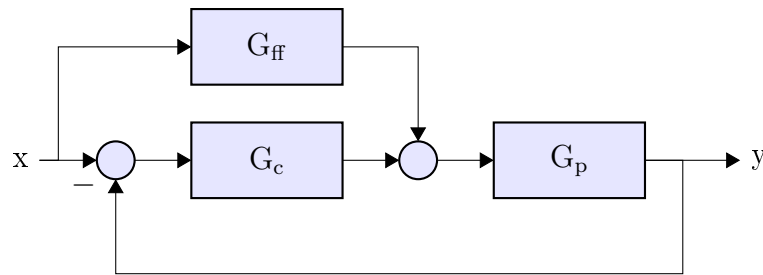
Paikkasäädintä käytetään puolestaan hylsyn tai rullan asettamiseen oikealle paikalleen rullausta varten ennen rullaustapahtumaa. Paikkasäätö toteutetaan voimasäädön tavoin männän varren liikkeitä hallinnoimalla.

Sekä paikka- että voimasäätöön on perinteisesti käytetty PI²-säädintä, joka koostuu vahvistavasta ja integroivasta osasta. Sen perusyhtälö siirtofunktiomuodossa on

$$G_c(s) = K_P(1 + \frac{1}{T_I s}) , \quad (7)$$

jossa K_P on säätimen P-termi eli vahvistus ja T_I I-termi eli integrointiaika. P-termi on suoraan verrannollinen takaisinkytketyn järjestelmän erosuureeseen, ja sitä kutsutaan myös säätimen suhdeosaksi. Vahvistuksen kasvattaminen nopeuttaa säätöä ja vähentää pysyvän tilan poikkeamaa, mutta kasvattaa maksimipoikkeamaa ja säädön asettumisaikaa. I-termi puolestaan integroi erosuuretta ajassa. Sen kasvattaminen poistaa pysyvää poikkeamaa, mutta lisää yleisesti värähtelyjä ja epästabiilisuutta prosessissa.

PI-säätimestä on jätetty pois säätötekniikan perussäätimiin kuuluvan PID³-säätimen D-termi eli derivoiva osa. Se derivoi erosuuretta ja huomioi sen muutosnopeuden, minkä takia säädin pystyy kompensoimaan poikkeaman jo muodostumisvaiheessa. D-termi kuitenkin myös vahvistaa erosuureen korkeataajuisia kohinaa ja saattaa aiheuttaa säätimen lähtöön liiallista värähtelyä, minkä takia sitä ei ole kannattavaa käyttää muutenkin värähtelylle alttiissa prosessissa.



Kuva 7: PI-säädetty prosessi myötäkkytkentätermillä

PI-säätimeen voidaan liittää takaisinkytkennän lisäksi myös feed-forward- eli myötäkkytkentätermi. Sillä pyritään kompensoimaan mahdollisten häiriötekijöiden aiheuttamia virheitä ennen kuin niiden vaikutus tulee näkyviin prosessin oloarvossa. Kiinnirullausprosessin kaltaisissa monimutkaisissa järjestelmissä myötäkkytkentätermi on usein muovautunut pitkällisen käytännön kokemuksen kautta ideaaliksi juuri tietyille prosessille. Myötäkkytkentätermi lisätään PI-säätäjän lähtöön, kuten on esitetty kuvassa 7. Kuvassa G_p on säädettävä prosessi, G_{ff} myötäkkytkentätermi ja G_c PI-säädin,

²Proportional-Integral

³Proportional-Integral-Derivative

jonka sisäinen toteutus vastaa kaavan (7) määrittelemää siirtofunktiota.

Kuvan 7 pohjalta voidaan muodostaa PI-säädetylle prosessille siirtofunktio tulosignaalista x prosessin lähtöön y :

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_p(s)(G_{ff}(s) + G_c(s))}{I + G_p(s)G_c(s)}. \quad (8)$$

PI-säätimen parametrien virittämiseen voidaan käyttää esimerkiksi Ziegler-Nicholsin askelvaste- tai värähtelyrajamenetelmiä. Parametrien valinta saattaa kuitenkin tuottaa vaikeuksia prosessin luonteen takia, sillä varsinkin värähtelyt hankaloittavat säätimen viritystä optimaaliseksi. Viime aikoina onkin ehdotettu PI-säätimen laajentamista esimerkiksi parametrien sumealla säädöllä [8].

3.3 Värähtelynvaimennus

Pyörivissä laitteissa vältetään pahimmat värähtelytasot yleensä, kun prosessia ei ajeta lähellä ominaistajuuksia. Tämä on kuitenkin toimimaton ratkaisu kiinnirullaimen tapauksessa. Rullan pyörimisnopeus kasvaa jokaisen ajon aikana nolasta maksiminopeuteen, mikä stimuloi rakenteiden ominaistajuuksia hyvin laajalla taajuusalueella. Vaikka ongelmataajuudet olisivat tiedossa, niitä on vaikeaa välttää. Värähtelyjen vaimennusta hankaloittaa entisestään se, että prosessin pyörivä osa on vain pieni osa suurta pituusleikkuria ja siten koneen muu toiminta asettaa pyörimisnopeudelle tiukat rajat. Pituusleikkurin monimutkaisuuden vuoksi sillä on myös useita ominaistajuuksia, joista kuitenkin suurin osa johtuu muista koneen osista kuin itse rullasta. Säädön kannalta niitä ei tarvitse ottaa huomioon. [22]

Rullausprosessin värähtelyjen vähentämiseksi on kehitetty kautta aikain monia erilaisia menetelmiä. Olshansky esitteli vuonna 1992 julkaistussa artikkelissaan [25] kattavan joukon suosituksia, joita noudattamalla vältetään pahimpien värähtelytasojen syntyminen systeemissä ilman tarvetta ottaa käyttöön erillinen värähtelynvaimennusjärjestelmä. Suositukset liittyivät niin laitteiston mekaanisiin ominaisuuksiin, säätimien ominaisuuksiin, rullan rakenteellisiin ominaisuuksiin, paperin ominaisuuksiin kuin prosessin toiminnallisiin ominaisuuksiinkin.

Prosessin osien rakenteellisilla muutoksilla ei kuitenkaan kyetä pääsemään eroon kaikesta haitallisesta värähtelystä, joten ilman erillistä vaimenninta ainoa kunnollinen

tapa välttää värähtelyjä on ajaa prosessia niin hiljaisella nopeudella, ettei se pääse stimuloimaan ominaistaajuuksia ja siten värähtelemään. Liian hidas ajonopeus kuitenkin muodostaa kiinnirullauksesta paperinvalmistusprosessin pullonkaulan, sillä muut työvaiheet toimivat nykyään jo suurilla nopeuksilla. Paineet kiinnirullausprosessin huomattavaksi nopeuttamiseksi kaikilla paperilaaduilla ovat kovat, ja näillä nopeuksilla erillisen värähtelynvaimentimen integrointi säätöprosessiin on välttämätöntä.

3.3.1 Aktiivivaimennusmenetelmiä

Rullausprosessin värähtelynvaimennuksessa voidaan käyttää monenlaisia aktiivivaimennusmenetelmiä adaptiivisista ja epälineaarisista säätimistä aina mallipohjaisiin ja tilatakaisinkytkettyihin säätimiin saakka. Yksikään säätöalgoritmi ei ole muita ylivoimaisesti parempi kaikissa sovelluksissa, vaan sopivin algoritmi tulee aina valita säädettävän prosessin ominaisuuksien perusteella. Orivuori ja Zenger ovat esimerkiksi artikkelissaan [30] analysoineet ja vertailleet viittä erilaista lineaarista aikainvarianttia aktiivivaimennusmenetelmää, joita kaikkia on aiemmin käytetty onnistuneesti käytännön ongelmien ratkaisussa.

Suurin osa tutkimuksessa vertailluista säätöalgoritmeista perustuu perinteiseen LQ⁴-säätimeen [30]. LQ-säädin on lineaariselle järjestelmälle toteutettava tilatakaisinkytkentä

$$u(t) = -Lx(t) , \quad (9)$$

jossa L on optimaalinen vahvistus. Jatkuva-aikaisessa tapauksessa yhtälö minimoi neliöllisen kustannusfunktion

$$J = \int_0^\infty (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt , \quad (10)$$

jossa Q on ulostulon ja R ohjauksen painomatriisi. Säätimen optimaalisuus riippuu näistä parametreista, joten ratkaisu saattaa olla vain lokaali minimi [15].

Koska kyseessä on tilatakaisinkytkentä, pitää säädettävä järjestelmä muuttaa tilae-

⁴Linear-quadratic

sitysmuotoon

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) + Du(t) \end{cases}, \quad (11)$$

jossa $u(t)$ on ohjausjännite ja $y(t)$ mitattu nettovoima [22]. Matriisi A on systeemi-matriisi, B ohjausmatriisi, C lähtömatriisi ja D suoravaikutusmatriisi.

Optimaalinen vahvistus L saadaan näin laskettua kaavalla

$$L = R^{-1}B^TS, \quad (13)$$

jossa puolestaan S saadaan Riccatin yhtälöstä

$$A^TS + SA - SBR^{-1}B^TS + Q = 0, \quad (14)$$

joka on ratkaistavissa numeerisesti.

Perinteinen LQ-säädin on kuitenkin lineaarinen, joten se tarvitsee epälineaarisen laajennuksen, jotta sitä voidaan käyttää onnistuneesti voimakkaasti epälineaarisen kiinnirullausprosessin kontrolloinnissa. Lineaarisella säätimellä säätimen ohjaus on nimittäin sovellettavissa ainoastaan tietyllä ennaltamääritetyllä pyörimistajuudella, ja tämän ulkopuolella säädin muuttuu epävakaaksi. Rullausprosessin vaihtelevien häiriötaajuuksien vaimentamiseen lineaarinen säädin ei siis sovi yksin. [22]

Orivuoren ja Zengerin säätöalgoritmien vertailun [30] tuloksena todettiin, että LQ-säätimeen perustuvat mallipohjaiset säätimet ovat suositeltavia sovelluksissa, joissa suorituskyky ja stabiilisuus ovat tärkeitä tekijöitä. Toisaalta taas sovelluksissa, joissa prosessia ei kyetä mallintamaan kunnollisesti tai käytettävissä oleva laskentateho on pientä, suositeltavin säätöalgoritmi olisi harmoniseen HC⁵-säätimeen perustuva IHC⁶-säädin, joka oli tutkimuksen kohteena olleista säätimistä ainoa ei-mallipohjainen.

Perinteisen harmonisen säätimen suurimpia ongelmia on sen hitaus, joka johtuu vaa-

⁵Harmonic Control

⁶Instantaneous Harmonic Control

timuksesta, että säätimen tulee odottaa, että prosessi saavuttaa vakaan tilan, ennen kuin se voi päivittää säätöohjettaan. IHC-säätimessä tämä ongelma on korjattu. [30]

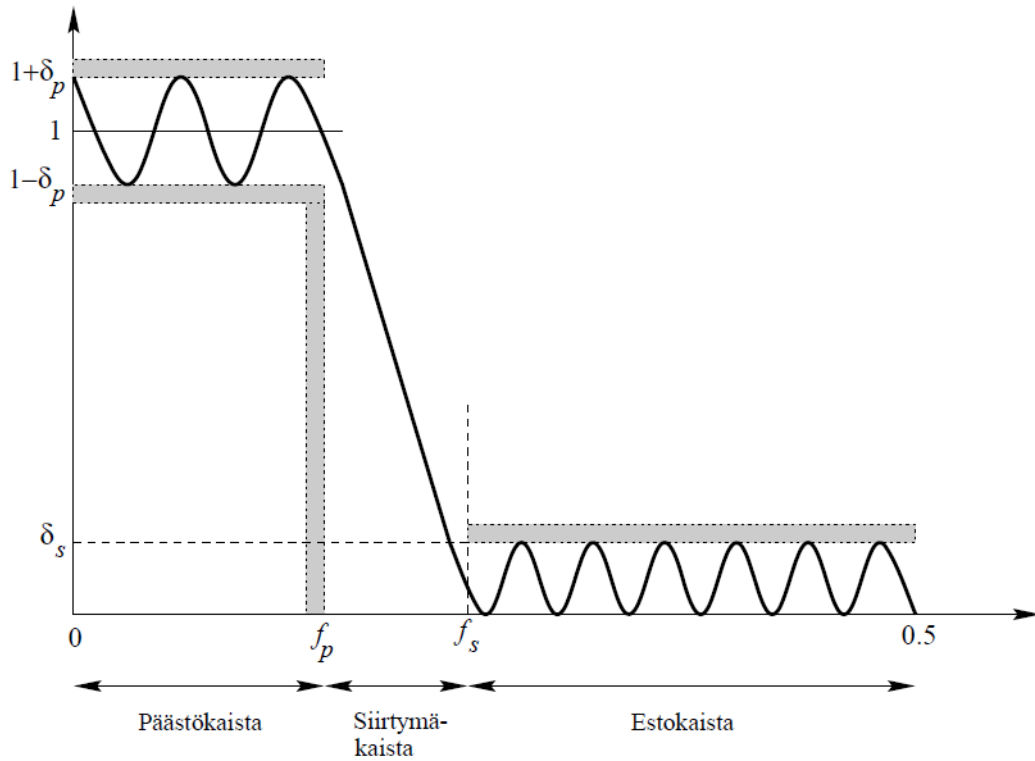
Tässä työssä käytetty lopullinen värähtelynvaimennin on toteutettu Orivuoren väitöskirjansa [7] pohjalta kehittelemien algoritmien mukaisesti.

3.4 Säädinten yhteistoiminta

Rullausprosessin luonteen takia voimasäädin on toiminnassa koko ajon ajan. Paikkasäädin ei ole päällä koskaan samanaikaisesti voimasäätimen kanssa, vaan sitä käytetään ainoastaan ennen ajoa ja sen jälkeen hylsyn tai rullan asettamiseen oikealle tasolle. Eriaikaisesta toiminnasta johtuen paikka- ja voimasäädin eivät koskaan häiritse toisiaan. Värähtelynvaimennin puolestaan toimii voimasäätimen tavoin ajon aikana ja lisää tarvittaessa voimasäätimeltä tulevaan jänniteohjeeseen vaimennuksen vaatiman lisäjännitteen. Säätimet toimivat rinnakkain ja säätävät samaa toiminnallisuutta prosessissa, joten niiden on toimittava saumattomasti yhteen koko ajan, eivätkä ne saa häiritä toistensa säätöyrityksiä kasvattamalla omaa säätöään turhan suureksi.

Suurimman osan ajasta tästä ei koidu ongelmia, koska värähtelynvaimentimen säätö on pientä tai olematonta ja voimasäädin vastaa säädöstä pääosin yksin. Ongelmia saattaa kuitenkin ilmetä värähtelytaajuudella, kun värähtelynvaimennin alkaa toteuttaa vaimennustaan. Tällöin sen antaman jänniteohjeen suuruusluokka nousee nopeasti. Jos voimasäädin tässä tilanteessa jatkaa oman säätöalgoritminsa suorittamista itsenäisesti, se pyrkii luonnollisesti kompensoimaan omasta näkökulmastaan liian suurta säätötulosta voimistamalla omaa jänniteohjettaan vastakkaiseen suuntaan. Värähtelynvaimennin puolestaan reagoi tähän kasvattamalla omaa säätöään, ja nopeasti ollaan tilanteessa, jossa säätimet kilpailevat toisiaan vastaan.

