

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

DIPLOMITYÖ

PITUUSLEIKKURIN AUKIRULLAUKSEN MALLINNUS JA

KIREYSSÄÄDÖN KEHITYS

Työn tarkastajat: Professori Olli Pyrhönen

TKT Niko Nevaranta

Työn ohjaaja: DI Miikka Riittinen

Lappeenrannassa 4.11.2019

Juho Kosonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

LUT Energia

Juho Kosonen

Pituusleikkurin aukirullauksen mallinnus ja kireyssäädön kehitys

Diplomityö

2019

72 sivua, 49 kuvaa, 4 taulukkoa, 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Olli Pyrhönen, TKT Niko Nevaranta

Hakusanat: pituusleikkuri, kireyssäätö, aukirullaus, vääntömomenttiohjaus, myötäkytkentä

Työssä esitetään pituusleikkurin aukirullauksen dynamiikkaa kuvaava matemaattinen malli ja muodostetaan mallin mukainen simulointimalli. Mallin toimivuus testataan ja arvioidaan käytännön mittauksin. Muodostettu aukirullauksen malli tai sen osa voidaan liittää erilaisiin simulointi- ja virtualisointialustoihin.

Lisäksi työssä esitellään pituusleikkureiden kireyssäädön vaihtoehtoja ja perustellaan käyttöön valittu myötäkytketty PI-säädin. Kireyssäätimen myötäkytkentöinä toimivat ratakiiktyvyyden kompensointivääntömomentti ja kitkan kompensointivääntömomentti.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology

LUT Energy

Juho Kosonen

Modeling of winder unwinding and improving the tension control

Master's thesis

2019

72 pages, 49 figures, 4 tables, 2 appendices

Examiners: Professor Olli Pyrhönen, D.Sc. Niko Nevaranta

Keywords: winders, tension control, unwinder, torque control, feedforward

In this thesis a mathematical model describing dynamics of unwinding and simulation model according to the derived model are presented. The performance of the model is evaluated with experimental tests. The derived unwinder system model or part of it can be connected to various simulation and virtualization platforms.

In this thesis the options for winder tension control are presented and the selected feedforward PI-controller is introduced. The feedforward terms of tension controller are acceleration and friction torque compensation.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	8
1.1	Tavoitteet	8
2	KANTOTELALEIKKURI	10
2.1	Toiminta ja rakenne.....	10
2.2	Ohjausjärjestelmä ja kenttäväylä.....	10
2.3	Linjakäytöt	12
2.4	Raaka-aine.....	12
2.5	Aukirullaus.....	12
2.6	Leikkausosa.....	13
2.7	Kiinnirullaus.....	14
2.8	Asiakasrulla.....	15
2.9	Päänvienti.....	16
2.10	Tuotannon käynnistys	16
3	KIREYSSÄÄTÖ.....	17
3.1	PID-säädin.....	17
3.2	Avoin silmukka	19
3.3	Heiluritelasäätö	19
3.4	Kireysmittaus	20
3.5	Säädinvaihtoehdot.....	22
3.5.1	Häiriön suodatus ja kompensointi.....	22
3.5.2	Myötäkytkentä	22
3.5.3	Kaskadisäätö	23
3.6	Nopeus- ja vääntömomenttiohjaus.....	24
3.7	Säätimen ja takaisinkytkennän valinta	25
4	PITUUSLEIKKURIN MALLINNUS	28
4.1	Ratanopeus	28
4.2	Aukirullaus.....	30
4.2.1	Kireyssäädin	33

4.3	Kiinnirullaus.....	36
4.3.1	Takakantotela.....	36
4.3.2	Etukantotela.....	39
4.4	Kiinnirullauksen mallin yksinkertaistaminen.....	40
4.5	Halkaisijoiden laskenta	41
4.6	Määräpysäytykset.....	41
4.6.1	Pysäytysmatkan laskenta	41
4.6.2	Kiinnirullauksen tavoitepituus.....	44
4.6.3	Kiinnirullauksen tavoitehalkaisija	44
5	SIMULOINTIMALLI	47
5.1	Auki- ja kiinnirullauspari	47
5.2	Aukirullauksen mekaniikan lohkokaavio	48
5.3	Ratakireys.....	48
5.4	Kartonkiradan mallinnus ja lohkokaavio	48
5.5	Yhdistetty malli.....	49
6	SIMULOINTI- JA MITTAUSTULOKSET	51
6.1	Simulointimalli.....	51
6.2	Testaukset jälkileikkurilla	53
6.3	Mallinnuksen vastaavuus	54
6.4	Johtopäätökset.....	58
7	KIREYSSÄÄDÖN KEHITYS	59
7.1	Esimerkki ongelmatapaus 1	59
7.1.1	Korjaavat toimenpiteet.....	62
7.2	Esimerkki ongelmatapaus 2	65
7.2.1	Korjaavat toimenpiteet.....	68
8	YHTEENVETO.....	69
	LÄHTEET	71

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	poikkipinta-ala
a	kiihtyvyys
b	kitka
D	halkaisija
E	kimmokerroin
F	voima
G(s)	siirtofunktio
h	radan paksuus
i	vaihde
J	hitausmassa
K	jousivakio, kerroin
l	pituus
n	pyörimisnopeus
PLC	ohjelmoitava logiikka
r	säde
s	paikka
T	ratakireys
t	aika
u	ulostulo
v	nopeus
w	leveys
y	ulostulo

Kreikkalaiset

α	kulmakihtyvyys, kulma
β	kulma
Δ	muutos
π	pii
ρ	tiheys
τ	momentti, aikavakio
ω	kulmanopeus

Alaindeksit ja lyhenteet

as	asetusarvo
AR	aukirullaus
Coulomb	lepokita
EK	etukantotela
D	derivointiosa
err	virhe
I	Integrointiosa
KR	kiinnirullaus
mek	mekaniikka
olo	oloarvo
P	vahvistusosa
ref	referenssi
TK	takakantotela
tot	kokonais

1 JOHDANTO

Raskaassa teollisuudessa ja prosessiteollisuudessa tuotanto on yleisesti ympärivuorokautista. Suunniteltuja tuotanto- ja huoltoseisakkeja voi olla vain kerran vuodessa tai jopa harvemmin. Jatkuva tuotanto asettaa haasteita tuotantolinjojen kunnossapidolle ja uudistamiselle. Myös kokonaan uuden tuotantolinjan rakentaminen voi vaatia olemassa olevan tuotannon pysäyttämistä. Huoltoseisakkeihin sijoittuvat kunnossapitotyöt tai tuotantolinjan tai sitä ohjaavan ohjausjärjestelmän uudistaminen täytyy pystyä tekemään suunnitellussa aikataulussa. Mekaaniset ja sähköiset asennukset, ohjausjärjestelmän komponenttien vaihdot ja ohjelmistopäivitykset vaativat seisakkiaikaa. Tehdyt muutokset on myös testattava ennen tuotannon käynnistämistä. Aikataulussa pysyvä ja onnistunut seisakkityö vaatii hyvää suunnittelua ja testausta jo ennen seisakkia. Yksi mahdollisuus vastata käyttöönottojen haasteisiin on tuotantolinjojen virtualisointi ja simulointi.

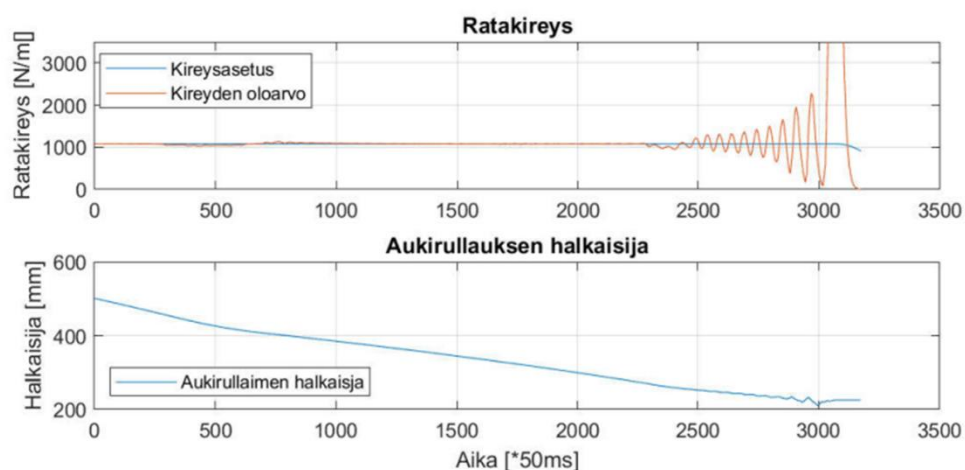
A&D Automation Oy on suunnittelemassa virtuaalista käyttöönotto- ja testausalustaa, jonka avulla uuden tai uudistettavan tuotantolinjan ohjausjärjestelmää, toimintaa ja käyttöliittymää voidaan testata ennen kuin tuotantolinjaa on rakennettu mekaanisesti tai sähköisesti. Virtuaalista testialustaa voidaan käyttää myös operaattoreiden koulutukseen. Onnistuneella tuotantolinjan virtualisoinnilla voidaan lyhentää huomattavasti tehtaalla tarvittavaa testausaikaa. Virtuaali- ja simulointimallit antavat myös mahdollisuuden kehittää jo tuotannossa olevien tuotantolinjojen toimintaa. Tämä diplomityö liittyy osaltaan mainittuun virtuaalityökalujen kehitysprojektiin.