Eräs ratkaisu ongelmaan on yhdistää voimasäätimeen esisuodatin, joka vaimentaa säätimen toimintaa halutuilla taajuuksilla. Prosessissa esiintyvät värähtelyt ovat pääosin korkeataajuisia, joten värähtelynvaimentimen antama säätöohje saa suurimmat arvonsa korkeilla taajuuksilla. Tästä syystä voimasäätimen suodattimeksi on perustelluinta valita alipäästösuo-datin, joka vaimentaa määriteltä rajataajuutta korkeampitaajuiset signaalit ja päästää läpi vain matalataajuiset [31, s. 139]. Kun värähtelynvaimennin toimii pääosin korkealla taajuusalueella ja voimasäädin matalammilla taajuuksilla, voidaan estää säädinten keskinäinen kilpailu.



Kuva 8: Alipäästösudattimen amplitudivaste taajuuden funktiona [32, s. 79]

Kuvassa 8 on esitetty alipäästösudattimen periaate sen amplitudivasteen kautta. Päästökaistalle kuuluvat päästökaistan rajataajuutta f_p pienemmät taajuudet. Niiden amplitudivasteiden halutaan pysyvän lähellä arvoa 1, eli niitä ei suodateta. Amplitudille sallitaan maksimipoikkeama δ_p . Vastaavasti estokaistalle kuuluvat estokaistan rajataajuutta f_s suuremmat taajuudet, joiden amplitudivasteiden halutaan olevan 0, eli ne suodatetaan pois. Jälleen amplitudille sallitaan maksimipoikkeama δ_s . Rajataajuuksien välille jää siirtymäkaista, jonka kohdalla signaalia suodatetaan jonkin verran. [32, s. 79–80]

Lineaariset sudattimet voidaan jakaa kahteen luokkaan: IIR⁷-sudattimiin ja FIR⁸-sudattimiin. FIR-sudattimen impulssivaste on äärellisen mittainen, eli tietyn rajan jälkeen impulssivaste saa aina arvon 0. Se määritellään yleisessä muodossaan kaavalla

$$y(n) = \sum_{k=0}^M h(k)x(n-k) , \quad (15)$$

⁷Infinite Impulse Response

⁸Finite Impulse Response

jossa $h(n)$ on impulssivaste, $x(n)$ suodattimeen sisäänmenevä signaali ja M suodattimen aste, joka määräytyy suurimman viipeen mukaan. [32, s. 24–27]

IIR-suodattimella puolestaan impulssivaste on äärettömän pitkä ja yleisen muodon kaava on muotoa

$$y(n) = \sum_{k=0}^K a_k x(n-k) + \sum_{m=1}^M b_m y(n-m) , \quad (16)$$

jossa $x(n)$ on sisäänmenevä signaali, $y(n)$ ulostuleva signaali ja a_k sekä b_m suodattimen määrittelyyn käytettyjä kertoimia, joille $k = 0, 1, \dots, K$ ja $m = 1, 2, \dots, M$, kun K ja M ovat positiivisia kokonaislukuja. [32, s. 24–27]

Kaavoista (15) ja (16) havaitaan, että FIR-suodattimet ovat yksinkertaisempia ja käyttävät laskennassaan hyväkseen vain sisäänmenevän signaalin nykyisiä ja aiempia arvoja. IIR-suodattimet puolestaan ottavat huomioon myös ulostulevan signaalin nykyiset ja aiemmat arvot. Tästä johtuen IIR-suodattimet ovat tehokkaampia ja monipuolisempia, joskin FIR-suodattimien etu on, että ne pysyvät aina stabiileina. [33]

Tutkittavan prosessin tapauksessa voimasäätimen voimamittauksen alipäästösuodattukseen on järkevintä käyttää IIR-suodatinta, sillä ei ole erityistä tarvetta ajaa impulssivastetta missään vaiheessa kokonaan nolnaan. Suodattimen suunnittelussa on kuitenkin pidettävä huolta siitä, että systeemi pysyy stabiilina kaikissa tapauksissa. Jotta systeemi olisi suodattimen lisäämisen jälkeenkin stabiili, on suodattimen napojen sijaittava yksikköympyrän sisäpuolella. Lisäksi napojen ja nollien tulee esiintyä konjugaattipareina, jotta systeemi olisi reaalinen.

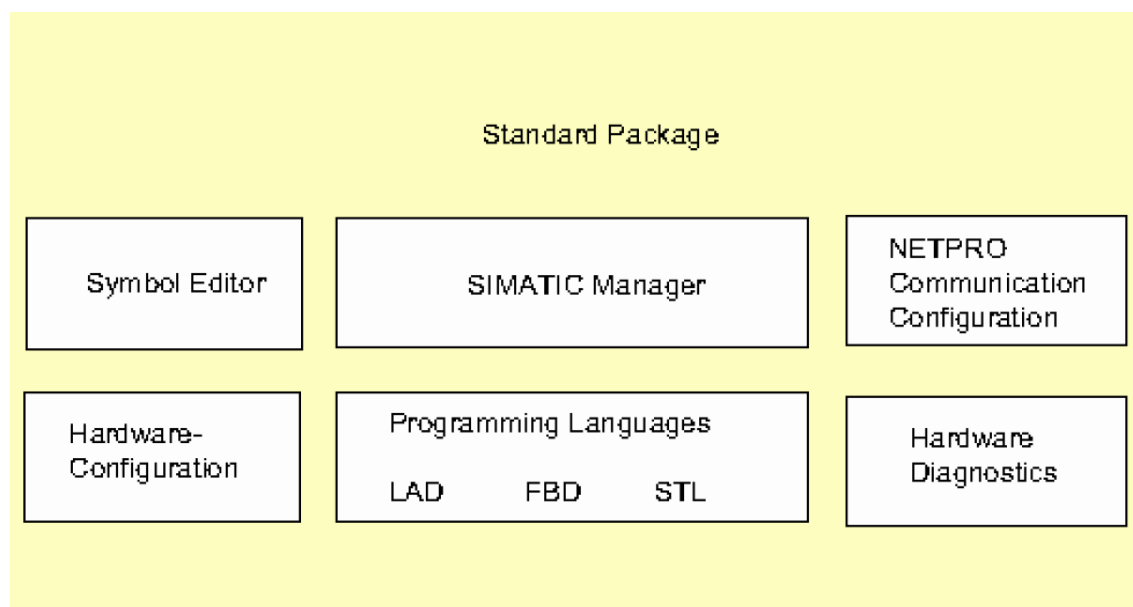
IIR-suodattimille on olemassa useita suunnittelutekniikoita. Erilaisia suodatintyyppejä ovat muun muassa Butterworth-, Tšebyšov- ja elliptinen suodatin. Butterworth-suodatin antaa tasaisen, monotonisesti laskevan taajuusvasteen, joka on päästökaistalla ja estokaistalla tasainen. Tšebyšov-suodattimella siirtymäkaista saadaan kaapeammaksi ja näin ollen siirtymä jyrkemmäksi, mutta joko päästökaistalla (tyypin I suodatin) tai estokaistalla (tyypin II suodatin) esiintyy vakio- tai aaltoilua. Elliptisellä suodattimella suodatus on vieläkin jyrkempi, mutta aaltoilua esiintyy sekä päästö- että estokaistalla. [34]

4 Sädinten integrointi teollisuus-PC:lle

Tässä luvussa esitellään kappaleissa 4.1 ja 4.2 integroidun säätöjärjestelmän toteutuksessa käytettävät alustat sekä kappaleessa 4.3 alustojen välinen kommunikaatio. Edellisessä luvussa esitellyt säätöalgoritmit toteutetaan uudella alustalla kappaleissa 4.4–4.6. Lopuksi kappaleessa 4.7 käsitellään periaatetasolla, miten rullausprosessin alkuperäistä graafista käyttöliittymää tulisi muokata, jotta sen avulla voisi hallinnoida paremmin uudella integroidulla säätimellä säädettyä järjestelmää.

4.1 Siemens S7

Pituusleikkurin säätöjärjestelmä on toteutettu alun perin Siemensin SIMATIC S7 -logiikalla, jonka tukemat ohjelmointikielet ovat yhteensopivia IEC 61131-3 -standardin kanssa. Ohjelma on kirjoitettu käyttäen Function Block Diagram (FBD), Statement List (STL)⁹ ja Structured Control Language (SCL)¹⁰ -kieliä. S7-logiikan ohjelmointiin ja kaiken automaatioprojektiin liittyvän datan hallinnointiin käytetään Siemensin SIMATIC Manager -ohjelmointiympäristöä. [35, s. 28-31] Kuvassa 9 on esitetty ohjelmiston sisältö.



Kuva 9: S7-ohjelmiston rakenne [35, s. 29]

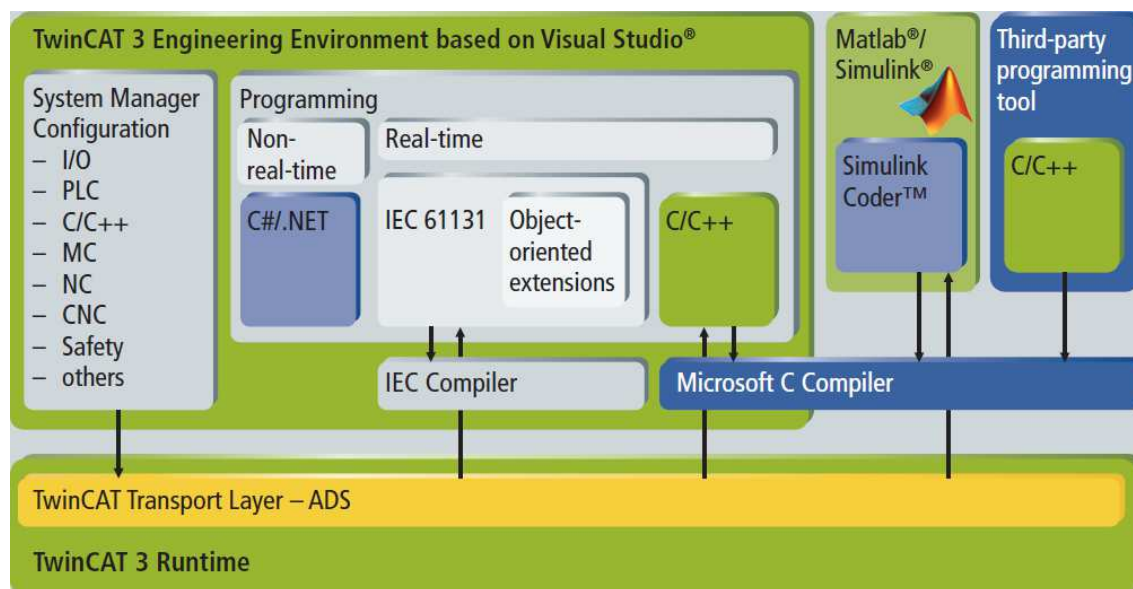
⁹STL vastaa standardin määrittelemää Instruction List (IL) -kieltä

¹⁰SCL vastaa standardin määrittelemää Structured Text (ST) -kieltä

Säätöjärjestelmään integroitava värähtelynvaimennusalgorithmi on toteutettu MATLABin Simulink-mallina, minkä integroiminen alkuperäisen järjestelmän yhteyteen olisi hankalaa, sillä S7 ei tue käytettyä ohjelmointikieltä. Jotta uusi toiminnallisuus olisi mahdollista toteuttaa, on se implementoitava kokonaan uudelle alustalle. Vanhat voimasäätöalgoritmit tulee myös siirtää uudelle alustalle, jotta ne pystyvät toimimaan saumattomasti värähtelynvaimennuksen rinnalla eikä eri säätimien välille muodostu haitallisia kommunikaatiokatkoksia.

Ohjelma siirretään uudelle alustalle vain niiltä osin kuin uuden värähtelynvaimennuksen toimivuuden kannalta on välttämätöntä. Suurin osa rullausprosessin toiminnallisuudesta jää siis yhä S7:n puolelle, ja se on käytössä entiseen tapaansa. Tähän on syynä muun muassa ohjelman suuri koko, jolloin koko toiminnallisuuden siirtäminen uudelle alustalle olisi tarpeettoman suuri operaatio ilman merkittäviä hyötyjä, sillä pääosa logiikasta toimii vanhalla alustalla moitteettomasti. S7 on myös operaattoreille tuttu alusta, joten käyttöliittymä tullaan säilyttämään sen yhteydessä. Näin uuden toiminnallisuuden käyttöönotto näkyy operaattoreille vain hieman muokattuna käyttöliittymänä.

4.2 Beckhoff TwinCAT 3



Kuva 10: TwinCAT XAE-arkkitehtuuri [36]

Uuden värähtelynvaimennuksen alustaksi valittiin Beckhoff TwinCAT 3¹¹ -logiikka.

¹¹The Windows Control and Automation Technology

TwinCAT tukee PLC¹²-ohjelmoinnissa IEC 61131-3 -standardin määrittelemien kielten lisäksi MATLAB/Simulink- ja C/C++-ohjelmointikieliä [36, s. 3]. Alustalle on siis mahdollista implementoida värähtelynvaimennuksen logiikka sekä siirtää S7:n puolelta ohjelman osia miltei alkuperäisessä muodossaan.

TwinCAT-ohjelmisto koostuu TwinCAT XAE¹³ -ohjelmointiympäristöstä ja teollisuustietokoneella ajettavasta TwinCAT XAR¹⁴ -ajoympäristöstä. XAE-ohjelmointiympäristö on integroitavissa Microsoftin Visual Studio -kehitysympäristöön, jonka omat ominaisuudet ovat myös käytettävissä TwinCAT-projektin ohjelmoinnissa ja teollisuustietokoneen konfiguroinnissa. Teollisuustietokoneessa ajettava XAR-ajoympäristö puolestaan liitetään säädettävän rullausprosessin yhteyteen, ja sillä ajetaan käännettyä ohjelmakoodia. Kuvassa 10 on esitetty TwinCAT:n XAE-arkkitehtuuri.

TwinCAT:n toimintalogiikka perustuu modulaarisuuteen. Ohjelmassa on määritelty moduuleiksi esimerkiksi teollisuustietokoneen fyysiset moduulit, PLC-moduulit ja yksittäiset ohjelmafunktiot. Moduulit toteuttavat standardisoidun TcCOM¹⁵-rajapinnan, jonka avulla TwinCAT pystyy käsittelemään erilaisia ja eri ohjelmilla ja ohjelmointikielillä luotuja moduuleja samalla tavalla. Moduulit pystyvät kommunikoidaan keskenään erikseen määriteltyjen input- ja output-muuttujiensa kautta, jotka on linkattu toisiinsa ohjelmointiympäristössä.

Modulaarisuuden ansiosta uusien toiminnallisuuden lisääminen kokonaisuuteen onnistuu helposti. Ohjelman eri osat myös pysyvät toisistaan riippumattomina, eivätkä yksittäiseen moduuliin tehdyt muutokset vaikuta sen toiminnalliseen yhteensopivuuteen muiden moduulien kanssa. Jokaiselle moduulille asetetaan oma suoritusaikataulunsa ja prioriteettinsa, joiden perusteella TwinCAT XAR suorittaa niitä.

Tietokone kerää input-moduuleiden kautta mittauksia suoraan prosessilta. Mitattavia suureita ovat kummankin varren paikat, voimat ja kiihtyvyydet, pulssi, ATA¹⁶-kortin lähtö, varren ja männän paineet sekä salvan asento. Käytettävät input-moduulit on esitetty taulukossa 3. Näiden lisäksi logiikka saa Profibus-liitännän kautta S7-ohjelman puolelta tarvittavia arvoja.