1.1 Tavoitteet

Työn tavoitteena on tutkia kantotaleikkurin toimintaa teoreettisesti ja selvittää leikkuriin vaikuttavia fysikaalisia ilmiöitä ja muodostaa siitä simulointimalli, joka voidaan liittää osaksi virtuaalista käyttöönotto- ja testausalustaa. Simulointimallista on tarkoitus tehdä parametrisoitava, jolloin pituusleikkurin mallia voidaan käyttää myös tulevissa leikkuriprojekteissa. Simulointimallin tavoitteena on pystyä testaamaan aukirullaustapahtumaa vaihtoehtoisilla säätömalleilla ja erilaisilla lähtöarvoilla sekä

tuotantoparametreilla. Simulointimallille pystytään syöttämään myös todellista leikkurilta mitattua tuotantodataa. Simulointimallia tai sen osia voidaan ajaa erilaisilla alustoilla. Esimerkiksi malli voidaan liittää suoraan pituusleikkurin ohjausjärjestelmään. Malli voi käyttää leikkurin tuotantoaikaista mittausdataa. Simulointimallin avulla on tarkoitus kehittää Stora Enson Kaukopään tehtaalla sijaitsevan jälkileikkurin linjakäyttöjen toimintaa.

Käytännössä leikkurin ratakireyden säädössä voi esiintyä ongelmia tietyillä laaduilla ja raaka-aineen dimensioilla. Kuvassa 1.1 on esitetty yhden ongelmatilanteen ratakireyden todellisen systeemin mittausarvon kuvaaja. Havainnollistettu esimerkki on tilanteesta, jossa aukirullattavan rullan halkaisija on pieni. Kuvassa PI-säädetty ratakireys muuttuu epästabiiliksi ja oskilloi koko ajan voimistuen. Yleisesti todeten 24/7 tuotannossa olevan koneen säätöjen kehittäminen on hankalaa erityisesti jos säädettävän järjestelmän dynamiikka muuttuu. Säädinparametrien hakeminen sekä testien suorittaminen aiheuttaa katkoksia tuotannossa ja saattaa aiheuttaa sekundatuotetta. Raaka-aineita, joita ajettaessa esiintyy ongelmia ratakireyden hallinnassa, voi olla harvoin tuotannossa ja sopivaa testaushetkeä voidaan joutua odottamaan pitkään.



Kuva 1.1 Esimerkkitalanne ratakireyden muuttumisesta epästabiiliksi.

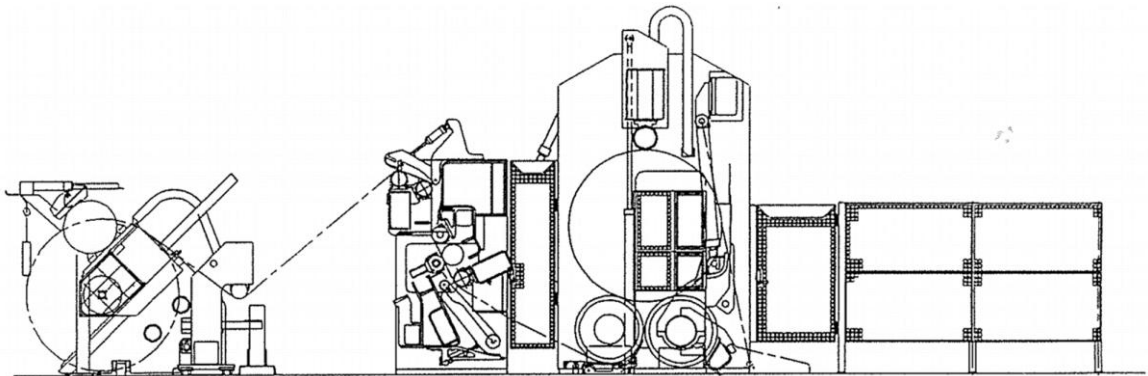
Toimiva leikkurin simulointimalli antaa mahdollisuuden säätöjen kehittämiseen tuotantoa häiritsemättä. Leikkurista saatavan ajoaikaisen datan analysointi ja datan lisääminen simulointimalliin mahdollistaa ongelmatilanteiden tutkimisen simulointien avulla.

2 KANTOTELALEIKKURI

Tässä kappaleessa käydään läpi kantotelaleikkurin rakenne, tärkeimmät toiminnot ja ohjausjärjestelmä. Yleisesti pituusleikkurit koostuvat aukirullaimesta, leikkausosasta ja kiinnirullaimesta.

2.1 Toiminta ja rakenne

Tutkimuksen kohteena on jälkileikkuri 2 (JL2) StoraEnson Kaukopään tehtaalla Imatralla. JL2 on kantotelaleikkuri -tyyppinen kartonkia raaka-aineena käyttävä pituusleikkuri. Leikkuria kutsutaan jälkileikkuriksi, koska se ei ole suoraan minkään kartonkikoneen perässä, vaan pituusleikattava kartonki on kertaalleen pituusleikattua. Kuvassa 2.1 on havainnekuva JL2 kantotelaleikkurista.

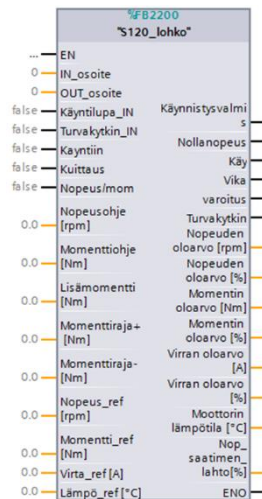


Kuva 2.1 JL2 kantotelaleikkuri (kuva laitteen suunnittelukuvista).

2.2 Ohjausjärjestelmä ja kenttäväylä

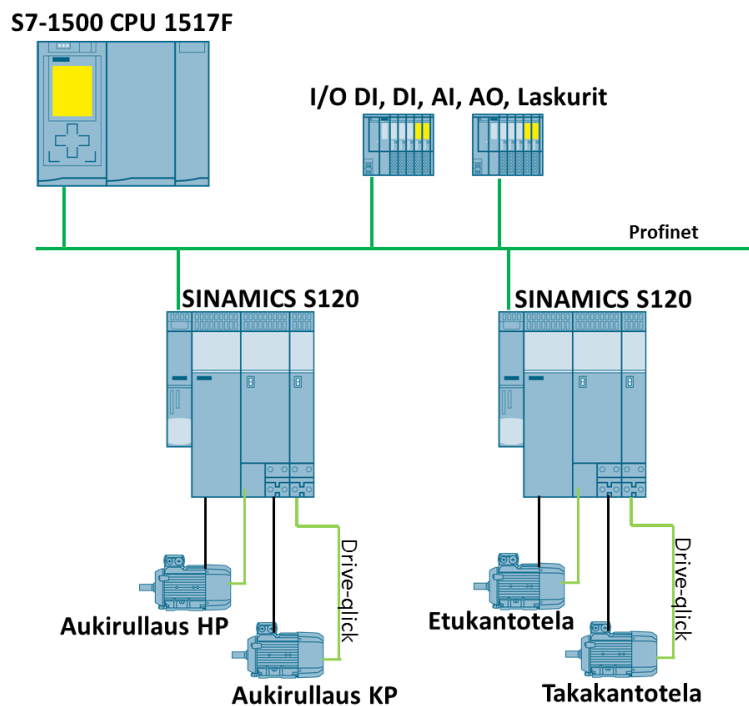
Jälkileikkurin ohjausjärjestelmänä on Siemens S7-1500 -logiikkaohjain, jolla ohjataan kaikki leikkurin toiminnot, kuten linjakäytöt, koneohjaukset ja liittynät tehdastietojärjestelmiin. Logiikkaohjaimella on toteutettu myös leikkurin turvatoiminnot. Turvakomponentit, hätäseispainikkeet, turvaportit ja turvakontaktorit on kytketty logiikan turva I/O:hon. Taajuusmuuttajien turvatoimintoja, kuten STO (Safe Torque Off), ohjataan profinet-kenttäväylään integroidulla Profisafe-laajennuksella. S7-1500 -logiikkaohjaimessa on valmiiksi integroitua taajuusmuuttaja- ja liikeohjaussovelluksia, joilla voidaan toteuttaa moniakselisten järjestelmien synkroninen ohjaus. Tässä työssä jälkileikkurin käyttöjen

ohjaus toteutettiin kuitenkin A&D Automation Oy:n linjakäyttöjen ohjaukseen suunnitellun ohjelmakirjaston moduuleilla. Ohjelmakirjaston moduulit voidaan modifioida ohjattavan ohjauskohteen mukaan. Kuvassa 2.2 on havainnollistettu taajuusmuuttajan ohjausmoduuli, jolla kirjoitetaan ohjaukset ja luetaan tilatiedot kenttäväylään liitetylle taajuusmuuttajalle.



Kuva 2.2 Taajuusmuuttajan ohjauslohko, A&D Automation Oy, ohjelmakirjasto.

S7-1500 -logiikkaohjain liittyy I/O-kortteihin ja taajuusmuuttajiin Profinet -kenttäväylällä. Kuvassa 2.3 on havainnollistettu logiikkaohjaimen Profinet -kenttäväylän rakenne.



Kuva 2.3 Jälkileikkurin ohjausjärjestelmä.

2.3 Linjakäytöt

Jälkileikkurin linjakäyttöjä ohjataan Siemens Sinamics S120 moottoriohjaimilla. Sinamics S120 on rakenteeltaan modulaarinen - yhdellä ohjausosalla ja tasasuuntaajalla voidaan ohjata useita moottoreita keskitetysti. Jälkileikkurilla S120 ohjausosia on kaksi kappaletta. Yksi ohjaa aukirullauksen käyttöpuolen (KP) moottoria ja hoitopuolen (HP) moottoreita ja toinen kantotelojen moottoreita, kuten kuvassa 2.3 on esitetty. S120:n ohjausosa on liitetty ohjausjärjestelmään Profinet-kenttävyylillä. Linjakäyttöjen moottoreina ovat ABB:n 132 kW:n induktiomootorit. Moottoreita on neljä kappaletta, kuten kuvassa 2.3 on havainnollistettu. Moottorit ovat varustettu takometreillä, jotka antavat nopeuden takaisinkytkennän taajuusmuuttajalle.

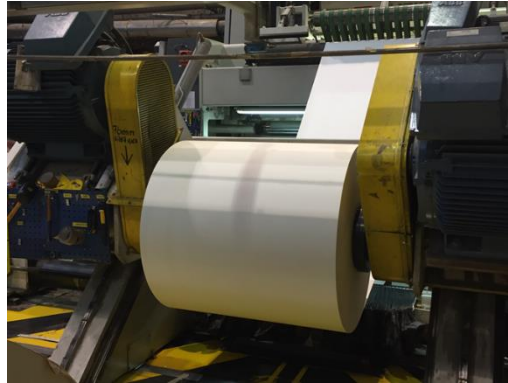
2.4 Raaka-aine

Jälkileikkurilla pituusleikataan päällystämätöntä tai muovipäällystettyä kuppi-, vuoka ja nestepakkauskartonkia ja mineraalipäällysteistä taivekartonkia. Raaka-aine on kertaalleen pituusleikattuja rullia. Kartongin neliöpainot vaihtelevat 140–400 g/m² välillä, leveydet ovat 500–2500 mm ja maksimihalkaisija on 2200 mm. Raaka-ainerullat on rullattu kartonkihylsulle, joiden halkaisijat ovat 72–350 mm. Jälkileikkurilla voidaan ajaa myös sekundalaatua, jonka ominaisuudet saattavat vaihdella suuresti yhden raaka-ainerullan aikana. Raaka-ainerullissa saattaa olla myös muotovirheitä. Rullien varastoinnin ja kuljetuksen aikana rulliin on saattanut syntyä elliptistä tai eksentristä muotoa. Koska raaka-aine vaihtelee paljon, asettaa se haasteita säädön toteuttamiselle.

2.5 Aukirullaus

Raaka-ainerullat tuodaan leikkurin aukirullauksen edessä olevalle syöttökentälle trukeilla. Operaattori poistaa rullan kääreet ja rullan hylsykorkit manuaalisesti, jonka jälkeen rulla vieritetään aukirullauspukille. Aukirullauspukin pyörityspäihin on asennettu rullan kartonkihylsyn sisähalkaisijan mukainen rullauspää. Rullauspäät ajetaan manuaalisesti kartonkihylsyn sisään ja rulla nostetaan aukirullauspukilla rullausasentoon hydraulikkaohjatuilla toimilaitteilla. Kun rulla on nostettu pukissa oikeaan rullausasemaan, rullan halkaisija mitataan laser-etäisyysmittarilla. Mitattua halkaisija-arvoa käytetään

aukirullauksen pyöritysnopeuden laskentaan radan päänvientitilanteessa. Aukirullauksen purkusuunta voi olla ylä- tai alakautta riippuen asiakasrullan tilausparametreistä. Kuvassa 2.4 on esitetty leikkurin aukirullauspukki.



Kuva 2.4 JL2 aukirullauspukki, jossa on raaka-ainerulla.

2.6 Leikkausosa

Leikkurin leikkausosassa kartonkirata leikataan leveysuunnassa kapeammiksi asiakasrulliksi. Aukirullattavasta kartongista voidaan JL2:lla leikata maksimissaan yhdeksän rullaa. Kuvassa 2.5 on esitettyinä leikkausosan teräyksikkö. Leikkausosan teräyksikössä on 11 terää, joita liikutetaan sivusuunnassa servomoottoriohjatulla siirtotunkilla. Leikkausasete, jossa kerrotaan leikattavien rullien määrä ja leveydet, lähetetään leikkurille ylemmän tason tuotannonohjausjärjestelmästä. Leikkurin ohjausjärjestelmässä lasketaan asetteen mukaan leikkausterille asemapaikat, valitaan leikaavat terät ja suoritetaan terien paikoitukset. Aukirullattavasta radasta leikataan pois reunanauha molemmista reunoista, jotta rullan päädyistä saadaan kiinnirullauksessa tasainen ja siisti. Leikattu reunanauha syötetään leikkausosasta reunanauhasuppiloon, jossa reunanauha silputaan reunanauhasilppurissa. Silputtu reunanauha siirretään ilmanpaineella puhaltamalla reunanauhakonttiin.



Kuva 2.5 Leikkausosan teräyksikkö.

Leikkausosassa kartonki kulkee ylä- ja alaterän välitse. Yläterä on kiekkoterä, joka leikkaa kartonkia. Yläterä on leikkausasennossa kiinni alaterässä. Alaterä on varustettu moottorilla, joka pyörittää alaterää ja siinä kiinni olevaa yläterää. Terien pyörimisnopeus säätyy ratanopeuden mukaan. Parhaimpaan leikkaustulokseen päästään, kun terät pyörivät hieman ratanopeutta lujempaa. Leikkausterien nopeuseroasetusta voidaan säätää leikattavan materiaalin mukaan.

2.7 Kiinnirullaus

Kiinnirullauksessa aukirullattu ja leikkausosassa kapeammiksi rainoiksi leikattu rata kiinnirullataan kartonkihylsyn ympärille valmiiksi asiakasrulliksi. Kiinnirullaus koostuu kahdesta kantotelasta, painotelasta ja rullauspäistä. Ennen päänvientiä operaattori asettaa kartonkihylsyt, joiden ympärille kartonki rullataan, kantotelojen väliin. Kun rata on teipattu päänviennin jälkeen hylsyihin kiinni ja painotela on ajettu alas hylsyyn kiinni ja asetettu kuormitussäädölle on kiinnirullaus tuotantovalmiudessa. Asiakasrulla muodostuu kantotelojen ja painotelan välissä. Kuvassa 2.6 on esitetty valokuva kiinnirullaimesta.



Kuva 2.6 JL2 kiinnirullaus.

2.8 Asiakasrulla

Asiakasrullan tilaustietoja ovat leveys ja halkaisija tai vaihtoehtoisesti kartongin metrimäärä. Leveydet ovat 300–2000 mm ja halkaisijat maksimissaan 1850 mm. Valmistunut rulla työnnetään kantotelojen päältä alaslaskupöydälle rullantyöntäjällä. Alaslaskupöytä laskee rullan lattialle, jonka jälkeen operaattori katkaisee radan käsin, teippaa rullan hännän rullaan kiinni ja asettaa hylsykorkit. Tämän jälkeen rulla vieritetään pakkaamoon vievälle lamellikuljettimelle. Kiinnirullauksessa rullan muodostumiseen ja sen ominaisuuksiin vaikuttavat kantotelojen rullausvoima, painotelan muodostama nippipaine ja aukirullauksen ohjaama ratakiireys. Ominaisuuksiin vaikuttavat ohjeavot ovat tuotekohtaisia. Myyntilaatuinen pituusleikattu rulla vaatii, että kaikki leikkurin ohjaukset ja säädöt pystyvät toimimaan koko leikkaustapahtuman ajan leikkauksen aloituksesta rullan valmistumiseen. Kuvassa 2.7 on esitettyä leikkurilta valmistunut asiakasrulla ennen hännän teippaamista.



Kuva 2.7 Leikkurilta valmistunut asiakasrulla alaslaskupöydällä.

2.9 Päänvienti

JL2:lla kartonkirata on pujotettava aukirullauksesta leikkausosan läpi kiinnirullaukseen aina, kun aukirullauspukkiin tuodaan uusi rulla. Päänviennissä aukirullaus ja kantotelat käynnistyvät päänvientinopeudella. Samalla päänvientihihnasto käynnistyy ja siirtyy päänvientiasentoon. Aukirullaksessa olevan rullan kehänopeusasetus lasketaan mitatun halkaisijan mukaan. Operaattori vie aukirullauksesta radan pään manuaalisesti päänvientihihnaston nippiin, jolloin hihnasto alkaa viedä rataa eteenpäin. Hihnasto vie radan kiinnirullaukseen, jossa operaattori ottaa radan vastaan manuaalisesti. Leikkuria pyöritetään päänvientinopeudella, kunnes rata on suoristunut koko leikkurin matkalta. Kun rata on suorassa, leikkaavat terät asetetaan leikkausasentoon. Kun leikattu rata tulee kiinnirullaukseen asti, rata pysäytetään. Seuraavaksi hylsyty puristetaan sivusuunnassa kiinni hydrauliohjatulla rullauspäillä. Viimeisenä rata leikataan poikki ja teipataan kiinni hylsyihin.