¹²Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikka

¹³Extended Automation Engineering

¹⁴Extended Automation Runtime

¹⁵TwinCat Component Object Model

¹⁶Advanced Technology Attachment, liitäntä sisäisen tai ulkoisen massamuistilaitteen kytkemiseksi tietokoneeseen

¹⁷Integrated electronic piezoelectric accelerometer

Taulukko 3: TwinCAT3:n input-moduulit.

Input	Signaali	Resoluutio
Paikka A	analog. $-10\text{ V} \dots 10\text{ V}$	16 b kokonaisluku
Paikka B	analog. $-10\text{ V} \dots 10\text{ V}$	16 b kokonaisluku
Voima A	analog. $-10\text{ V} \dots 10\text{ V}$	16 b kokonaisluku
Voima B	analog. $-10\text{ V} \dots 10\text{ V}$	16 b kokonaisluku
Kiihtyvyys A	analog. IEPÉ ¹⁷ -kiihtyvyysanturi	16 b kokonaisluku
Kiihtyvyys B	analog. IEPÉ-kiihtyvyysanturi	16 b kokonaisluku
Pulssi	digit. aikaleimalla	36 b aikaleima
Salvan asento	digit. aikaleimalla	36 b aikaleima
ATA-kortin lähtö	analog. $-10\text{ V} \dots 10\text{ V}$	16 b kokonaisluku
Paine varsi	analog. $-10\text{ V} \dots 10\text{ V}$	16 b kokonaisluku
Paine mäntä	analog. $-10\text{ V} \dots 10\text{ V}$	16 b kokonaisluku

4.3 Profibus-kommunikaatio

Profibus on IEC 61158 -standardin määrittelemä avoin kenttäväyläjärjestelmä, jota käytetään liittämään hajautettuja kenttälaitteita automaatiojärjestelmään [37].

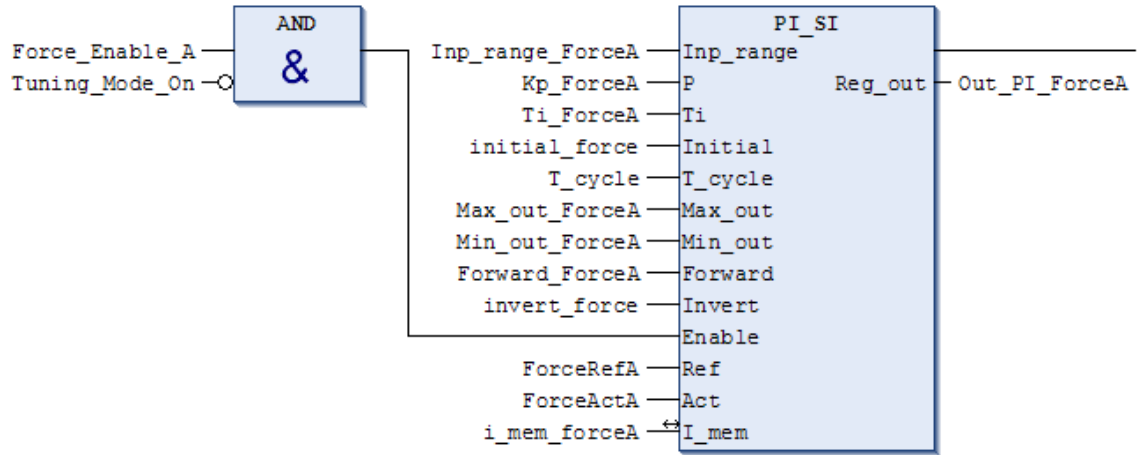
Tässä toteutuksessa Profibus-liitäntää käytetään S7:n ja TwinCAT3:n välillä sovellusten väliseen kommunikaatioon. Suurin osa ohjelmasta on S7:n puolella, joten useita prosessin parametreja on siirrettävä sieltä reaaliaikaisesti TwinCAT3:lle, jotta niitä voidaan käyttää hyväksi paikka- ja voimasäädössä sekä värähtelynvaimennuksessa.

Arvot siirretään S7:lta TwinCAT3:n puolelle yhdessä 64-sanaisessa viestissä, jonka jokainen sana koostuu 16 bitistä. Jokainen sana sisältää yhden arvon, joka on skaalattu sopivankokoiseksi siten, että arvo siirtyy mahdollisimman tarkasti bittimäärän sallimissa rajoissa. Yksi biteistä on merkkibitti, joten skaalatun arvon ilmaisemiseksi on käytettävissä 15 bittiä, eli sen tulee olla desimaalimuodossa välillä $-32\,768 \dots 32\,768$. TwinCAT3:n puolella arvot skaalataan taas alkuperäisiksi käyttämällä vastakkaista muunnosta.

Monet siirrettävistä suureista ovat suhteellisen staattisia, eikä S7:n puolella oleva ohjelma muokkaa niitä ajon aikana. Operaattoreilla on kuitenkin mahdollisuus muuttaa näitäkin arvoja prosessin graafisen käyttöliittymän kautta, joka sijaitsee yhä S7:n yhteydessä. On erittäin tärkeää, että myös tällaiset manuaalisesti tehdyt muutokset siirtyvät viipymättä TwinCAT3:n puolella olevaan ohjelmaan, joten Profibus-viestissä kulkee koko ajan kaikki säädön kannalta oleellinen informaatio.

4.4 Kontaktivoimien säätö

Kontaktivoimien säätö on toteutettu integroidussa säätimessä PI-säätimellä. Kuvassa 11 on esitetty PI-säätimen toteutus TwinCAT3:n puolella lohkokaaaviomuodossa. Kuvan säätimellä säädetään A-varteen vaikuttavaa voimaa, ja vastaava on olemassa myös B-varrelle.



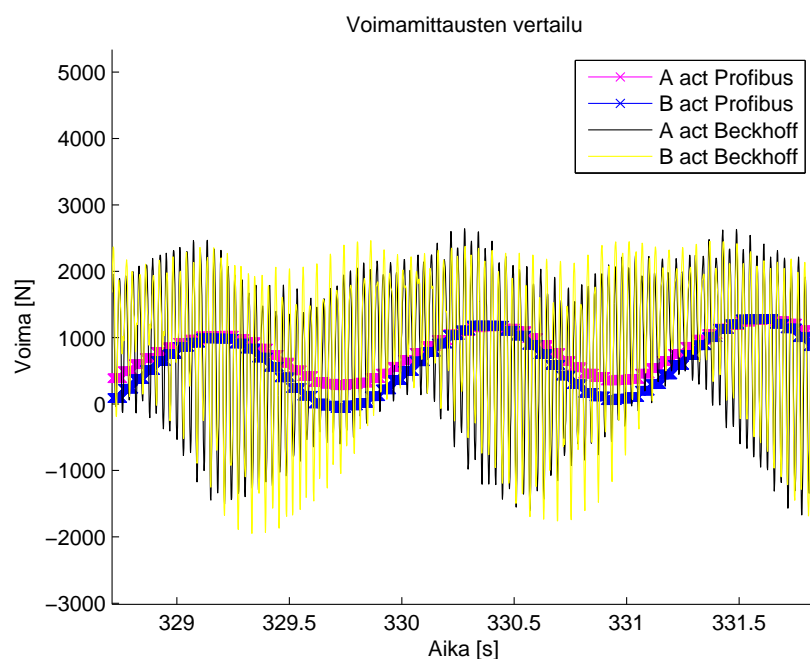
Kuva 11: Voimasäätimen FBD-esitys TwinCAT3:ssa

Taulukko 4: PI-säätimen parametrit

Parametrin nimi	Lyhenne	Tyyppi	Alkuperä
Tulon maksimiarvo	Inp_range	Reaaliluku	Profibus-viestistä
P-termi	P	Reaaliluku	Profibus-viestistä
Integraatioaika	Ti	Reaaliluku	Profibus-viestistä
Alustava voima	Initial	Reaaliluku	TwinCAT-ohjelmasta
Aikasykli	T_cycle	Reaaliluku	Profibus-viestistä
Maksimilähtö	Max_out	Reaaliluku	Profibus-viestistä
Minimilähtö	Min_out	Reaaliluku	Profibus-viestistä
Myötäkytkentätermi	Forward	Reaaliluku	Profibus-viestistä
Erosuureen inverssi	Invert	Totuusarvo	TwinCAT-ohjelmasta
On-off-kytkin	Enable	Totuusarvo	Profibus-viestistä
Voiman ohjearvo	Ref	Reaaliluku	Profibus-viestistä
Voiman oloarvo	Act	Reaaliluku	Alipäästösuodattimelta
Integraalitermi	I_mem	Reaaliluku	TwinCAT-ohjelmasta

PI-säätimen saamat parametrit on esitetty taulukossa 4. Suurin osa parametreista tulee Profibus-liitännän kautta S7-ohjelman puolelta, mutta huomattavinta on, että voiman oloarvo saadaan Beckhoffin omalta mittauskortilta ja se tulee säätimelle alipäästösuodattimen kautta.

Alun perin voimasäädinten voimareferenssinäkin käytettiin S7:n puolella mitattuja arvoja, jotka siirrettiin Beckhoffille Profibus-väylän kautta. Väylää pitkin siirtyvät arvot kuitenkin saapuivat liian hitaalla syklillä säätimelle, jolloin signaaleissa havaittiin säätötuloksen kannalta haitallista laskostumista. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 12, jossa vertailussa ovat erään koeajon aikana Profibus-väylän kautta saadut voimamittaukset ja Beckhoffin omat mittaukset sekä A- että B-varrelle erikseen. Kuvasta huomataan, että voimareferenssin taajuus on Profibus-väylän kautta tulevassa tapauksessa huomattavasti pienempi kuin suoraan prosessista mitatussa. Lisäksi S7:n mittauksiin on tullut viivettä, mikä johtuu luonnollisesti siitä, että ne siirtyvät Profibus-liitännän kautta.



Kuva 12: Beckhoffin ja Profibusin kautta saatujen voimamittausten vertailua

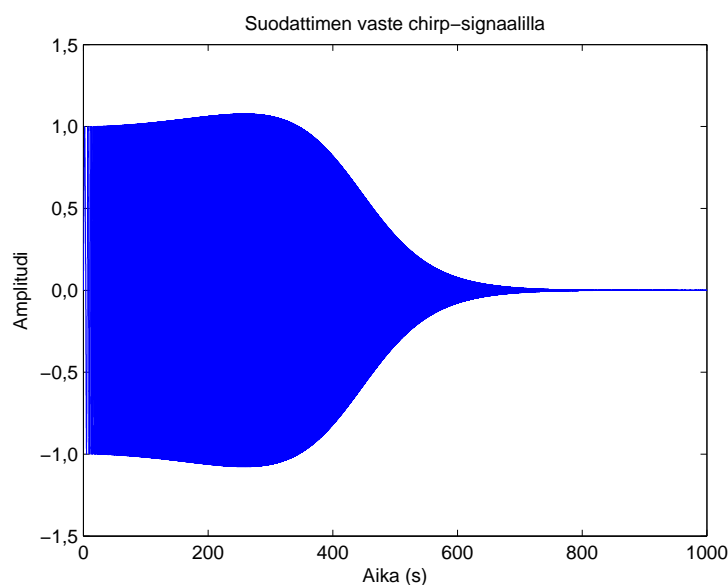
Säätimeen on toteutettu normaalin PI-säätimen toiminnallisuuden lisäksi myös anti-windup -ominaisuus, joka estää integraalitermin päivittymisen sen jälkeen, kun toimilaite on saturoitunut. Ilman tätä rajoitusta integraattori saattaa jatkaa erosuureen integroimista todella suuriin arvoihin toimilaitteen saturoiduttua. Kasvaneen integraalitermin purkaminen voi kestää pitkäänkin sen jälkeen, kun järjestelmän vaste on jo muuttunut. Taulukossa 4 mainittu integraalitermi onkin tästä syystä sekä tulo-että lähtöparametri, ja sitä päivitetään samalla syklillä kuin säätimen lähtöarvoa.

Säädin antaa ulostulonaan arvon väliltä $-1 \dots 1$, joka myöhemmin pääohjelmassa skaalataan jänniteohjaukseksi välille $-10 \text{ V} \dots 10 \text{ V}$ yhden millivoltin tarkkuudella.

4.4.1 Voimasäätimen alipäästösuo-datus

Voiman oloarvon alipäästösuo-datus tapahtuu ennen PI-säätimen algoritmien suorittamista. Suodatin on toteutettu MATLABin Simulink-mallina värähtelynvaimennuksen yhteyteen, ja sen integroiminen TwinCAT3:n puolelle on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.6.

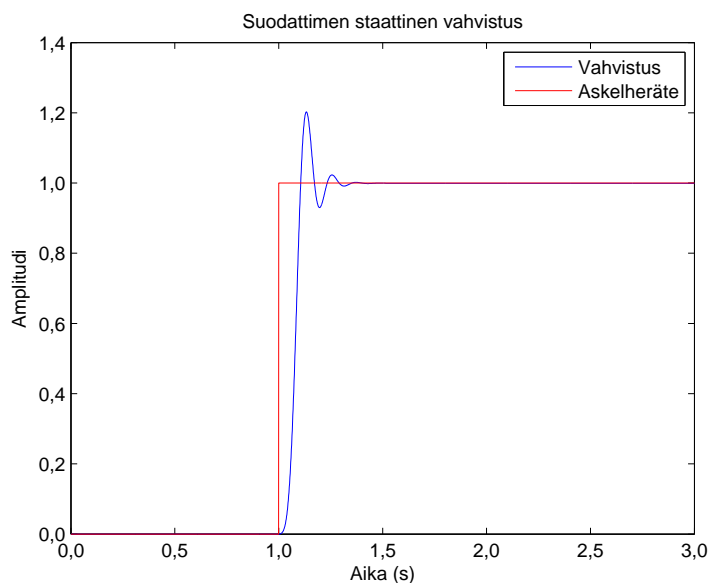
Suodattimen suunnitteluun on käytetty MATLABin FDATool¹⁸-työkalua. Suodattimiksi valitaan tyyppin II Tšebyšov-suodatin, joka on IIR-suodatin. Tšebyšov-suodatin antaa jyrkän taajuusvasteen, ja sen estokaistalla esiintyy jonkin verran aaltoilua. Se määritellään minimikertalukuiseksi. Näytteenottotaajuudeksi valitaan 1000 Hz, päästökaistan rajataajuudeksi 8 Hz ja estokaistan rajataajuudeksi 15 Hz. Päästökaistan maksimipoikkeamaksi valitaan 1 dB ja estokaistan 80 dB.