2.10 Tuotannon käynnistys

Kun päänvienti on suoritettu, voidaan leikkurilla käynnistää tuotanto. Ensimmäisenä lasketaan painotela kiinni kantoteloilla oleviin hylsyihin, joihin kartonkirata on teipattu kiinni. Painotela on ohjelmoitu tunnistamaan hylsyn pinnan taso. Painotelan saavutettua hylsyn pinnan, se aloittaa kuormituksen tuotekohtaisen reseptin mukaisesti. Painotelan ollessa kuormituksella voidaan käynnistää aukirullauksen kireyssäätö. Jos kireyssäädön käynnistyttyä radassa on löysää, aukirullaus lähtee kiristämään rataa pyörimällä nopeusohjeella hitaasti vastakkaiseen suuntaan. Kun mitattu ratakireys saavuttaa 80 % asetetusta kireydestä, aukirullaus siirtyy vääntömomenttiohjaukselle ja kireyssäädin aktivoituu. Kireysohjeena on seisontakireys, joka on 20 % tuotantokireydestä. Aukirullauksen saavutettua riittävän ratakireyden voidaan leikkuri käynnistää ryömintänopeudelle. Ryömintänopeudella ratakireysasetus vaihtuu tuotekohtaisen reseptin mukaiseksi. Ratakireysasetus rampitetaan tuotantokireyteen S-liikkeenohjausprofiililla. Kun ratakireys on saavuttanut tuotantokireyden, voidaan leikkurin nopeus nostaa tuotantonopeuteen.

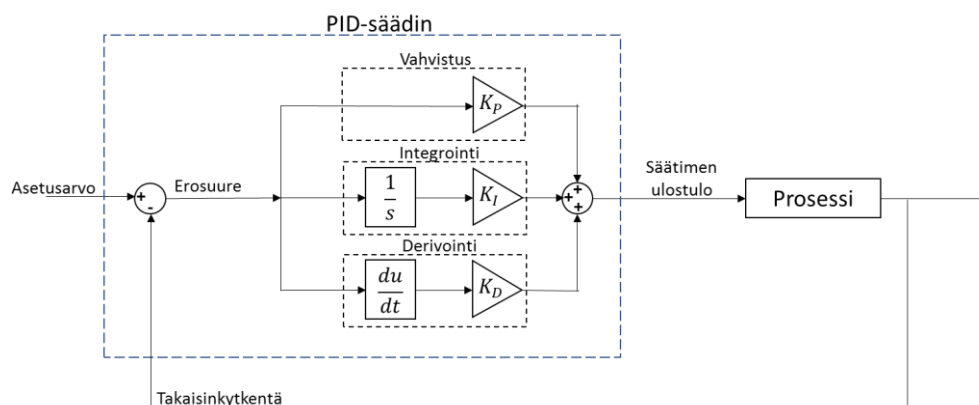
3 KIREYSSÄÄTÖ

Tässä kappaleessa käydään läpi pituusleikkureiden aukirullainten ratakireyden säätötapoja, kireyden mittaamisen vaihtoehtoja ja perustellaan tässä diplomityössä käytettävät säätötavat. Yleisesti ottaen ratakireyden mittaamiseen on erilaisia vaihtoehtoja. Kireyttä voidaan mitata suoraan radasta voima-antureilla tai epäsuorasti ns. heiluritelalla. Ratakireys voidaan myös laskea taajuusmuuttajilta saatavan takaisinkytkentätiedon perusteella ja käyttämällä sen tukena esimerkiksi mallipohjaista estimointimenetelmää kireyden estimoimiseksi.

Teollisuudessa ratakireyden säätöön käytetään tyypillisesti PID-säätimiä (Jin, 2002) ja sen eri variaatioita, kuten kaskadisäätöä yhdistettynä myötäkytkentöihin. Säätötekniikassa tunnetaan useita kehittyneitä säätöteorioita, kuten tilasäätö ja sumea säätö, mutta käytännön sovelluksiin kehittyneitä tekniikoita pidetään usein liian monimutkaisina ja haastavina saada toimimaan (Hou, 2001, s. 39). Kantotelaleikkurin ratakireyttä säädetään ohjaamalla aukirullauksen moottorin nopeutta tai vääntömomenttia, koska kiinnirullausteloilla ei pysty säätämään järkevästi sekä ratakireyttä, että kiinnirullattavan rullan ominaisuuksia. Onnistunut kiinnirullaus vaatii tasaisen ratakireyden ennen kiinnirullausta.

3.1 PID-säädin

PID-säädin on teollisuuden käytetyin säädintyyppi (Harju, 2000, s.11), joka löytyy valmiina algoritmina lähes kaikista logiikka- ja automaatiojärjestelmistä. Useimmiten PID-säätimellä ja sen variaatioilla voidaan kattaa suurin osa teollisuuden säätötarpeista. Tämä johtuu siitä, että säätimen käyttöönotto ja viritys eivät välttämättä vaadi syvällistä tietoa säätötekniikan teoriasta. Tyypillisesti viritys onnistuu kokeellisesti ilman että prosessin matemaattinen malli on saatavissa. Kuvassa 3.1 on havainnollistettu PID-säätimen rakennetta periaatekaviolla.



Kuva 3.1 PID-säätimen lohkokaavio.

PID-säädin koostuu kolmesta komponentista - vahvistusosasta P, integroivaosasta I ja derivointiosasta D. Käytettävät komponentit ja niiden painotus riippuu säädettävästä prosessista. Jossain tapauksissa prosessia voidaan säätää pelkällä P-komponentilla. PID-säätimen sisääntulo on asetusarvon ja mittauksen takaisinkytkennän erotus eli erosuure. P-komponentti on erosuure kertaa P-osan kerroin eli vahvistus K_P . Vastaavasti I-komponentti on erosuureen integraali (summa) kertaa I-osan vahvistus K_I . D-komponentti on erosuureen derivaatta (muutos) kertaa D-osan vahvistus K_D . PID-säätimen ulostulo on vahvistus-, integroiva- ja derivointiosan summa.

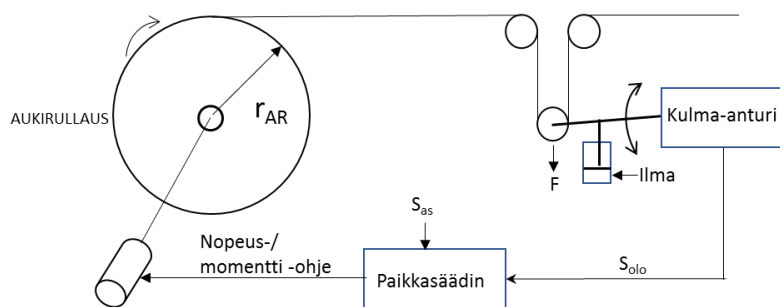
Pelkällä P-säädöllä säätöön jää pysyvä säätöpoikkeama, mikäli säädettävällä prosessilla ei ole itsessään integroivaa ominaisuutta. Liian suuri K_P :n arvo voi saada prosessin värähtelemään ja vastaavasti liian pieni K_P :n arvo tekee säädöstä ”laiskan” ja jättää suuren säätöpoikkeaman. Integroivalla termillä säädöstä saadaan poistettua säätöpoikkeama. Vastaavasti derivoiva termi reagoi nopeasti erosuureen muutokseen ja auttaa värähtelyyn, mutta on herkkä mittauskohinalle. Tästä syystä D-osan häiriöherkkyyttä vähennetään usein alipäästösuodatuksella. PID-säätimen viritys on käytännössä monesti kompromissi vaatimusten suhteen. Säätimen pitäisi olla nopea, tarkka ja stabiili. Välttämättä kaikkia näitä säädön tavoitteita ei pystytä täyttämään. Nopea säädin on herkkä häiriöille ja pienet muutokset säädettävässä prosessissa saattavat tehdä säädöstä epästabiilin. Myös toimilaitteen suorituskyky voi rajoittaa säätöpiirin nopeutta.

3.2 Avoin silmukka

Ratakireyden säädössä ei välttämättä tarvita ratakireyden takaisinkytkentää. Nykypäivän väyläliitännäiset taajuusmuuttajat pystyvät antamaan lähes reaaliaikaista tietoa nopeudesta ja vääntömomentista (Profibus, 2019). Ratakireys muodostetaan vetävien telojen välille telojen nopeus- tai vääntömomenttierolla. Vetävien telojen nopeuden ja vääntömomentin oloarvoista pystytään laskemaan ratakireys, kun tiedetään materiaalin ominaisuudet, telojen ja rullainten halkaisijat sekä mekaniikan ominaisuudet. Avoin silmukka -säätö sopii prosesseihin, joissa ei ole tiukkoja vaatimuksia ratakireydelle ja materiaali on venymätöntä (Nevaranta, 2011, s. 21).

3.3 Heiluritelasäätö

Heiluritelaohjauksessa ei mitata ja säädetä suoraan ratakireyttä vaan heiluritelan paikkaa. Heiluritelaohjauksessa rata vietään liikkuvan varren päässä olevan rullan kautta. Heiluritela voidaan varustaa esimerkiksi ilmaohjatulla vastapainolla, jolla voidaan säätää heiluritelan rataa aiheuttamaa kiristysvaikutusta. Paikkasäädin pyrkii pitämään heiluritelan asetusarvon mukaisessa paikassa. Heiluritelan paikka mitataan kulma-anturilla ja paikkasäädin ohjaa aukirullauksen nopeutta tai vääntömomenttia. Kuvassa 3.2 on kuvattu heiluritelasäädön periaatekuva.