Kuva 13: Alipäästösuo-dattimen vaste chirp-signaaliilla

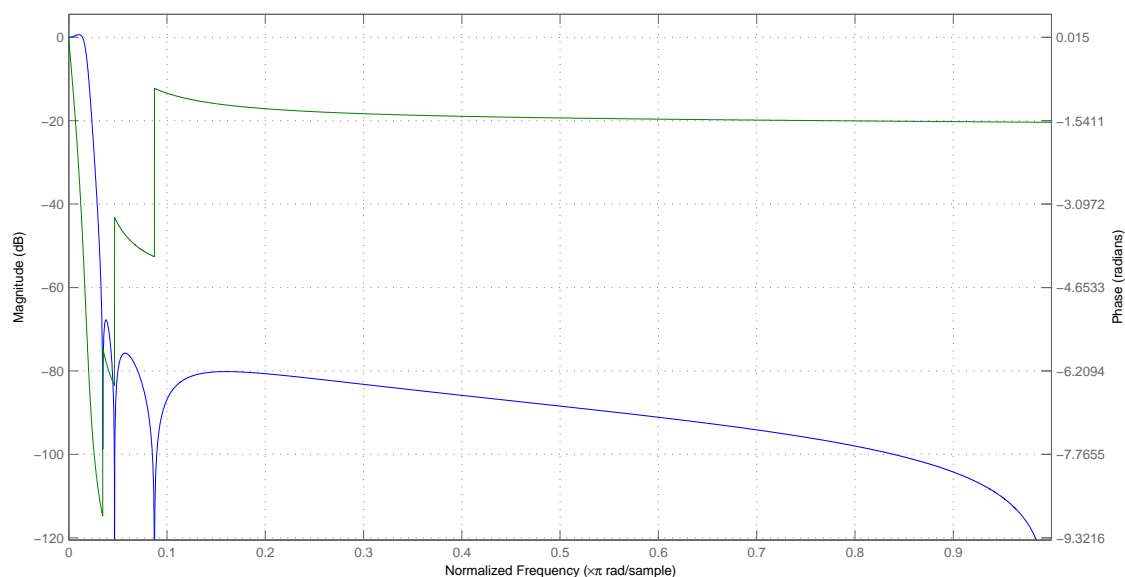
Suodattimen toimintaa testataan syöttämällä sille sinimuotoista chirp-signaalia, jonka taajuus kasvaa lineaarisesti ajan funktiona. Signaalin alkutaajuus on 0,1 Hz ja lopputaajuus 100 Hz, jonka se saavuttaa 5000 sekunnissa. Signaalin taajuus kasvaa 0,02 Hz sekunnissa, joten suodattimen päästökaistan vaikutus loppuu 400 sekunnin kohdalla ja estokaistan vaikutus alkaa 750 sekunnin kohdalla. Järjestelmää simuloitiin 1000 sekunnin ajan. Suodattimen vaste on esitetty kuvassa 13, ja siinä näkyy selvästi siirtymäkaista määritellyllä aikavälillä.

¹⁸Filter Design and Analysis Tool



Kuva 14: Alipäästösuodattimen staattinen vahvistus

Suodattimen staattista vahvistusta mitataan syöttämällä siihen yksikköaskelheräte ajanhetkellä 1 s. Staattinen vahvistus kertoo sen, kuinka paljon suodatin vahvistaa signaalia nollataajuudella. Suodattimen vaste on esitetty kuvassa 14. Vahvistus asettuu arvoon 0,9993 ajanhetkellä 1,5 s. Vahvistuksen ideaalisella arvolla 1 systeemiin ei jää pysyvää poikkeamaa, ja saavutetulla vahvistuksella jäädään tästä 0,07%:n päähän. Tämä on tarpeeksi hyvä tulos prosessille, jota voidaan säätää ainoastaan millivoltin tarkkuudella.

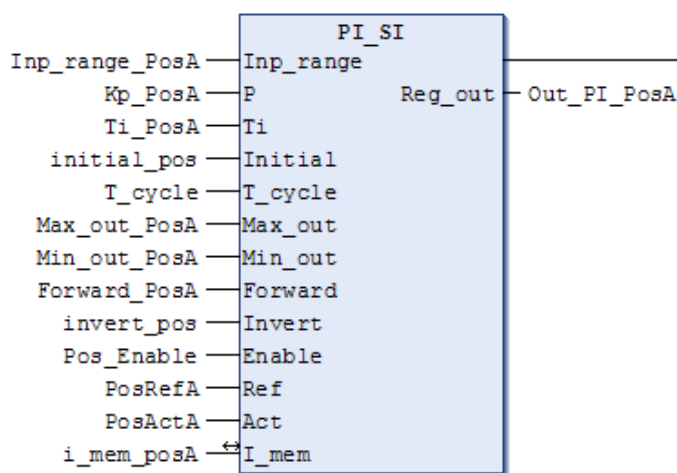


Kuva 15: Suodattimen amplitudi- ja vaihevasteet

Kuvassa 15 on esitetty suodattimen amplitudi- ja vaihevasteet Bode-diagrammina. Amplitudivaste on esitetty kuvassa sinisellä käyrällä ja vaihevaste vihreällä.

4.5 Paikan säätö

Rullausprosessin paikkasäätö on toteutettu samanlaisella PI-säätimellä kuin voima-säätökin, ja se on esitetty lohkokaaviomuodossa kuvassa 16. Sitä ei kuitenkaan välttämättä tarvitsisi siirtää TwinCAT3:n puolelle, koska paikkasäätö ei ole koskaan toiminnassa samaan aikaan värähtelynvaimennuksen kanssa.



Kuva 16: Paikkasäätimen FBD-esitys TwinCAT3:ssa

4.6 Värähtelyjen vaimennus

Värähtelyjen vaimennus on toteutettu MATLABin Simulink-ohjelmana algoritmien mukaan, joita Orivuori on kehittänyt väitöskirjansa [7] pohjalta. Simulink-malli on suoraan käännettävissä TwinCAT3:lle kelpaavaksi TcCOM-moduuliksi. Moduuli saa TwinCAT-ohjelman puolelta parametreinaan etupäässä prosessilta mitattuja arvoja, joita ovat muun muassa varsien kiihtyvyydet, paikat ja voimat sekä rullan halkaisija ja pyörimisnopeus. Moduulin lähtö on puolestaan jänniteohje, joka lisätään voimasäädön puolelta tulevaan jänniteohjeeseen ennen kuin se syötetään prosessille.

Värähtelynvaimennusalgoritmi pyrkii vaimentamaan pääsääntöisesti värähtelyä, joka aiheuttaa herätteen kaksi kertaa kierroksen aikana. Tällainen värähtely on haitallisinta rullan muodostumisen kannalta, koska se aiheuttaa voimakkaimmin kulmik-

kuutta ja epäpyöreyyttä rullaan. Tämän takia algoritmin pitääkin aluksi identifioida haluttu värähtelytaajuus, jotta se pystyy kohdistamaan säätönsä siihen.

Taajuuden lisäksi algoritmi pyrkii estimoimaan värähtelyn suuruuden mahdollisimman tarkasti, jotta se pystyy kohdistamaan siihen oikeansuuruisen vastakkaisvoiman.

4.7 Graafinen käyttöliittymä

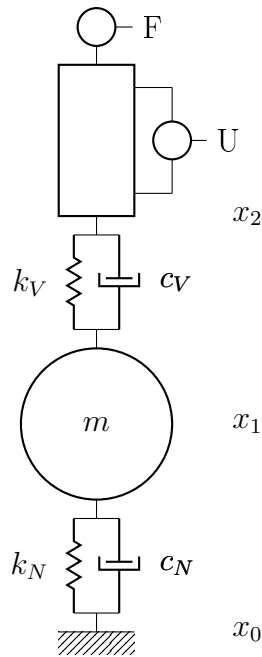
Jotta prosessin operaattorit pystyvät värähtelynvaimennuksen lisäämisen jälkeenkin pysymään tietoisina säätöjärjestelmän toiminnasta, on sen graafiseen käyttöliittymään lisättävä värähtelynvaimentimen säätöön ja toimintaan liittyvää informaatiota sekä mahdollisuus vaikuttaa säätimen toimintaan myös manuaalisesti. Graafisen käyttöliittymän on tarkoitus toimia säädinten integraation jälkeenkin S7:n puolella, koska operaattorit ovat tottuneet sen käyttöön, ja käyttöliittymän alkuperäistä osaa ei ole tarpeen muuttaa värähtelynvaimennuksen lisäyksen takia. Tässä työssä ei toteuteta itse käyttöliittymän muokkaamista, mutta tärkeimmät muokkausideat käsitellään seuraavaksi periaatetasolla.

Graafisessa käyttöliittymässä on olemassa jo tarvittavat osat voima- ja paikkasäädinten toiminnan hallinnointia varten, joten tehtävät muutokset liittyvät ainoastaan värähtelynvaimennusosuuteen. Operaattorien kannalta tärkeintä on tietää, kuinka suuria prosessissa vaikuttavat värähtelytasot ovat, joten tämän informaation on oleellista olla selvästi näkyvissä käyttöliittymässä. Samoin nähtävillä pitää olla värähtelynvaimentimen prosessille antaman jänniteohjeen suuruus, jotta sitä voidaan helposti vertailla värähtelyn suuruuteen. Jos esimerkiksi värähtely kasvaa jatkuvasti suuremmaksi, mutta säätöohje pysyy siitä huolimatta pienenä, voidaan ongelmatilanne havaita helposti ajoissa. Tällaisia tilanteita varten olisi myös hyvä, että operaattoreilla on mahdollisuus vaikuttaa säätöohjeen suuruusluokkaan manuaalisesti käyttöliittymän kautta sekä käynnistää värähtelynvaimennus tarvittaessa, jos se ei jostain syystä ole lähtenyt automaattisesti käyntiin värähtelyn kasvettua yli kriittisen rajan. Muita tärkeitä värähtelynvaimennukseen liittyviä tietoja, joiden olisi hyödyllistä olla näkyvissä käyttöliittymän puolella, ovat esimerkiksi pahimman värähtelyn taajuus ja rullan pyörimisnopeus.

5 Säätojärjestelmän simulointi

Säädettävän järjestelmän ymmärtämiseksi paremmin siitä luodaan tässä luvussa yksinkertaistettu simulointimalli, jolla voidaan myös testata luotuja säätimiä ennen kuin niillä lähdetään tekemään käytännön koeajoja. Kappaleessa 5.1 kehitellään malli paikkasäädön simulointiin ja kappaleessa 5.2 voimasäädön simulointiin.

5.1 Paikkasäädön simulointi



Kuva 17: Yksinkertaistettu malli kiinnirullausprosessista

Kuvaan 17 on hahmoteltu yksinkertaistettu malli keskiörullainleikkurista. Kaavakuvassa näkyy männän jännitesyöttö (U) ja voimamittaus (F). Nippiä ja männän vartta on kuvattu jousimassavaimentimina. Niihin liittyvät jousivakiot ovat k_N ja k_V sekä vastaavat vaimennuskertoimet c_N ja c_V . Männän varren vertikaalista paikkaa kuvaa piste x_2 , rullan paikkaa x_1 ja nippikontaktissa olevan telan paikkaa x_0 . Rullan massa on esitetty parametrilla m .

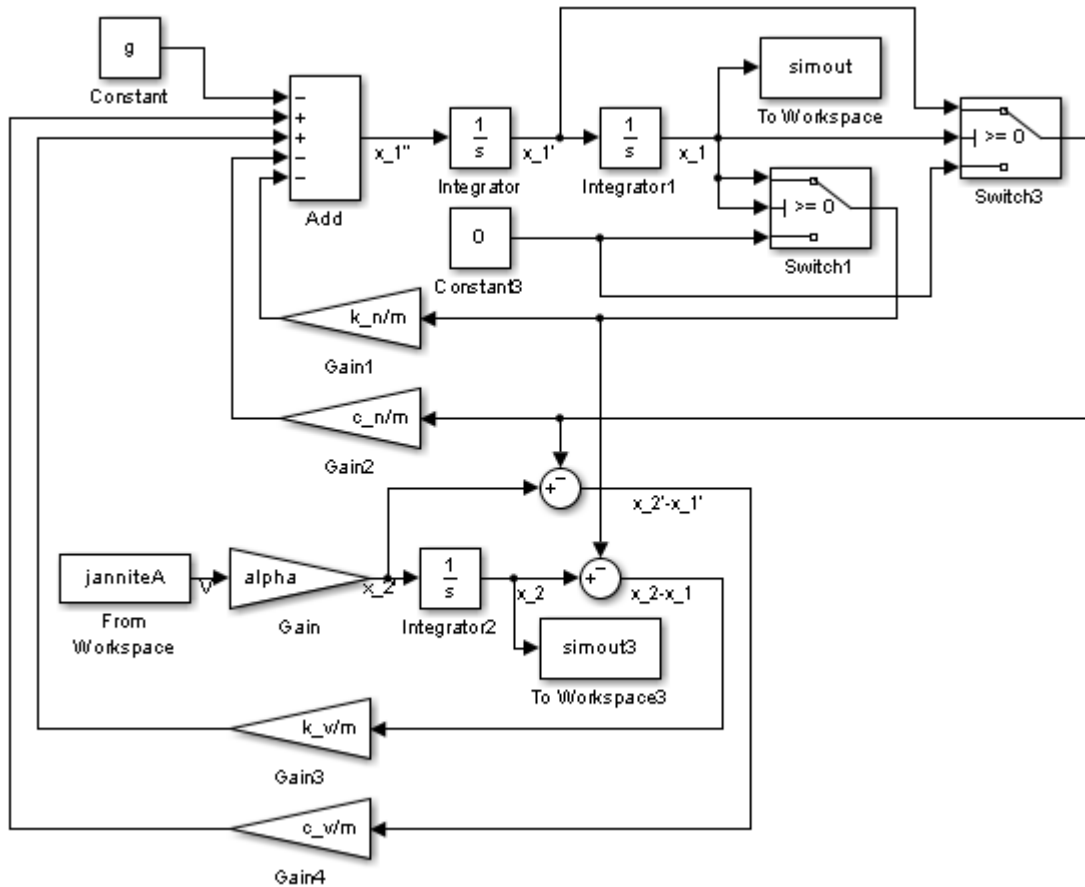
Yksinkertaisesta mallista saadaan helposti aikaan paikkasäätöä varten yhtälöryhmä, mistä puolestaan voidaan ratkaista esimerkiksi prosessin siirtofunktio simulointia varten

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = -mg - k_N x_1 - c_N \dot{x}_1 + k_V(x_2 - x_1) + c_V(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\ \dot{x}_2 = \alpha U \end{cases}, \quad (17)$$

$$(18)$$

jossa g on putoamiskiihtyvyys ja α kerroin jännitesyötteen ja männän varren nopeuden välillä. Todellisessa prosessissa se vastaa männän sisäistä virtausta.

Rullausprosessista luodaan malli MATLABin Simulink-työkalulla. Kuvassa 18 on esitetty simulointimalli toiselle männän varrelle. Se vastaa yhtälöiden (17) ja (18) määrittelemää systeemiä sillä lisäyksellä, että aseman paikka ei voi saada negatiivisia arvoja. Tämä johtuu luonnollisen prosessin aiheuttamasta rajoituksesta, sillä paperirulla ei voi painautua telan sisään. Rajoitus on toteutettu lisäämällä malliin kytkimiä, jotka korvaavat mahdollisesti esiintyvät negatiiviset paikan arvot nolalla.