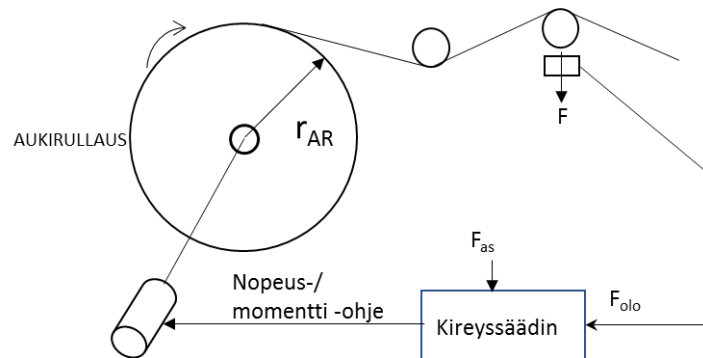
Kuva 3.2. Heiluritelaaan perustuva kireyssäätö. Kuvassa S_{olo} on kulma-anturin mittaussarvo, S_{as} on kulmasäädön asetusarvo, F on heiluritelan rataa vaikuttava voima ja r_{AR} on aukirullauksen säde.

Heiluritelan etuna on helppo säädettävyys. Lisäksi heiluritela itsessään toimii materiaalivarastona, joka tasaa kireysvaihteluita radan nopeuden muutoksissa. Heiluritelan huonoja puolia ovat suoran ratakireysarvon puuttuminen ja heikko säätötarkkuus pienillä

kireysarvoilla. Myös heiluritelan mekaaninen suunnittelu ja sovittaminen tuotantokoneeseen on haasteellista, jos koneen rataleveys on usean metrin levyinen (Stefanova, 2012, s. 5). Materiaaleille, jotka eivät kestä 180 asteen mutkaa pienellä säteellä, heiluritelasäätö ei sovi (Coper, 2009).

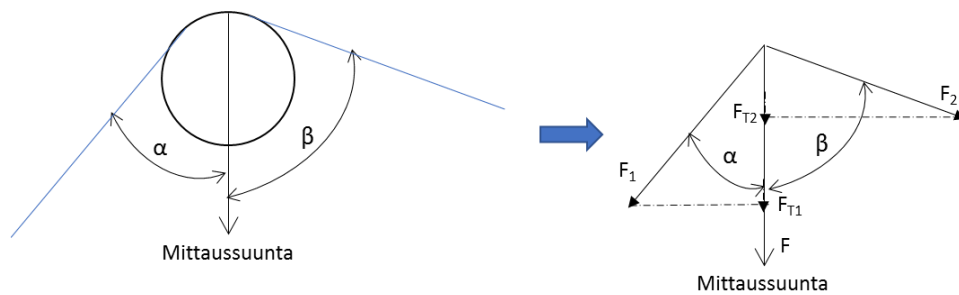
3.4 Kireysmittaus

Ratakireyden mittauksessa rata viedään vapaan telan kautta, joka on varustettu yhdellä tai useammalla voima-anturilla. Voima-antureilla mitataan voimaa, jolla ratakireys vaikuttaa vapaaseen telaan. Kuvassa 3.3 on kuvattu kireysmittauksen periaatekuva.



Kuva 3.3. Kireysmittaukseen perustuva kireyssäätö. Kuvassa F_{olo} on voima-anturin mittauservo, F_{as} on kireyden asetusarvo, F on radan voima-anturiin vaikuttava voima vaikuttava voima.

Vaikuttava voima riippuu siitä missä kulmassa rata tulee ja lähtee mittaavalta telalta. Kuvassa 3.4 rata tulee mittavalta telalle 50° kulmassa, lähtee 20° kulmassa ja ratakireys on 1000 N. Tätä ratakireyden arvoa voidaan pitää tyypillisenä tarkastelun alla olevan laitteiston materiaaalille.



Kuva 3.4. Ratakireyden voimamittaus. F_1 on telalle tulevan radan ratavoima, F_2 on telalta lähtevän radan ratavoima, F_T on voima-anturiin kohdistuva voima, α on radan tulokulma ja β on radan lähtökulma.

Kun oletetaan ratakireydeksi 1000N, saadaan voimalle F_T

$$F_T = \frac{1000N}{2} (\cos\alpha + \cos\beta) = 791 N, \quad (3.1)$$

jossa F_T on mittaussuuntaan vaikuttava voima, α on radan tulokulma ja β on radan lähtökulma.

Ratakireyden voimamittaus voidaan kalibroida näyttämään todellista ratakireyttä voimamittarilla varustetulla taljalla. Talja pujotetaan radanviennin mukaisesti mittaustelan kautta ja kiristetään voimamittarin avulla kalibrointikireyteen. Kireysanturi kalibroidaan näyttämään samaa kireysarvoa kuin voimamittari. Toinen vaihtoehto on ottaa laskennassa huomioon mittaustelan kuvassa 3.4 havainnollistetut ratakulmat.

Kireysmittauksen etuina ovat asennuksen helppous ja nykyisten kireysmittareiden ja lähettimien käyttäjäystävällisyys. Useimmiten kireysmittauksen käyttöönotto ja kalibrointi on yksinkertaista. Jos mittaava tela on varustettu useammalla voima-anturilla, esimerkiksi asennettuna telan molempiin päihin, saadaan radasta mitattua myös mahdollinen vinokuorma. Vinokuorma voi johtua materiaalin profiiliheiteistä tai aukirullauspukin asentovirheestä. Kireysantureita voidaan joutua kalibroimaan määräjain sekä niiden saatua kovemman voimaiskun esimerkiksi ratakatkossa. Kireysmittauksen huonona puolena voi olla mittaussignaalin häiriöt. Useimmiten mittaussignaalia voidaan joutua suodattamaan paljonkin ennen kuin mittausta voidaan käyttää säätöön.

3.5 Säädinvaihtoehdot

Pelkällä PID-säätimellä ei voida saavuttaa tarkkaa ja hyvin toimivaa ratakiireyden säätöä aukirullaussovelluksissa, joissa kiihtyvyydet ja tuotantonopeus ovat suuria ja aukirullauksen inertian muutos on suuri (Hou, 2001, s. 29). Säätöä voidaan parantaa lisäämällä PID-säätimen rinnalle myötäkytkentöjä ja muuttamalla säädinrakenne kaskadisäädöksi.

3.5.1 Häiriön suodatus ja kompensointi

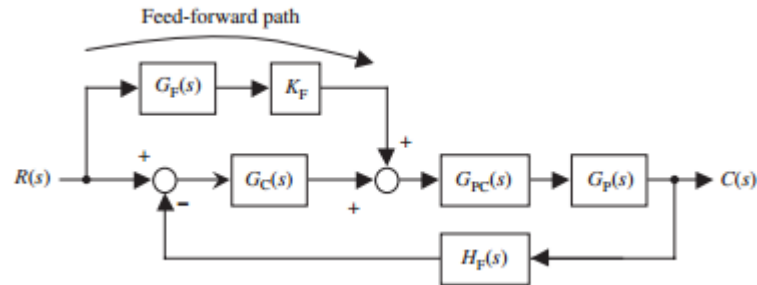
Lähes kaikissa säädettävissä systeemeissä on ei toivottuja häiriöitä, jotka vaikeuttavat säädön toimivuutta. Häiriöt voivat tulla mittauksesta tai itse prosessista. Mittaussignaali saattavat sisältää korkeataajuista kohinaa ja epäsäännöllisiä korkeita mittausspiikkejä. Mittaussignaalin häiriöt aiheuttavat häiriöitä säätimen lähtöön, etenkin jos PID-säätimen derivointiosa on käytössä. Häiriöitä sisältävää mittaussignaalia voidaan suodattaa ennen säädintä. Suodattimien käyttö säädössä kuitenkin huonontaa säätimen suorituskykyä ja tuo lisää viivettä suljettuun säätöjärjestelmään (Ellis, 2004, s. 171).

Jos häiriön pystyy mittaamaan tai mallintamaan, on se mahdollista kompensoida niin, ettei se vaikuta prosessin säätöön. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia häiriön kompensointitapoja kuten myötäkytkentä, tilahavaitsijan käyttö (Ellis, 2004, s. 192), kahden vapausasteen säädin (Skogestad, 2005, s. 55) tai mallipohjainen säätö. Pituusleikkureissa esimerkiksi aukirullauksen dimensiovirheet aiheuttavat jaksollisen häiriön prosessiin, joka on mahdollista mitata tai estimoida ja on sen siten kompensoitavissa.

3.5.2 Myötäkytkentä

Myötäkytkennässä myötäkytkentäsignaalit summataan suoraan säätimen lähtösignaaliin. Pituusleikkurisovelluksissa myötäkytkentäsignaaleina voidaan käyttää kitkan kompensointivääntömomenttia ja systeemin inertian kompensointivääntömomenttia kiihdytystilanteissa. Teoriassa täydellisesti määritellyillä myötäkytkentäsignaaleilla voidaan saada lähes ideaalinen systeemin ohjausvaste. Onnistuneen myötäkytkennän avulla kiireyssäätimen tehtäväksi jää tällöin mahdollisten häiriöiden ja mallivirheiden

kompensointi. Voimakkaalla myötäketykennällä voidaan parantaa säädön ohjausvastetta huomattavasti (Ellis, 2004, S. 151). Kuvassa 3.5 on kuvattu myötäketykennän periaatekaavio.