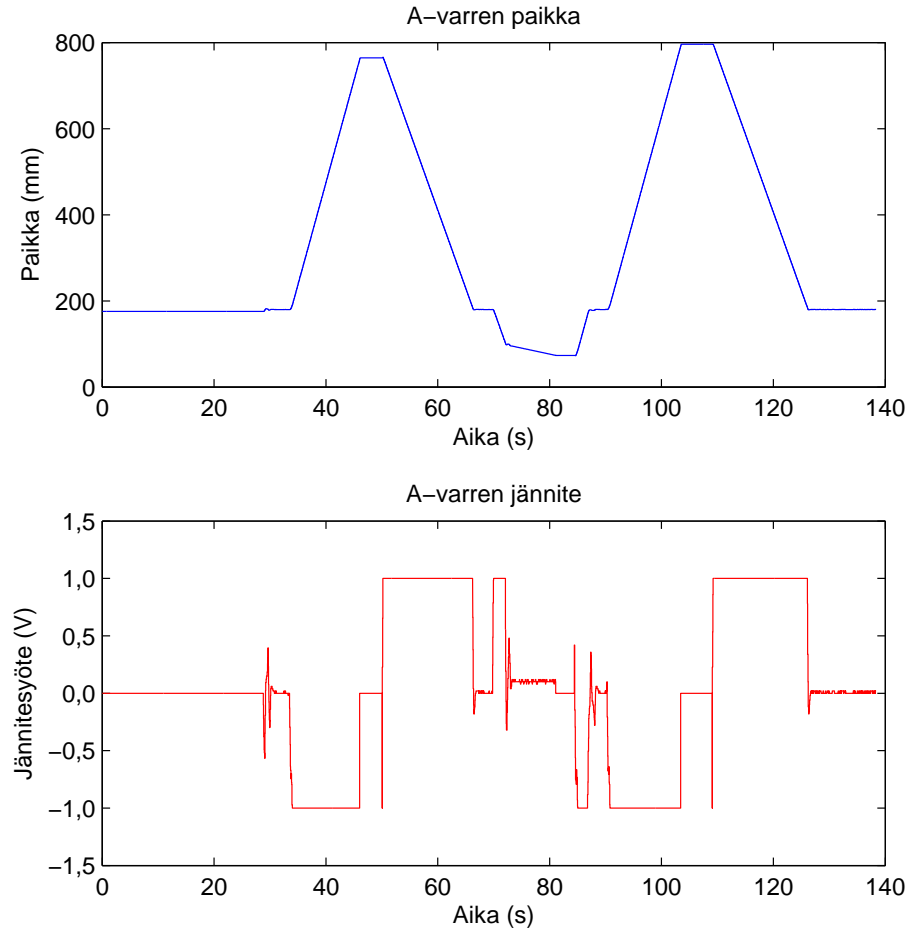


Kuva 18: MATLABin Simulinkillä luotu malli paikkasäädön mallintamiseen

Mallin parametreja voidaan määrittää alkuperäiseltä rullausprosessilta saadun datan perusteella. Esimerkiksi α saadaan laskettua aseman nopeudesta suhteessa syöt-

töjännitteeseen kaavan (18) mukaan:

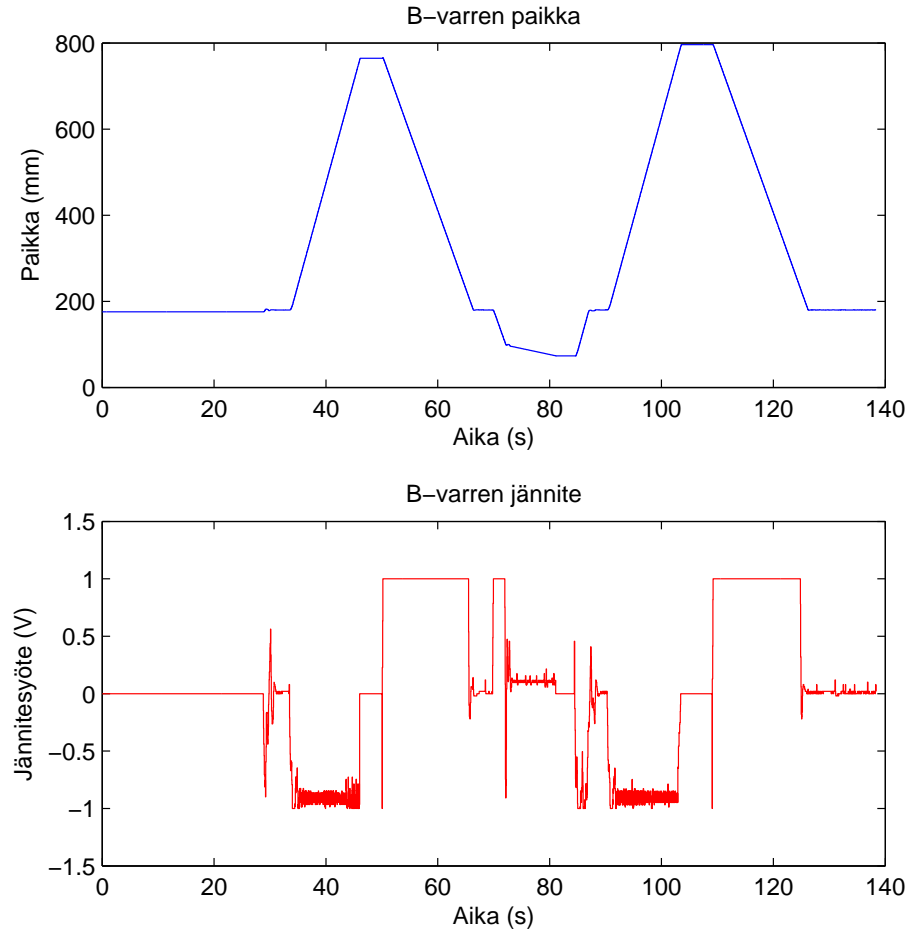
$$\dot{x}_2 = \alpha U \Leftrightarrow \alpha = \frac{\dot{x}_2}{U} \quad (19)$$



Kuva 19: A-varren koeajodataa α -parametrin kokeelliseksi määrittämiseksi

Kuvissa 19 ja 20 on esitetty asemien paikan ja syöttöjännitteen muutoksia eräällä ilman paperia tehdyllä koeajolla, jossa varsien liikkeitä ohjataan muuttamalla paikkareferenssiä manuaalisesti. Syöttöjännite on rajoitettu ajon aikana välille $-1 \text{ V} \dots 1 \text{ V}$. Tämän lisäksi tehdään vastaavat koeajot rajoittamalla syöttöjännite välille $-0,5 \text{ V} \dots 0,5 \text{ V}$ ja $-0,75 \text{ V} \dots 0,75 \text{ V}$.

Parametrin α määrittelyä varten tarkastellaan kuvaajista kohtia, missä syötettävä jännite pysyy vakiona maksimi- tai minimiarvossaan ja varsi liikkuu tasaisella nopeudella. Kuvassa 19 tällainen on esimerkiksi aikavälillä 52 s \dots 62 s, jota tarkastelemalla saadaan ratkaistua eräs arvo A-varren α :lle.



Kuva 20: B-varren koeajodataa α -parametrin kokeelliseksi määrittämiseksi

Varren nopeus halutulla aikavälillä saadaan suoraviivaisesti paikkavektorin kulmakertoimesta:

$$\dot{x}_{2A} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{363 \text{ mm}}{10 \text{ s}} = 0,0363 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (20)$$

Kun jännitesyöte pysyy muuttumattomana maksimiarvossaan 1 V:ssa, saadaan kaavasta (19) α :n arvoksi:

$$\alpha_A = \frac{\dot{x}_{2A}}{U} = \frac{0,0363 \text{ m/s}}{1 \text{ V}} = 0,0363 \frac{\text{m}}{\text{Vs}} \quad (21)$$

Vastaavasti B-varrelle saadaan laskettua eräs α :n arvo samalla aikavälillä kuvasta 20:

$$\alpha_B = \frac{\dot{x}_{2B}}{U} = \frac{0,0395 \text{ m/s}}{1 \text{ V}} = 0,0395 \frac{\text{m}}{\text{Vs}} \quad (22)$$

Yhtälöissä (21) ja (22) ratkaistut arvot eivät kuitenkaan välttämättä vastaa koko totuutta, sillä ne on laskettu vain yhdellä ajanhetkellä. Yleispätevämmän tuloksen saavuttamiseksi lasketaan vastaavat arvot kolmesta eri koeajosta, kustakin kahdelta eri ajanhetkeltä molemmille varsille erikseen. Näiden keskiarvoiksi saadaan

$$\alpha = 0,042 \frac{\text{m}}{\text{Vs}} .$$

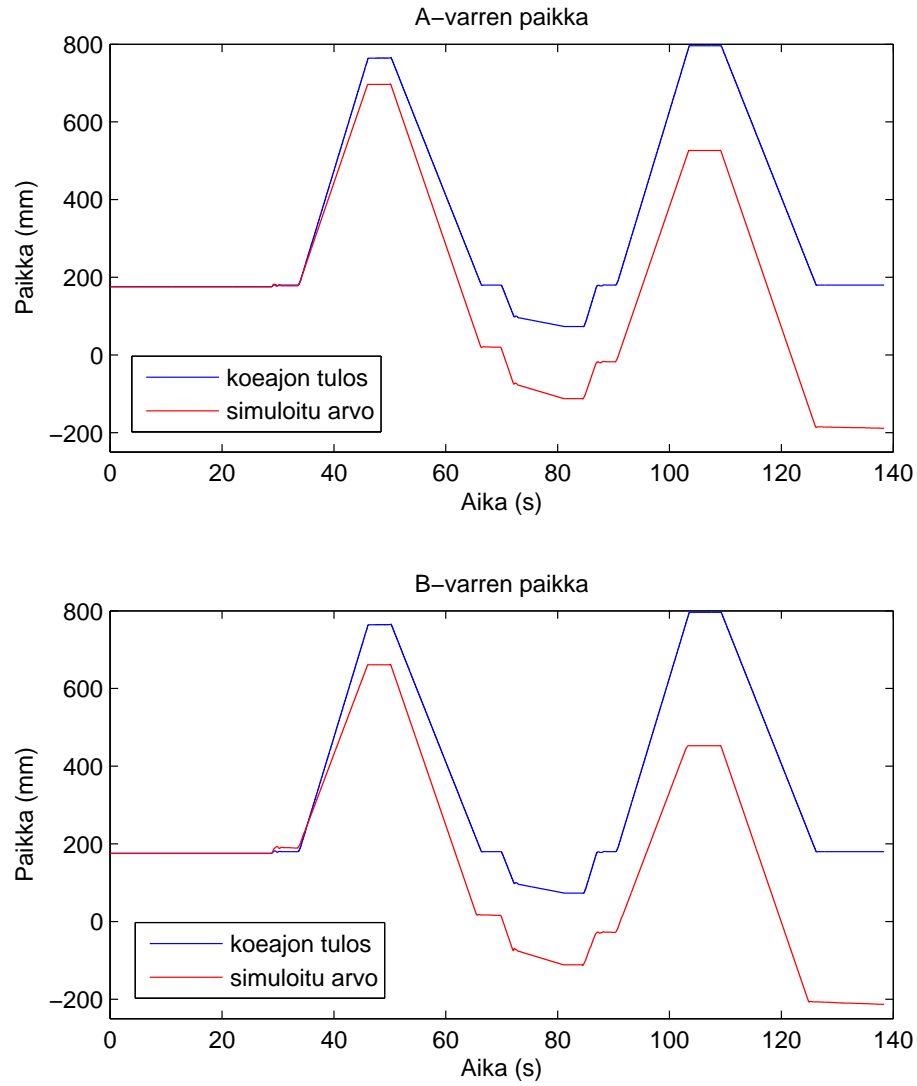
Muut mallissa tarvittavista parametreista on määritelty käytössä olevalle pituusleikkurille jo aiemmin kokeellisesti tai arvioimalla todellisen prosessin parametrien suuruusluokkaa. Kaikki käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Simulointimallin parametrit.

Parametrin nimi	Lyhenne	Suuruus	Yksikkö
Putoamiskiihtyvyys	g	9,82	m/s ²
Massa	m	1000	kg
Varren vaimennusvakio	c _V	100 000	Ns/m
Nipin vaimennusvakio	c _N	130 000	Ns/m
Varren jousivakio	k _V	2 * 10 ⁸	N/m
Nipin jousivakio	k _N	1,4 * 10 ⁸	N/m
Männän virtaus	α	0,042	m/Vs

Mallin toimintaa testataan syöttämällä siihen koeajosta saatua jännitedataa ja vertailemalla ulostuloa oikean prosessin ulostuloon.

Kuvassa 21 on käytetty datana samaa koeajoa kuin aiemmin tässä kappaleessa, missä sen pohjalta määritettiin α -parametria prosessille. Kuvassa sininen käyrä esittää A-varren paikkaa koeajon aikana, ja punainen käyrä simulointimallin laskemaa paikkaa. Kuvasta nähdään selvästi, että molempien käyrien muoto on samankaltainen ja erittäin samanlainen ajon alkupuoliskon aikana. Loppupuoliskolla simulointimalli ei kuitenkaan seuraa enää alkuperäistä ajodataa muuten kuin muotonsa puolesta.



Kuva 21: Koeajodatan vertailu simulointitulokseen

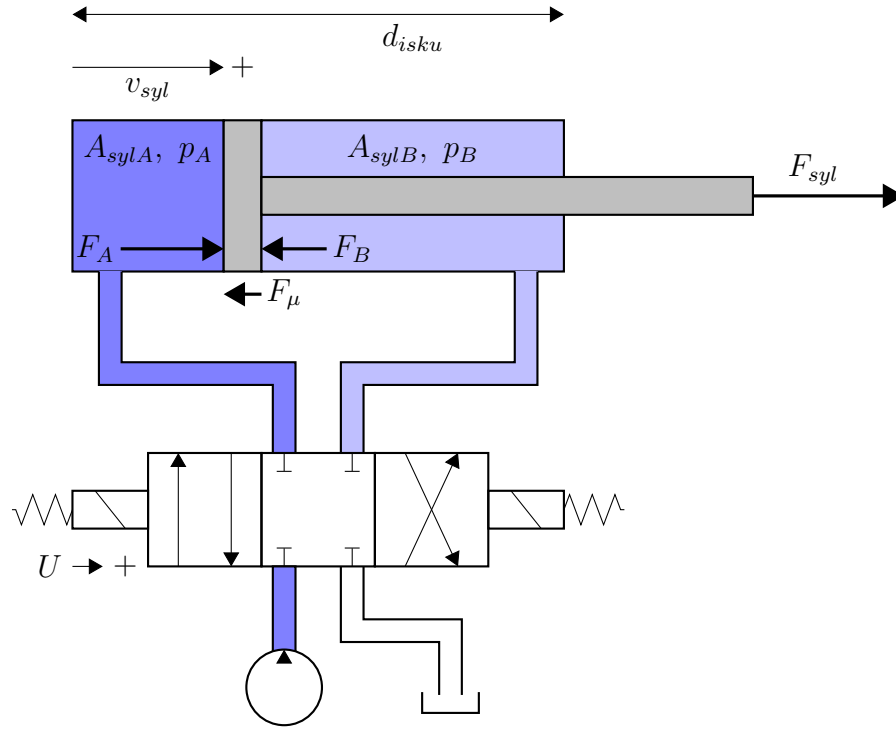
5.2 Voimasäädön simulointi

Kuvassa 22 on esitetty prosessin hydraulipiiri idealisoituna. Mäntään vaikuttava voima lasketaan kaavalla

$$F = pA_{syl} , \quad (23)$$

jossa p on sylinterin ylipaine ja A_{syl} männän paineenalainen pinta-ala.