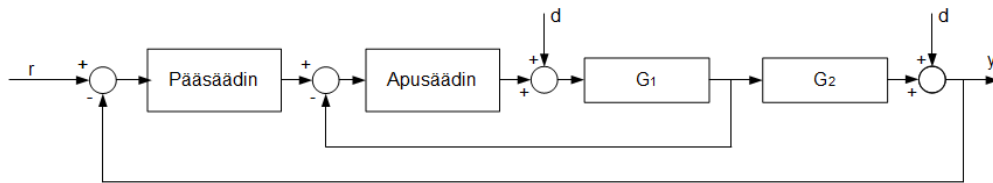


Kuva 3.5. Myötäketyketyin säätimen periaatekuva (Ellis, 2004 s, 152). Kuvassa $G_C(s)$ on säätimen siirtofunktio, $G_F(s)$ myötäketykennän siirtofunktio, K_f on myötäketykennän vahvistus. $G_{PC}(s)$ $G_P(s)$ ovat osaprosesseja ja $H_F(s)$ on takaisinkytkennän siirtofunktio. $R(s)$ prosessin sisäänmeno ja $C(s)$ on prosessin ulostulo.

3.5.3 Kaskadisäätö

Kaskadisäädin on teollisuuden käytetyimpiä säädinlaajennuksia. Useimmassa tapauksessa kaskadisäädössä on kaksi sisäkkäistä säätösilmukkaa, kuten kuvassa 3.6 on havainnollistettu. Ulompi pääsäädin ei suoraan säädä prosessia, vaan antaa asetusarvon sisemmälle apusäätimelle, joka ohjaa prosessiin vaikuttavaa toimilaitetta. Kaskadisäätöä käytetään nopeuttamaan ja tarkentamaan säätöä. Sen avulla voidaan myös kompensoida prosessihäiriöitä ja toimilaitteiden epälinearisuuksia. Kaskadisäätimen apusäädin pyritään virittämään nopeaksi ja herkäksi reagoimaan prosessihäiriöihin. Pääsäädin voidaan virittää huomattavasti hitaammaksi.

Kaskadisäätimen virityksessä säädin voidaan jakaa kahdeksi erilliseksi säätimeksi, pää- ja apusäätimeksi. Apu- ja pääsäätimenä voi käyttää mitä tahansa takaisinkytkentään perustuvaa säädintä ja viritysmenetelmänä voi käyttää analyyttisiä tai kokeellisia viritysmenetelmiä. Teollisuudessa käytetyimpiä säätimiä ovat PID-säätimen eri variaatiot. Kaskadisäätimen apusäädin, joka useimmiten viritetään ensimmäiseksi, pyritään virittämään nopeaksi ja herkäksi reagoimaan prosessihäiriöihin. Kaskadisäätimen edut saadaan esille, kun apusäädin on oleellisesti pääsäädintä nopeampi (Kortela U. ym. 1976, s.155). Pääsäädin voidaan virittää huomattavasti hitaammaksi ja esimerkiksi asetusarvo voidaan syöttää rampituslohkon kautta.



Kuva 3.6 Kaskadisäädön lohkokaavio (Kortela U. ym. 1976 Sääätötekniikan perusteet). Kuvassa r on asetusarvo, d on häiriösignaali, y on mittausta ja G_1 ja G_2 ovat siirtofunktioita.

3.6 Nopeus- ja vääntömomenttiohjaus

Pituusleikkureiden ratakireyden säädön toimilaitteena on aukirullauksen nopeus- tai vääntömomenttiohjattu moottori. Tässä yhteydessä on syytä huomauttaa, että kirjallisuudessa käytetään usein myös termiä ”momenttiohjaus”. Ohjaustapa riippuu käytettävissä olevista laitteista. Nykypäivän AC- ja DC-käytöt ovat dynaamisilta ominaisuuksiltaan hyvin lähellä toisiaan ja niille on vakiintuneet säätötavat, joten käytännössä ei ole juurikaan merkitystä käytetäänkö AC- vai DC-moottoreita. Toteutukseen vaikuttaa enemmän taajuusmuuttajan tai DC-ohjaimen ominaisuudet; minkälaisia ohjaustapoja ohjain pystyy suorittamaan tai mitä kenttävylyä kommunikointiin voidaan käyttää.

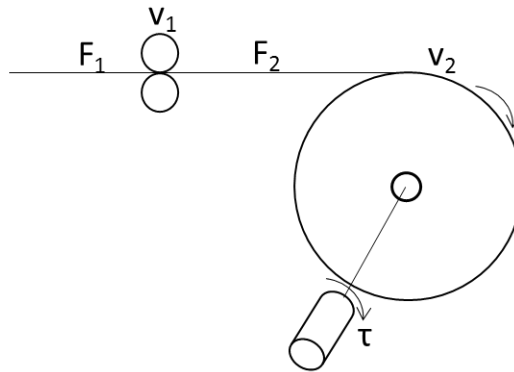
Nopeus- tai vääntömomenttiohjatussa säädössä säädin sijaitsee ylemmän tason järjestelmässä ja ohjesignaali välitetään taajuusmuuttajalle tai DC-ohjaimelle kenttävylyän kautta tai analogisena signaalina. Moottoriohjaimissa on tyypillisesti sisäinen nopeussäädin ja vääntömomenttisäädin sarjassa. Jos käytetään nopeusohjetta, moottoriohjaimen sisäinen kaskadisäädin (nopeus – ja vääntömomenttisäädin sarjassa) säätää moottorin nopeutta. Vääntömomenttisäädöllä vääntömomenttiohje välitetään suoraan moottoriohjaimen sisäiselle vääntömomenttisäätimelle.

Kireyssäätöön voidaan käyttää yhdistettyä nopeus- ja vääntömomenttisäätöä. Säätötapaa nimitetään ns. momenttirajoitussäädöksi. Säätötavassa säädetään nopeutta ja rajoitetaan vääntömomenttiä. Leikkurin ollessa tuotantonopeudella ja ratakireyden ollessa lähellä asetusarvoa aukirullauksen säätö tapahtuu vääntömomenttirajoituksella. Nopeussäätö ohjaa aukirullausta ratakatkotilanteessa tai muissa poikkeustilanteissa, ettei aukirullaus ryntäisi hallitsemattomasti.

3.7 Säätimen ja takaisinkytkennän valinta

Aukirullaussovellusten radan kireyden mittaustavan valinnan määrittävät suurelta osin tuotteen laatu ja dimensiot, tuotantonopeus ja ratakireyssäädön vaatimukset. Jos ratakireydelle ei ole tiukkoja vaatimuksia ja ratakireyden heilahtelut sallitaan esimerkiksi ratanopeuden muutoksissa, ratakireyden hallinta voidaan tehdä ilman kireyden takaisinkytkentää avoimessa silmukassa. Pituus- ja jälkileikkurisovelluksissa, joissa on suuret nopeudet, kiihtyvyydet ja inertiaväntömomentin muutokset, ja ratakireydelle on tiukat vaatimukset, voima-antureihin perustuva mittaus on usein ainoa keino saavuttaa asetetut tavoitteet.

Tässä tutkimuksessa kuvattuun pituusleikkurin ratakireyden säätöön ohjaussuureeksi valikoitui vääntömomentti ja kireyssäätörakenteeksi myötäkytketty PI-säädin. Aukirullauksen säädön myötäkytkentäarvoina käytettävät kiihdytyksen kompensointimomentti ja kitkojen kompensoinnit käsitellään vääntömomentteina ja ne voidaan suoraan lisätä vääntömomenttisäädön ohjeeseen. Aukirullauksen kehänopeudesta ei saada suoraa takaisinkytkentää. Kehänopeus on laskennallinen arvo, joka lasketaan aukirullauksen rullan halkaisijan perusteella (joka myös on laskennallinen arvo). Vääntömomenttiohjattu aukirullaus ei ole niin herkkä mahdollisille laskenta- ja mittausvirheille kuin nopeussäädetty. Kuvassa 3.7 on kiinnirullain, jossa rata kulkee vetävän nippiparin läpi rullaimelle. Kuvan prosessia voidaan ohjata nopeutta tai vääntömomenttia säätämällä.



Kuva 3.7 Kiinnirullaimen periaatekuva. Kuvassa F_1 on ratakiireys ennen nippiparia, F_2 on ratavoima nippiparin jälkeen. v_1 on nippiparin kehänopeus, v_2 kiinnirullaimen ratanopeus ja τ on aukirullaimen moottorin vääntömomentti.

Vääntömomenttisäädön käyttämisestä tietyissä sovelluksissa voidaan perustella seuraavan tarkastelun avulla. Kuvan 3.7 ratakiireydelle F_2 saadaan

$$F_2 = F_1 \left(\frac{v_2}{v_1} \right) + \frac{EA(v_2 - v_1)}{v_1}, \quad (3.2)$$

jossa F_1 on ratakiireys ennen nippiparia, F_2 on ratakiireys nippiparin ja rullaimen välissä. E on kartongin kimmomoduuli, A on kartongin poikkipinta-ala, v_1 on nippiparin kehänopeus ja v_2 on rullaimen kehänopeus. Tarkastellaan tilannetta taulukossa 3.1 on esitettyjen parametrien avulla ja niiden arvot.

Taulukko 3.1 Esimerkkilaskennan parametrit ja niiden arvot.

Parametri	Arvo	Yksikkö
F_1	0	N
v_1	100	m/s
v_2	102	m/s
EA	200	N

Taulukon 3.1 parametreilla yhtälön (3.2) sijoitettuna ratakiireydeksi F_2 tulee 4 N. Jos säädettävässä nopeudessa v_2 on 0.25 %:n mittausvirhe, niin ratakiireydeksi F_2 tulee 4.51 N. Eli 0.25 %:n mittausvirhe tuottaa tällöin 12.75 %:n virheen säätöön.

Vääntömomenttisäädöllä 0.25 %:n mittausvirhe tuottaa 0.25 %:n virheen säätöön. Yleisesti rullainsovelluksissa, joissa materiaalina on vähän venyvä materiaali, suositellaan vääntömomenttiohjausta (Whiteside, 2007, s. 9-13).

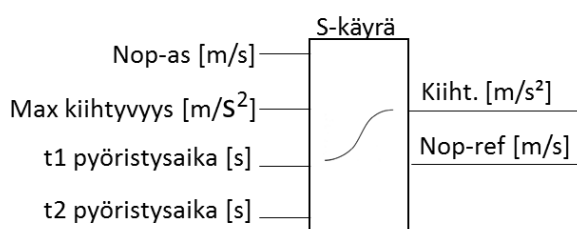
4 PITUUSLEIKKURIN MALLINNUS

Tässä kappaleessa mallinnetaan pituusleikkurin käyttöjen ohjausta ja toimintaa ja niihin vaikuttavia fysikaalisia ilmiöitä, kuten kitkaa ja kartonkiradan dynamiikkaa. Lisäksi selvitetään linjan liikkeenohjausprofiilin muodostusta ja määräpysäytyksiä. Mallinnuksessa on myös mukana osia, joita tarvitaan simulointimallin muodostuksessa

4.1 Ratanopeus

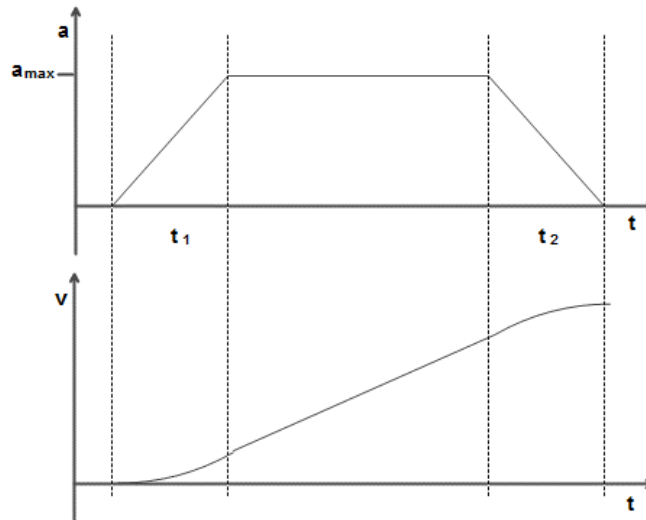
Jälkileikkurin ratanopeuden tuottaa kiinnirullauksen takakantotela (kts. kuva 2.3). Leikkurin linjakäyttöjen etukantotela ja aukirullaus ovat vääntömomenttiohjattuja takakantotelan toimiessa isäntäkäyttönä. Ratanopeuden muutokset pyritään säätämään hyödyntämällä hyvin suunniteltuja liikkeenohjausreferenssejä, jotta vältytään askelmaisilta kiihtyvyyden muutoksilta. Varsinkaan isoilla rullainertioilla aukirullauksen moottori ei pysty toteuttamaan suuria portaittaisia kiihtyvyydenmuutoksia ilman ratakiireysmuutoksia, jotka taas aiheuttavat poikkeamia asiakasrullien laatuun tai pahimmassa tapauksessa jopa ratakatkoja.

Ratanopeutta ohjataan s-liikkeenohjausprofiililla, jonka syötteenä on kolme parametria; alkupyörästysaika t_1 , loppupyörästysaika t_2 ja maksimikihtyvyys tai -hidastuvuus. Nämä parametrit ovat tuotekohtaisia arvoja, jotka operaattori valitsee kirjastosta ajettavan tuotteen mukaan. S-liikkeenohjausprofiilin laskennasta saadaan ratakihtyvyyden ja ratanopeuden ohjearvot. Ratakihtyvyyden ohjearvon avulla lasketaan kiihtyvyyden kompensointivääntömomenttiohjeet linjakäytölle. Kuvassa 4.1 on kuvattu s-liikkeenohjausprofiilin muodostuslohko.



Kuva 4.1 S-liikkeenohjausprofiilin muodostuslohko.

S-liikkeenohjausprofiili muodostetaan kasvattamalla kiihtyvyyden ohjearvoa nollakihtyvyydestä maksimikihtyvyyteen ajassa t_1 . Vastaavasti maksimikihtyvyydestä ohjearvo laskee nollaan ajassa t_2 . S- liikkeenohjausprofiilin toinen lähtö, nopeusohje, saadaan integroimalla kiihtyvyyden ohjearvoa. Kuvassa 4.2 on kuvattu s-liikkeenohjausprofiilin kiihtyvyys ja siitä integroitu nopeus.



Kuva 4.2 S-liikkeenohjausprofiilin kiihtyvyys ja nopeus. Kuvassa a_{\max} on maksimikihtyvyys.

Nopeuden ohjearvo v_{ref} lasketaan integroimalla kiihtyvyyden ohjearvoa a_{ref} seuraavasti

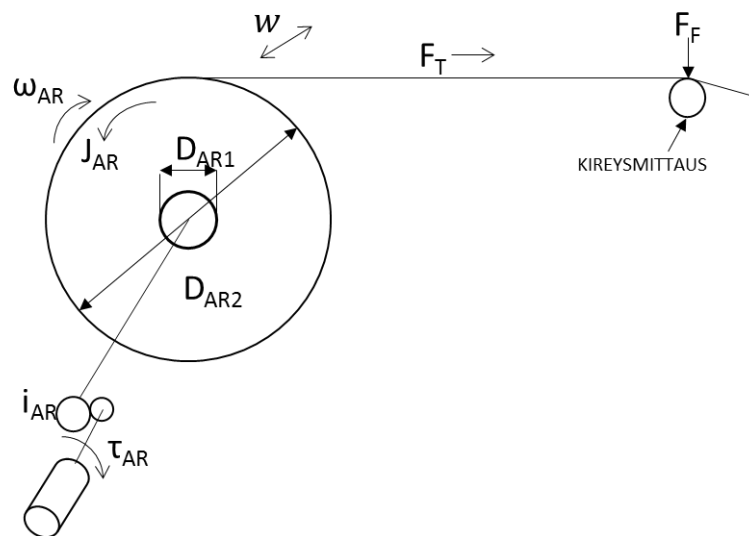
$$v_{ref} = \int_0^t a_{ref} dt, \quad (4.1)$$

jossa t on integrointi aika.

Pituusleikkurin radan hallinnassa on tärkeää, tai jopa käytännössä välttämätöntä, että kaikki käytöt toimivat synkronisesti käyttäen samaa kiihtyvyyden- ja nopeusohjetta. Koko radan hallinta ja säädöt ovat keskitetyksi ylemmän tason logiikkaohjaimessa (Rautiainen, s. 245). Taajuusmuuttajien sisäisiä rampeja ei siis käytetä. Nopeusohje välitetään väylän kautta takakantotelaa ohjaavalle taajuusmuuttajalle, ja varsinainen nopeussäätö tapahtuu takakantotelan taajuusmuuttajassa.

4.2 Aukirullaus

Aukirullauksen tärkein tehtävä on ylläpitää tasaista ratakiireyttä kaikissa leikkurin ajotilanteissa. Pääasiassa aukirullausta ohjataan vääntömomenttisäädöllä, mutta uuden raakarullan valmistelussa ja päänviennissä käytetään nopeusohjausta. Vääntömomenttisäädöllä pyritään pitämään aukirullauksen ja kiinnirullauksen välinen ratakiireys tuotekohtaisessa arvossa. Ratakiireyden hallinnan haasteena on jatkuvasti muuttuva aukirullaushalkaisija, ratanopeuden muutokset ja prosessin epälineaarisuudet. Muuttuva halkaisija vaikuttaa inertiaivääntömomenttiin, kulmanopeuteen, ratakiireyden vaatimaan jarrutusvääntömomentin laskentaan ja kitkaan. Aukirullaimen dynamiikkaa on havainnollistettu kuvassa 4.4, jossa ω_{AR} on aukirullaimen kulmanopeus, J_{AR} aukirullaimen inertia, w radan leveys, D_{AR} on aukirullaimen halkaisija. F_T on ratakiireys ja F_F on ratakiireyden vaikutus kireyden voimamittaukseen. i_{AR} on aukirullauksen vaihde ja τ_{AR} on aukirullausmoottorin vääntömomentti.



Kuva 4.4 Aukirullauksen rakenne.