Hydraulisylinterin kokonaisuudessaan tuottama voima voidaan muodostaa kuvan 22



Kuva 22: Idealisoitu hydraulipiiri [1, s. 32]

perusteella voimatasapainoyhtälöllä

$$F_{syl} = F_A - F_B - F_\mu , \quad (24)$$

jossa F_A on männän puolella vaikuttava voima, F_B männän varren puolella vaikuttava voima ja F_μ sylinterikitkavoima, joka syntyy sylinterin tiivisteiden ja männän välisestä kontaktista [1, s. 32]. Yhdistämällä kaavaan (23) tämä yhtälö voidaan ilmaista myös muodossa

$$F_{syl} = p_A A_{sylA} - p_B A_{sylB} - F_\mu , \quad (25)$$

jossa A_{sylA} on sylinterin männän ala, A_{sylB} sylinterin männänvarrenpuoleinen rennaspinta-ala ja p_A sekä p_B ilmaisevat paineita sylinterin vastaavilla puolilla [1, s. 32].

Kitkavoima voidaan puolestaan kuvata yhtälöllä

$$F_\mu = (1 - \eta)(p_A A_{sylA} - p_B A_{sylB})v_{syl} , \quad (26)$$

jossa η on sylinterin hyötysuhde ja v_{syl} männän nopeus [1, s. 33].

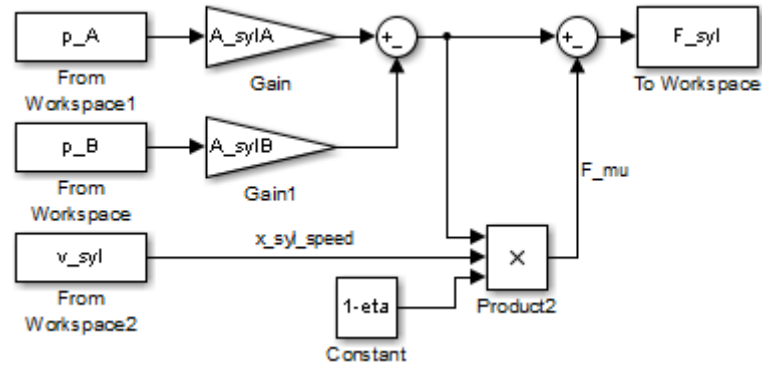
Männän nopeus v_{syl} voidaan laskea, kun tiedetään kuvassa 22 näkyvä männän iskunpituus d_{isku} sekä rullan kierrosnopeus $v_{kierros}$, joka puolestaan voidaan laskea ajon aikana mitattavien ajonopeuden v_{ajo} ja rullan halkaisijan d_{rulla} avulla kaavalla

$$v_{kierros} = \frac{v_{ajo}}{\pi d_{rulla}} . \quad (27)$$

Yhden rullan kierroksen aikana mäntä liikkuu iskunpituutensa edestakaisin, joten männän nopeudeksi saadaan näin

$$v_{syl} = 2d_{isku}v_{kierros} . \quad (28)$$

Yhtälöistä (25)–(28) muodostetaan MATLABin Simulink-työkalulla malli, joka on esitetty kuvassa 23. Mallissa käytetyt vakioparametrit on määriteltä taulukossa 6, ja loput suureet saadaan oikeasta prosessista mittaustuloksina.



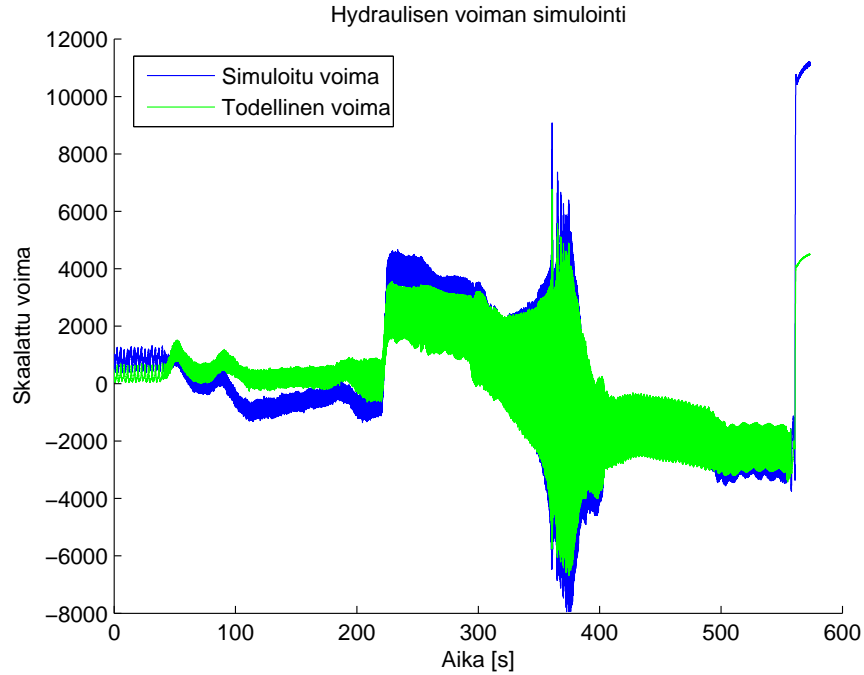
Kuva 23: MATLABin Simulinkillä luotu malli voimasäädön mallintamiseen

Taulukko 6: Simulointimallin parametrit.

Parametrin nimi	Lyhenne	Suuruus	Yksikkö
Männän ala	A_{sylA}	0,012	m^2
Männänvarrenpuoleinen ala	A_{sylB}	0,007	m^2
Hyötysuhde	η	0,9	
Iskunpituus	d_{isku}	0,035	m

Kuvan 23 mallia simuloidaan syöttämällä siihen eräästä koeajosta saatua dataa. Simuloinnin tulos on esitetty kuvassa 24, jossa sitä vertaillaan oikeaan mitattuun

voimaan. Simuloitu voima vastaa pääpiirteittäin mitattua voimaa, joten voidaan todeta mallin olevan lähellä totuutta.



Kuva 24: Koeajodatan vertailu simulointitulokseen

Sylinterin eri puolilla vaikuttavat voimat voidaan toisaalta jälleen määritellä syöttöjännitteen funktiona samoin kuin paikkasäätimen tapauksessa kaavassa (18). Käytetään tällä kertaa kertoimena parametria β , joka määritellään ajan funktiona. Prosessin simuloiminen onnistuu yksinkertaisemmin, kun malliin syötetään vain yksi jännitearvo useamman parametrin sijasta. Esimerkiksi männän puolella vaikuttava voima

$$F_{sylA} = p_A A_{sylA} \quad (29)$$

voidaan toisaalta ilmaista myös kaavalla

$$F_{sylA} = \beta_A U A_{sylA} , \quad (30)$$

jossa U on syöttöjännite ja männän puolella vaikuttava kerroin β_A saadaan laskettua

yhtälöllä

$$\beta_A = \frac{p_A}{U} . \quad (31)$$

Ratkaistaan β_A :n arvo yhtälöllä (31) yhdeksästä erilaisesta koeajosta, joissa on käytetty yhteensä kahta erilaista paperirullaa. Jokaisen ajon eri ajanhetkien β_A :n arvoista luodaan vektori, ja kaikkien ajojen β_A -vektoreista muodostetaan keskiarvo-vektori, joka kuvaa siis β_A :n muuttumista ajon aikana ajan suhteen keskimääräisessä koeajossa.

Lasketaan vastaavasti yhdeksän eri arvoa β_B :lle yhtälöllä

$$\beta_B = \frac{p_B}{U} \quad (32)$$

sekä lopuksi vielä vastaavasti arvot β_μ :lle, joka ratkaisee yhtälön männän nopeuden suhteen

$$\beta_\mu = \frac{v_{syl}}{U} . \quad (33)$$

Taulukossa 7 on esitetty kunkin β -vektorin tilastollisia tunnuslukuja.

Taulukko 7: Voimasäätimen β -parametrit.

Parametri	Keskiarvo	Mediaani	Keskihajonta
β_A	$-1,72 * 10^8$	$-1,38 * 10^8$	$1,34 * 10^9$
β_B	$-2,55 * 10^8$	$-2,01 * 10^8$	$1,86 * 10^9$
β_μ	$-16,2$	$-17,4$	$11,9$

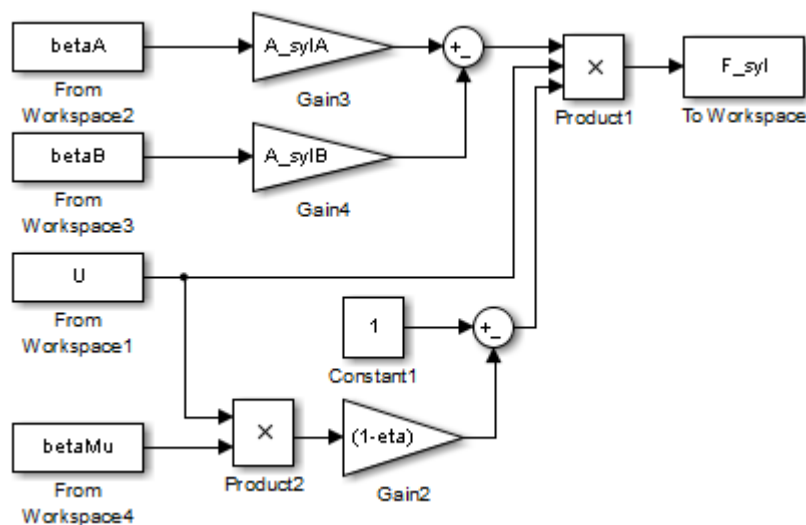
Kun β -arvot tiedetään, voidaan alkuperäinen voimatasapainoyhtälö (24) korvata yhtälöllä

$$F_{syl} = F_A - F_B - F_\mu \quad (34)$$

$$F_{syl} = \beta_A U A_{sylA} - \beta_B U A_{sylB} - (1 - \eta)(A_{sylA} \beta_A U - A_{sylB} \beta_B U) \beta_\mu U \quad (35)$$

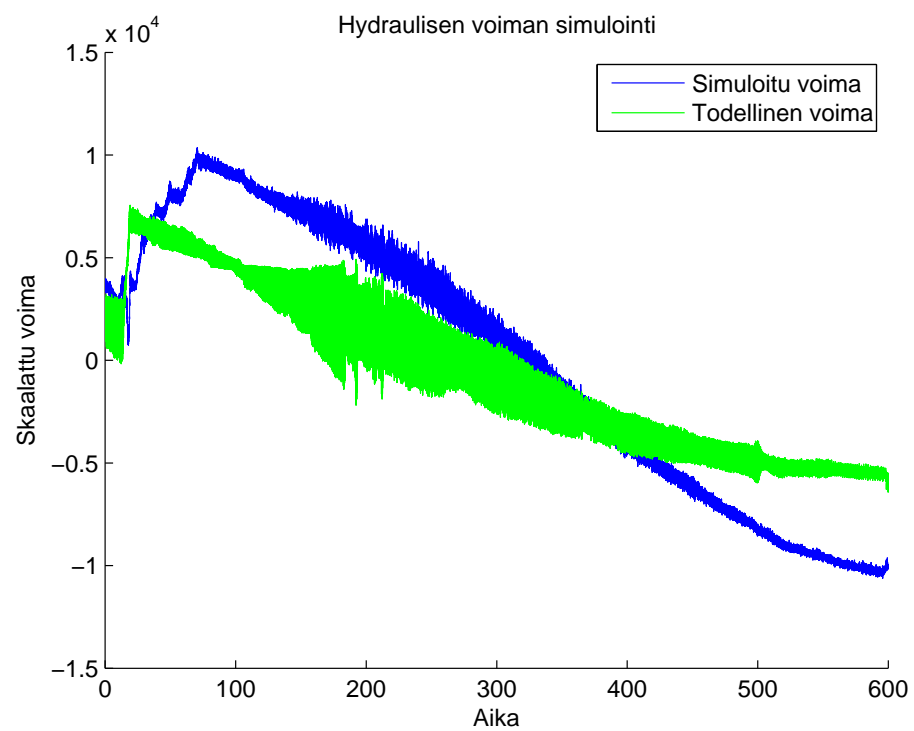
$$F_{syl} = U(\beta_A A_{sylA} - \beta_B A_{sylB})(1 - (1 - \eta)\beta_\mu U) , \quad (36)$$

jonka pohjalta luodaan uusi alkuperäistä yksinkertaisempi simulointimalli, joka on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25: MATLABin Simulinkillä luotu malli voimasäädön mallintamiseen

Syötetään luotuun malliin jälleen oikeassa koeajossa käytettyä jännitedataa ja verrataan mallin ulostuloa oikean prosessin ulostuloon. Kuvaan 26 on piirretty simulointimallin laskema voima sinisellä ja oikea prosessista mitattu voima vihreällä. Kuvasta huomataan, että voimakäyrien kulmakertoimet poikkeavat jonkin verran toisistaan, mutta yleinen muoto on samankaltainen ja voimat ovat suuruusluokaltaan samankokoisia. Malli ei kuitenkaan ole yhtä hyvä kuin kuvassa 24 simuloitu malli, mikä johtuu siitä, että uudessa mallissa käytettiin voiman laskemiseen oikean painedatan sijaan keinotekoisia keskiarvoistettuja β -arvoja. Yksinkertaisuuteensa ja helppokäyttöisyyteensä nähden uudempi mallikin kuitenkin toimii tyydyttävästi.



Kuva 26: Koeajodatan vertailu simulointitulokseen

6 Tehdaskokeet

Integroidun säätimen lopullista toimintaa testataan tehdasoloissa, ja tässä luvussa käydään läpi tehtyjä koeajoja. Kappaleessa 6.1 kuvataan koeajojärjestelyjä yleisesti, ja kappaleessa 6.2 esitellään ja analysoidaan yksittäisiä koeajotuloksia.

6.1 Järjestelyt

Työhön liittyvät tehdaskokeet tehtiin keväällä ja kesällä 2013 Metso Paperin Järvenpään Emalikadun koelaitoksella, missä käytössä oli WinRoll-pituusleikkuri.

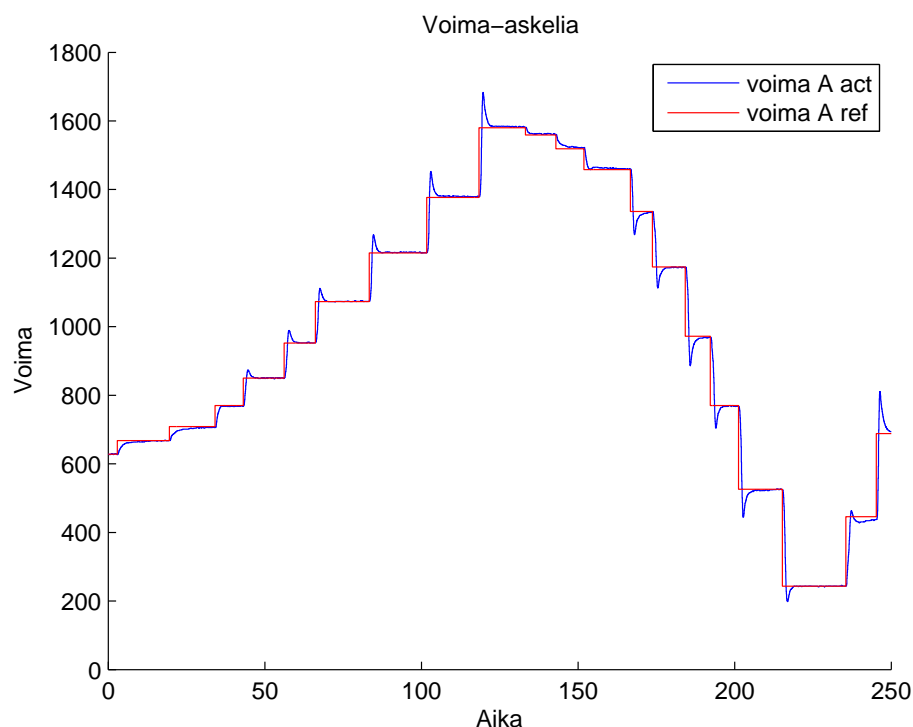
Beckhoff TwinCAT3 liitettiin osaksi leikkurin säätöjärjestelmää, ja se kommunikoi Siemens S7-logiikan kanssa Profibus-liitännän yli. S7-logiikasta, joka perinteisesti on toteuttanut koko prosessin säädön, kytkettiin pois paikka- ja voimasäätöön liittyvät algoritmit, mutta muuten vanha logiikka toimi koeajojen ajan normaaliin tapaansa TwinCAT:n rinnalla.

Koeajoja tehtiin erilaisilla paperilaaduilla, joista osa oli huomattavan värähtelyherkkiä. Tällaisilla paperirullilla rullauksen alkuvaiheessa käytettiin rullan muodostumisen apuna kuormitustelaa, kun taas vähemmän värähtelevillä rullilla tätä ei tarvittu ajon aikana ollenkaan. Kun kuormitustelaa käytettiin, se oli käytössä aina siihen asti, kunnes rullan halkaisija ylitti 40 cm, jonka jälkeen kuormitustela siirtyi pois rullan päältä.

6.2 Koeajot

6.2.1 Koeajot ilman paperia

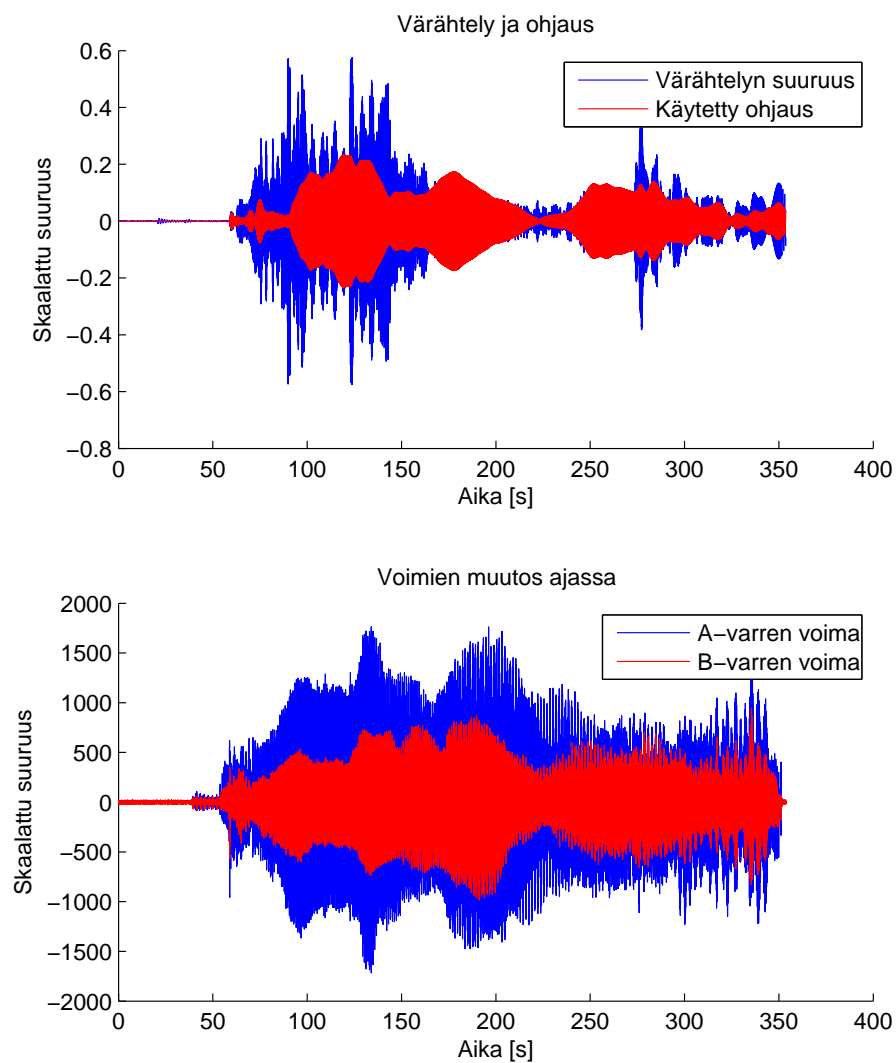
Ensimmäiset koeajot tehtiin ilman paperirullaa tai hylsyä liikuttamalla männän varsia manuaalisesti ohjaamalla. Näin pyrittiin varmistamaan, että integroitu säädin toimii jokseenkin luotettavasti ennen oikeita paperilla tapahtuvia koeajoja. Kuvassa 27 on esitetty erään rullattoman koeajon tulos. Siinä on esitetty punaisella käyrällä manuaalisesti syötetty A-varren askelmainen voimareferenssi ja sinisellä prosessin tuottama voima. Kuvasta nähdään, että voiman oloarvo seuraa referenssiarvoa, vaikkakin jonkin verran ylitystä tapahtuu jokaisen askelmaisen muutoksen jälkeen.



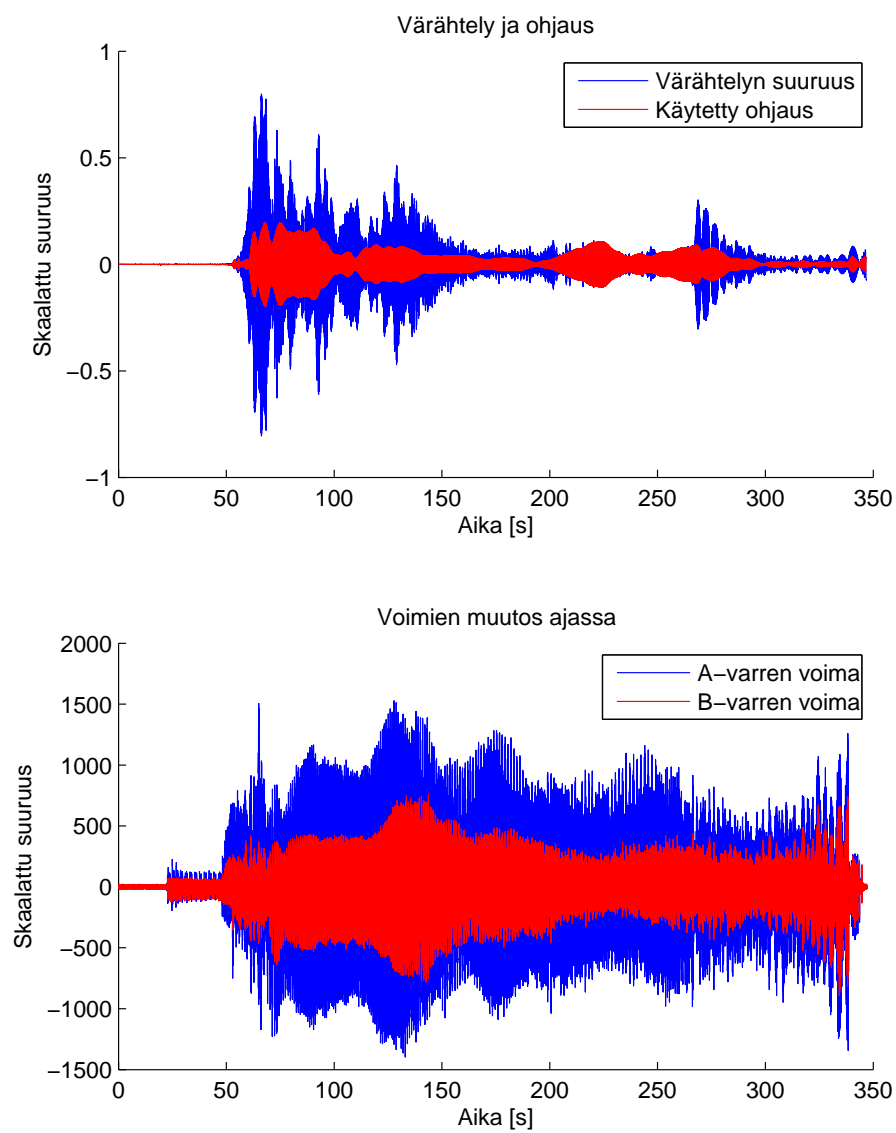
Kuva 27: Voiman oloarvon vertailu referenssiarvoon manuaaliajolla

6.2.2 Varhaisia koeajoja paperilla

Kuvissa 28 ja 29 on esitetty koeajodataa kahdelta varhaiselta perättäiseltä koeajolta. Koeajoissa käytetään samaa paperirullaa, joka rullataan eri ajoissa eri suuntiin niin, että eri puoli paperirainasta jää muodostuvan rullan ulkopinnaksi. Kuvien yläosassa nähdään ajon aikana estimaattorin ennustaman värähtelyn suuruus verrattuna värähtelynvaimentimen antamaan ohjaukseen. Alaosassa puolestaan on esitetty, kuinka suuria voimia kummaltakin männän varrelta on mitattu ajon aikana. Voimamittaukset on ylipäästösuodatettu Tšebyšov-suodattimella ennen piirtoa. Kuvista nähdään selvästi, miten jopa saman paperirainan eri puolilla on täysin erilaiset värähtelyprofiilit.

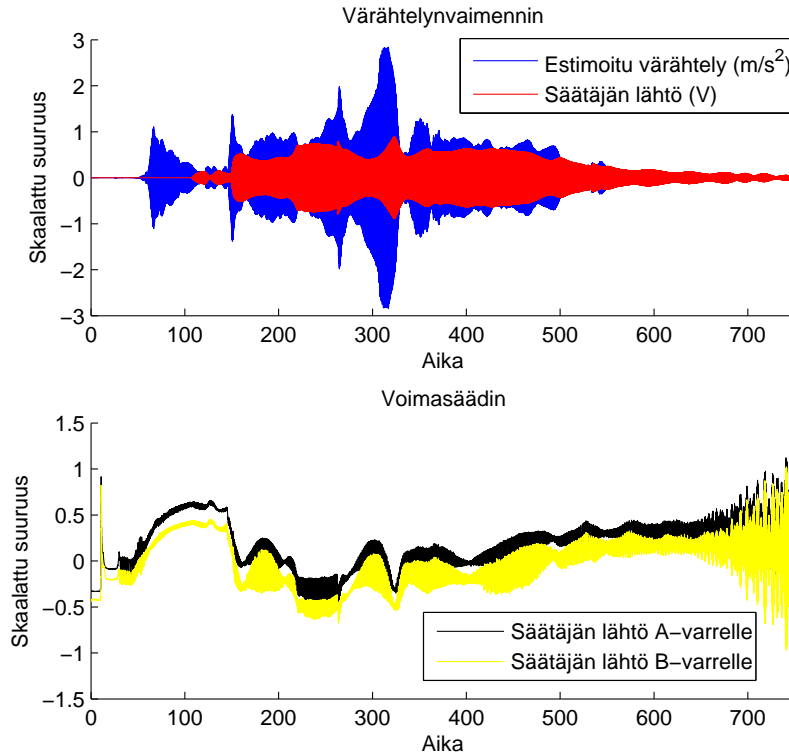


Kuva 28: Ensimmäinen koeajo paperilla



Kuva 29: Toinen koeajo paperilla

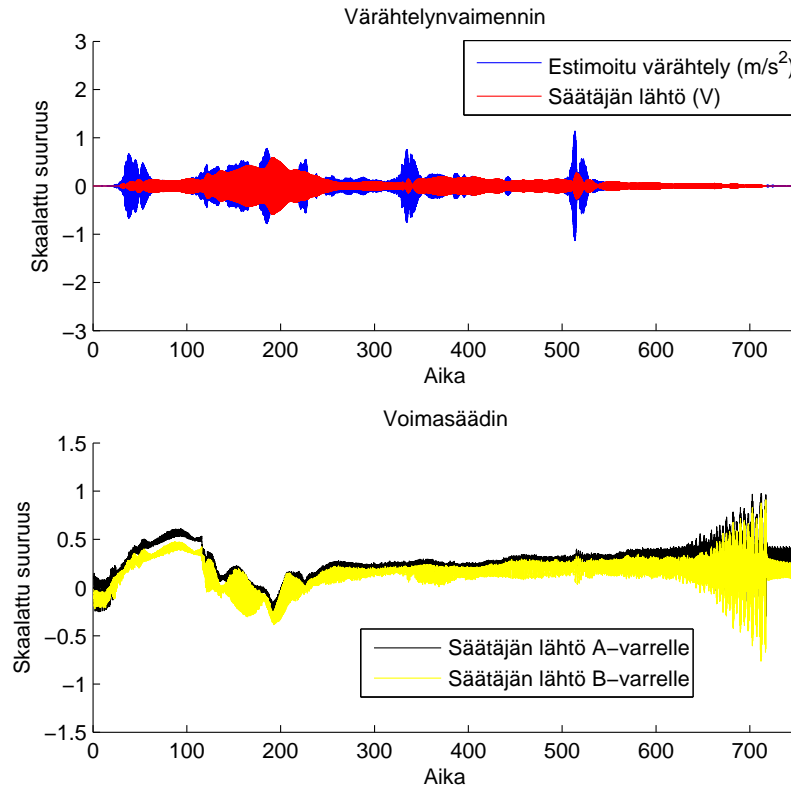
6.2.3 Koeajoja säätimen kehityksen aikana



Kuva 30: Värähtelynvaimentimen ja voimasäätimen vertailua

Kuvassa 30 on pidempi otos samasta koeajosta kuin aiemmin esitetystä kuvassa 12, eli ajoa säädellään integroidulla säätimellä, mutta ilman alipäästösuodatusta. Ylemmässä pikkukuvassa on esitetty värähtelynvaimentimen estimaatti värähtelystä ja osittain sen perusteella muodostettu säätäjän lähtö eli jänniteohje säätimelle. Alemmassa pikkukuvassa puolestaan on esitetty voimasäätimen antama jänniteohjaus samoilla ajanhetkillä. Kuvasta nähdään, että hieman ajanhetken 300 jälkeen värähtelyestimaatissa esiintyy piikki, joka kasvattaa värähtelynvaimennusta. Samaan aikaan kuitenkin voimasäädin pienentää omaa säätöään, eli lähtee taistelemaan värähtelynvaimenninta vastaan, mikä ei ole toivottu ilmiö.

Kuvassa 31 puolestaan on kuvattuna myöhempi koeajo, missä on jo mukana alipäästösuodattimen toiminnallisuus. Kuvasta nähdään, että kuvan 30 kaltaista säädinten välistä vuorovaikutusta ei enää ole, vaan voimasäädin toteuttaa omaa säätöään tasanaisesti koko ajon ajan värähtelynvaimentimen toiminnasta riippumatta.



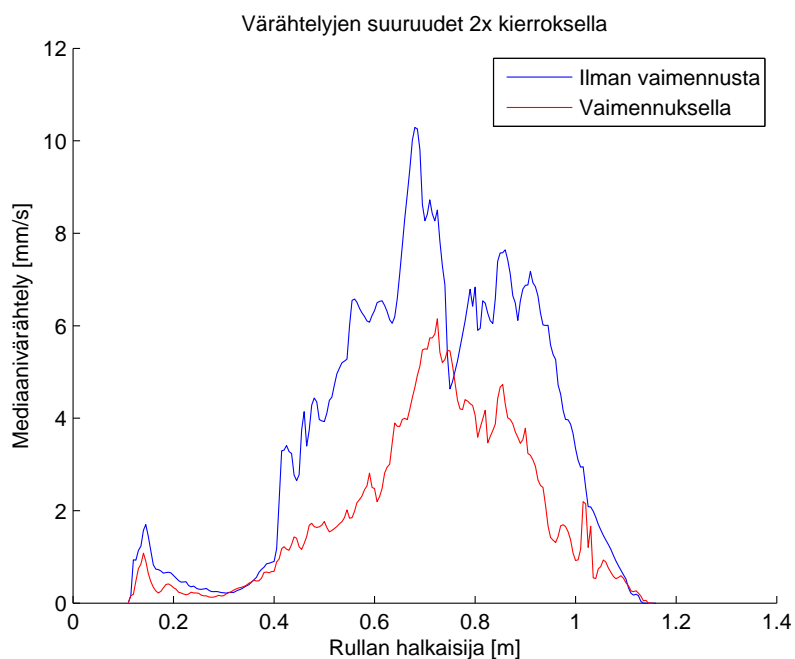
Kuva 31: Värähtelynvaimentimen ja voimasäätimen vertailua

6.2.4 Koeajosarjat erilaisilla papereilla

Lopulliset koeajot tehtiin muutamalla paperilaadulla siten, että jokaista rullaa ajettiin useaan kertaan sekä värähtelynvaimennuksen ollessa päällä että ilman sitä.

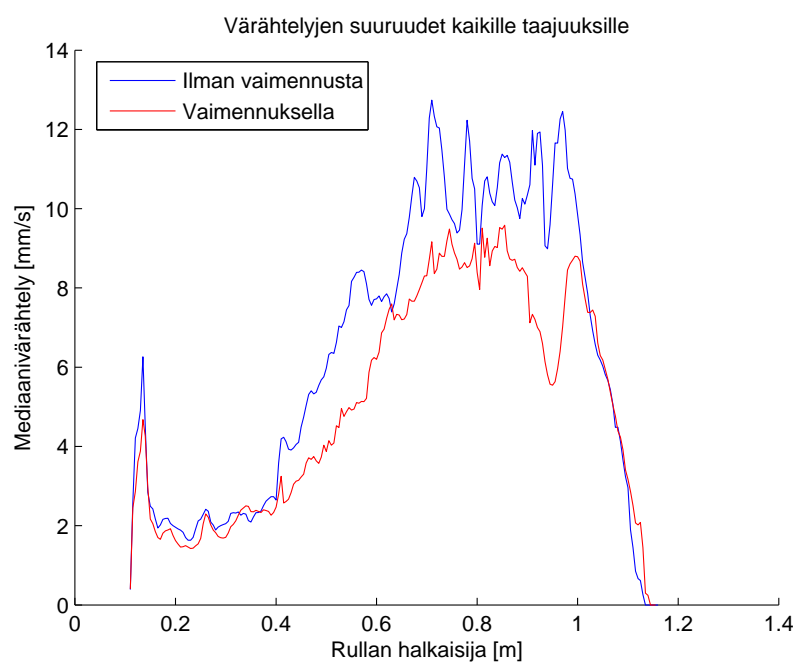
Kuvissa 32 ja 33 on esitetty erään paperilaadun koeajosarjan tulokset. Koeajosarjaan kuului kahdeksan ajoa värähtelynvaimentimen kanssa ja kahdeksan ajoa ilman sitä, joista kuitenkin kolmessa oli värähtelytaajuuden identifiointialgoritmi toiminnassa. Kuvissa esitetään mediaanivärähtelyt sekä vaimennettujen että vaimentamattomien ajojen kesken. Värähtelytasoissa havaitaan selvää pientymistä värähtelynvaimennuksen ansiosta kaikilla värähtelytasoilla, mutta etenkin sillä taajuudella, joka aiheuttaa herätteen kaksi kertaa rullan pyörimiskierroksen aikana. Tämä on rullalle kaikista haitallisinta värähtelyä, joten sen vaimentamisen onnistuminen on tärkeä saavutus. Kuvista on myös selvästi nähtävissä, kuinka kuormitustela hillitsee värähtelyjen syntymistä koeajojen alkuvaiheessa. Heti rullan saavutettua 40 cm halkaisijan ja kuormitustelan siirryttyä pois lähtevät värähtelytasot kasvamaan.

Kuvassa 32 havaitaan, että ilman värähtelynvaimennusta pahimmat värähtelyt ajon



Kuva 32: Värähtelytasot

aikana kriittisellä taajuudella ovat olleet yli 10 mm/s ja vaimennuksen kanssa vain noin 6 mm/s. Kaikkia taajuuksia havainnoidessa kuvassa 33 vaimennus ei vaikuta yhtä suurelta, mutta siinäkin pahimmat värähtelyhuiput ovat pienentyneet arvosta 13 mm/s arvoon 10 mm/s.



Kuva 33: Värähtelytasot kaikilla taajuuksilla

7 Yhteenveto ja päätelmät

Rullausprosessi on erittäin tärkeä osa paperinvalmistuksen jälkikäsittelyprosesseja. Yksi paperirulla saatetaan auki- ja kiinnirullata useita kertoja erilaisia käsittelyjä varten, ennen kuin se on valmis toimitettavaksi asiakkaan käyttöön. Siksi onkin erittäin tärkeää, että rullausprosessi toimii tehokkaasti, laadukkaasti ja luotettavasti. Prosessi on kuitenkin erittäin altis värähtelyille, ja pienehkökin kohdistusvirhe tai rullan epäpyöreys saattaa tuhota koko rullan. Tämän takia onkin tärkeää keskittyä varsinkin siihen, että rulla muodostuu oikeanmuotoiseksi eikä prosessiin muutenkaan pääse vaikuttamaan haitallista värähtelyä.

Tässä työssä luotiin yleiskatsaus pituusleikkurin toimintaan sekä siihen, minkälaiset voimat vaikuttavat paperin kiinnirullauksessa. Työssä käytiin läpi yleisimpiä värähtelyitä aiheuttavia syitä sekä häiriöiden aikaansaamia seurauksia.

Paperirullan oikeaoppista muodostumista säädellään voimasäätimellä ja värähtelytasoja kontrolloidaan sitä varten vastikään kehitetyllä värähtelynvaimentimella. Tässä työssä nämä alun perin erilliset säätimet siirrettiin kokonaan uudelle alustalle ja yhdistettiin toisiinsa. Kommunikaatio vanhan alustan ja prosessin muun säätöjärjestelmän kanssa toteutettiin Profibus-liitännällä, jonka kautta siirretään muun muassa säätimien parametreja.

Uudelle yhteiselle alustalle siirrettyjen säätimien yhteistoimintaa tutkittiin koeajojen avulla. Koeajoissa kiinnirullattiin värähtelylle alttiita paperilaatuja ja tarkkailtiin säädinten käyttäytymistä värähtelytilanteissa. Havaittiin, että voimakkaimmilla värähtelytaajuuksilla myös voimasäädin lähti kasvattamaan säätöohjettaan värähtelynvaimentimen mukana, jolloin lopullisesta ohjauksesta muodostui liian voimakas. Tilannetta korjattiin liittämällä alkuperäiseen voimasäätimeen alipäästösuodatin, joka hillitsee säätimen toimintaa korkeilla värähtelytaajuuksilla ja näin ollen estää konfliktit värähtelynvaimentimen kanssa.

Koeajoissa havaittiin myös ilmiöiden laskostumista, joka johtui säätimen käyttämän voimamittauksen hitaudesta. Voimamittaus saatiin alun perin Profibus-liitännän kautta vanhalta alustalta, joten mittaus syklin nopeuttamiseksi sekin siirrettiin uudelle alustalle ja kalibroitiin toimivaksi. Viimeisimmissä koeajoissa säätötulos oli huomattavasti aiempia parempi, laskostumisia ei esiintynyt eivätkä säätimet enää häirinneet toisiaan, joten niiden integraatio todettiin onnistuneeksi.

Tutkittavaa prosessia varten kehitetty värähtelynvaimennusalgorithmi onnistui osana integroitua säädintä vaimentamaan prosessissa esiintyviä värähtelytasoja jonkin verran. Vaimennuksen jälkeenkin värähtelytasot tosin jäivät huomattaviksi, joten koko ongelmaa ei saatu ratkaistuksi.

Viitteet

- [1] Jaakko Kytö. *Rullaussylinterin ja painotelan mallinnus kiinnirullaimen simulointiin*. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Konetekniikan koulutusohjelma, Koneautomaatio, 2007.
- [2] Marko Jorkama. The role of analytical winding dynamics in winder design. *Tappi Journal*, 81(1):202–207, tammikuu 1998.
- [3] Kilwa Ärölä. *Constitutive Modelling and Computational Simulation of Nip Mechanics and Winding of Paper Rolls*. Väitöskirja, Helsinki University of Technology, Laboratory for Mechanics of Materials, 2006.
- [4] David J. Damato. Why optimize the winder? A practical approach to optimizing and maintaining winders. *Tappi Journal*, 77(5):183–189, toukokuu 1994.
- [5] B.K. Kandadai ja J.K. Good. Winding virtual rolls. *Tappi Journal*, ss. 25–31, kesäkuu 2011.
- [6] James M. Dunn, Donald J. Allen, Michael A. Carter, Stephen M. Pepin ja William E. Leonard. Precision alignment of winders. *Tappi Journal*, 79(6):67–71, kesäkuu 1996.
- [7] Juha Orivuori. *Model-Based Optimal Control of Multidimensional and Multitonal Frequency Varying Disturbances*. Väitöskirja, Aalto University, School of Electrical Engineering, Department of Automation and Systems Technology, 2013.
- [8] Chen Jingwen. Re-winder tension control based on fuzzy adaptive PID algorithm. Julkaisussa *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, China, heinäkuu 2010.
- [9] K. Nevala. Compensation for the effect of cylinder friction in the pressure feedback control of the nip load on a paper center winder. Julkaisussa *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, ss. 159–163, joulukuu 1994.
- [10] D. McDonald, J. Hamel ja A. Ménard. Out-of-round paper rolls. *Pulp & Paper Canada*, 106(5):35–40, 2005.

- [11] John J. Lefkowitz ja David F. Boino. Effect of printer roll-quality requirements on winding technology. *Tappi Journal*, 77(10):111–116, lokakuu 1994.
- [12] David R. Roisum. *The measurement of web stresses during roll winding*. Väitöskirja, Oklahoma State University, toukokuu 1990.
- [13] David R. Roisum. Winder wisdom. *Tappi Journal*, 82(10):86–91, lokakuu 1999.
- [14] Richard J. Adams. The influence of rolls and reels on flutter and windage. *Tappi Journal*, 75(11):215–222, marraskuu 1992.
- [15] Juha Orivuori, Kai Zenger ja Timo Virtanen. Periodisten häiriöiden aktiivivaimennuksen menetelmät. Julkaisussa *Automaatio XVIII 2009 – Proceedings*, Helsinki, Suomi, maaliskuu 2009. Suomen Automaatioseura ry. ISBN: 978-952-5183-35-1.
- [16] Eero Vesaoja. *Rullauksen mallintaminen ja värähtelyjen vaimennus*. Diplomityö, Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, Automaatio- ja systeemitekniikan laitos, Automaatio- ja systeemitekniikka, 2012.
- [17] Timo Virtanen. *Fault Diagnostics and Vibration Control of Paper Winders*. Väitöskirja, Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory, 2006.
- [18] Kilwa Ärölä ja Raimo von Hertzen. Deformation of a paper roll loaded against a nip roller. *Journal of Structural Mechanics*, 38(3):55–58, 2005.
- [19] Jan Erik Olsen. On the effect of centrifugal force on winding. *Tappi Journal*, 78(7):191–195, heinäkuu 1995.
- [20] James K. Good ja Mark W.R. Fikes. Predicting internal stresses in center-wound rolls with an undriven nip roller. *Tappi Journal*, ss. 101–109, kesäkuu 1991.
- [21] Jake Zwart ja Walter Tarnowski. Winder vibration related to set throw-outs. Julkaisussa *89th Annual Meeting PAPTAC*, ss. 1–6, 2003.
- [22] Juha Orivuori ja Kai Zenger. Active control of vibration in a rolling process by nonlinear optimal controller. *Journal of System Design and Dynamics*, 5(5):681–695, 2011.

- [23] Kari Tammi. *Active control of radial rotor vibrations: identification, feedback, feedforward, and repetitive control methods*. Väitöskirja, Helsinki University of Technology, Department of Automation and Systems Technology, 2007.
- [24] C.R. Fuller, S.J. Elliott ja P.A. Nelson. *Active Control of Vibration*. Academic Press, London, 1996. ISBN: 0-12-269441-4.
- [25] Alexis Olshansky. Roll bouncing. *Tappi Journal*, 80(2):99–107, helmikuu 1997.
- [26] David A. Daly. How paper rolls on a winder generate vibration and bouncing. *Paper Trade Journal*, ss. 48–51, joulukuu 1967.
- [27] M. Jorkama ja R. von Hertzen. Two-drum winder stability analysis. *Pulp & Paper Canada*, 108(5):35–37, 2007.
- [28] Paul A. Meehan. Vibration instability in rolling mills: Modeling and experimental results. *Journal of Vibration and Acoustics*, 124:221–228, huhtikuu 2002.
- [29] Terry D. Gerhardt, John F. Staples ja Robert G. Lucas. Vibrational characteristics of wound paper rolls: experiment and theory. *Tappi Journal*, 76(6):121–128, kesäkuu 1993.
- [30] Juha Orivuori ja Kai Zenger. Comparison and performance analysis of some active vibration control algorithms. *Journal of Vibration and Control*, 2012. Julkaistu verkossa: <http://dx.doi.org/10.1177/1077546312462441>.
- [31] Torkel Glad ja Lennart Ljung. *Control Theory – Multivariable and Nonlinear Methods*. Taylor & Francis, 2000. ISBN: 0-7484-0878-9.
- [32] Heikki Huttunen. Signaalinkäsittelyn menetelmät. Opetusmoniste 2005:1, Tampereen teknillinen yliopisto, signaalinkäsittelyn laitos, 2005. ISBN: 952-15-1432-9.
- [33] National Instruments. *LabVIEW 8.5 Help*, elokuu 2007. Saatavilla: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361D-01/lvanlsconcepts/fir_filters/.
- [34] Heikki Huttunen. Signaalinkäsittelyn sovellukset. Opetusmoniste 2006:1, Tampereen teknillinen yliopisto, signaalinkäsittelyn laitos, 2006. ISBN: 952-15-1542-2.

- [35] Siemens AG. *Programming with STEP 7*, toukokuu 2010. Saatavilla: http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINUMERIK_SINAMICS_02_2012_E/S7P.pdf.
- [36] Beckhoff Automation GmbH. *TwinCAT 3 – eXtended Automation (XA)*, huhtikuu 2012. Saatavilla: http://download.beckhoff.com/download/Document/catalog/Beckhoff_TwinCAT3_042012_e.pdf.
- [37] PROFIBUS & PROFINET International. Profibus - standardization. <http://www.profibus.com/technology/profibus/>. Viitattu 25.7.2013.