Aukirullauksen vääntömomenttiohjeen laskennassa on otettava huomioon ratakiireyden muodostamiseen tarvittava vääntömomentti τ_{ref} ja kulmakiinnoituksen inertiaivääntömomentin kompensointi τ_{ARkomp} ja kitkojen kompensointivääntömomentti. Ratakiireysasetus T_{ref} annetaan viivapaineena muodossa N/m, eli ratakiireyteen vaikuttava

vääntömomentti voi vaihdella huomattavasti riippuen ajettavan materiaalin leveydestä. Vääntömomenttiohjeen ratakireyden osa muodostetaan seuraavasti

$$\tau_{ref} = T_{ref} * \frac{D_{AR2}}{2} * W, \quad (4.2)$$

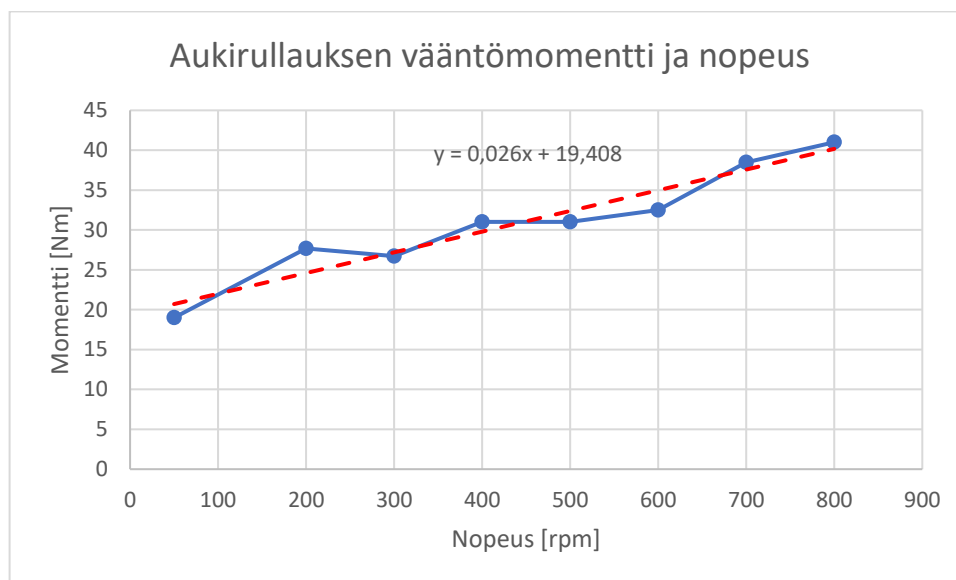
jossa τ_{ref} on ratakireyden muodostamiseen tarvittava vääntömomentti.

Aukirullaukseen vaikuttavat kitkat syntyvät aukirullauksen moottoreista, mekaniikasta sekä itse aukirullaustapahtumasta. Kitkojen tarkka matemaattinen mallintaminen on vaikeasti toteutettavissa, koska kitkojen muodostumiseen vaikuttavat myös raaka-aineen ja ympäristön lämpötilat ja kosteudet. Myös raaka-aineen muut ominaisuudet, kuten kartongin pinnoite, vaikuttavat suuresti kitkan muodostumiseen. Kitkat ovat kuitenkin merkittävä tekijä aukirullauksen dynamiikassa ja ne on otettava huomioon, jos ohjauksesta halutaan tarkka ja toimiva. Varsinkin pienillä aukirullauksen halkaisijoilla kulmanopeuden kasvaessa dynaamisen kitkamomentin osuus kasvaa merkittävästi samalla kun ratakireyden muodostamiseen tarvittava vääntömomentti pienenee. Aukirullauksen lepokitkaa ei tarvitse ottaa huomioon kitkan mallinnuksessa, koska kaikki kiinnirullaukseen ominaisuudet, joihin linjakäyttöjen ohjauksella voidaan vaikuttaa, tapahtuvat linjan ollessa ajossa.

Koska aukirullauksen kitkoja ei tunneta riittävällä tarkkuudella, niille on rakennettava matemaattinen malli kokeellisesti. Koejärjestelyssä aukirullauspukkiin on laitettu tyhjä kartonkihylsy. Aukirullausta ohjataan vääntömomenttiohjeella. Testissä vääntömomenttiohjetta nostetaan askelein nollamomentista ylöspäin, kunnes vääntömomenttiohje ylittää lepokitkan vaikutuksen ja aukirullain alkaa pyöriä. Seuraavaksi vääntömomenttiohjetta pienennetään, kunnes aukirullain pysähtyy. Vääntömomenttiohjeen arvo, jossa pysähdys tapahtuu, on kiinteän kitkavääntömomentin arvo.

Dynaaminen kitkavääntömomentti määritellään ajamalla aukirullausta nopeusohjeella, jota nostetaan askeleittain. Jokaisessa nopeudessa kirjataan talteen vääntömomentin jatkuvuustilan oloarvo, jonka taajuusmuuttaja joutuu tuottamaan ylläpitääkseen nopeuden asetusarvon. Nopeusaskeleilla käydään läpi koko aukirullauksen nopeusalue. Testistä saadaan muodostettua taulukko aukirullauksen kulmanopeuden ja dynaamisen kitkan välille. Taulukon pisteistä voidaan laskea dynaamiselle kitkalle funktio käyräsovituksella tai tehdä

pisteparitaulukko ja laskea dynaamisen kitkan vaikutus interpoloimalla. Kuvassa 4.5 on aukirullauksen hoitopuolen taajuusmuuttajalta luetut vääntömomenttiarvot eri nopeuksilla. Pisteistä on laskettu lineaarinen käyräsovitte.



Kuva 4.5 Aukirullauksen kokeellinen kitkatestaus.

Kitkojen yhteisvaikutus on kiinteän kitkan ja kulmanopeudesta riippuvan dynaamisten kitkan summa

$$\tau_{ARkitka} = \tau_{Coulomb} + b_{AR} * \omega_{AR}, \quad (4.3)$$

jossa $\tau_{ARkitka}$ on aukirullauksen kitkakompensoinnin vääntömomentti, $\tau_{Coulomb}$ aukirullauksen lepokitkan kompensointimomentti, b_{AR} on kitkakerroin ja ω_{AR} on aukirullauksen kulmanopeus.

Kiinnirullaus vaikuttaa aukirullaukseen radan kautta vetävänä ratavoimana. Ratanopeuden muutoksissa aukirullauksen hitausmomentti aiheuttaa nopeuden muutosta vastustavan vääntömomentin. Jotta ratakiireys pysyisi tasaisena ratanopeuden muutoksissa, on aukirullauksen hitausmomentin vaikutus kompensoitava vääntömomenttiohjauksessa. Hitausmomentin vaikutus järjestelmään lasketaan pyörimisliikkeen peruslain avulla.

$$\tau = J * \alpha, \quad (4.4)$$

jossa τ on vääntömomentti, J on hitausmomentti ja α on kulmakiikthyvyys.

Aukirullauksen inertiamomentiksi saadaan (Siemens, s. 34).

$$J_{AR} = \frac{\pi}{32} (D_{AR2}^4 - D_{AR1}^4) * w * \rho, \quad (4.5)$$

jossa J_{AR} aukirullattavan rullan inertiamomentti, D_{AR2} on aukirullattavan rullan ulkohalkaisija, D_{AR1} on aukirullattavan rullan hylsyn halkaisija, w on radan halkaisija ja ρ on aukirullattavan rullan tiheys.

Aukirullauksen kulmakiikthyvyys lasketaan ratakiikthyvyydestä jakamalla se aukirullauksen säteellä

$$\alpha_{AR} = \frac{a_{ref}}{\frac{D_{AR2}}{2}}, \quad (4.6)$$

jossa α_{AR} on aukirullauksen kulmakiikthyvyys, a_{ref} on radan kiikthyvyys ja D_{AR2} on aukirullattavan rullan ulkohalkaisija.

Aukirullauksen hitausmomenttiin kompensointiin tarvittava vääntömomentti lasketaan seuraavasti

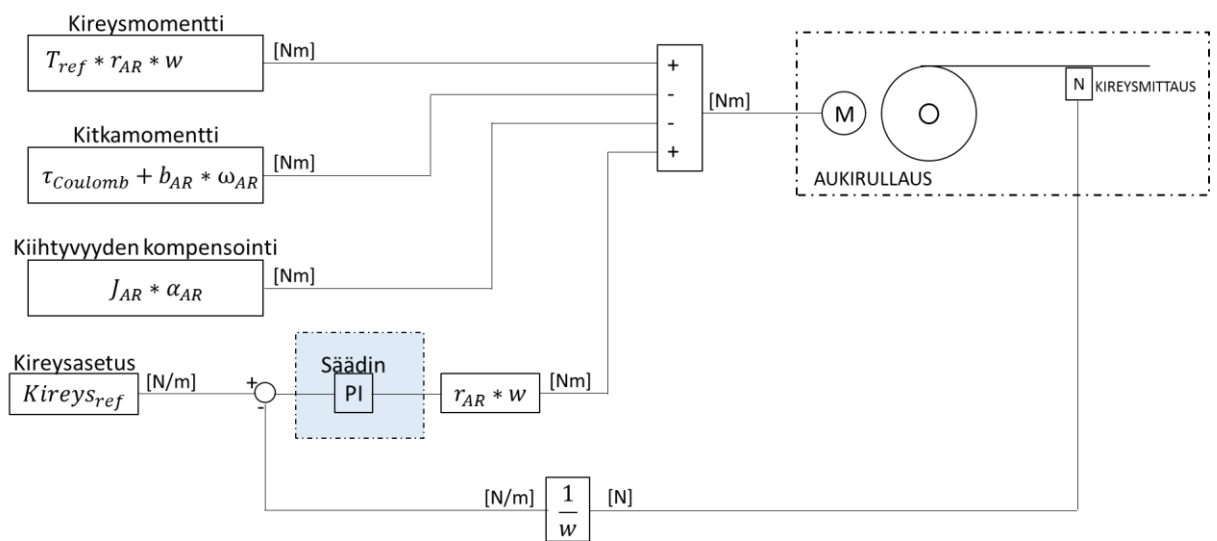
$$\tau_{ARkomp} = (J_{AR} + J_{mek}) * \alpha_{AR}, \quad (4.7)$$

jossa τ_{ARkomp} on aukirullauksen kiikthyvyyden kompensointimomentti ja J_{mek} on aukirullauksen mekaniikan inertiamomentti.

4.2.1 Kireyssäädin

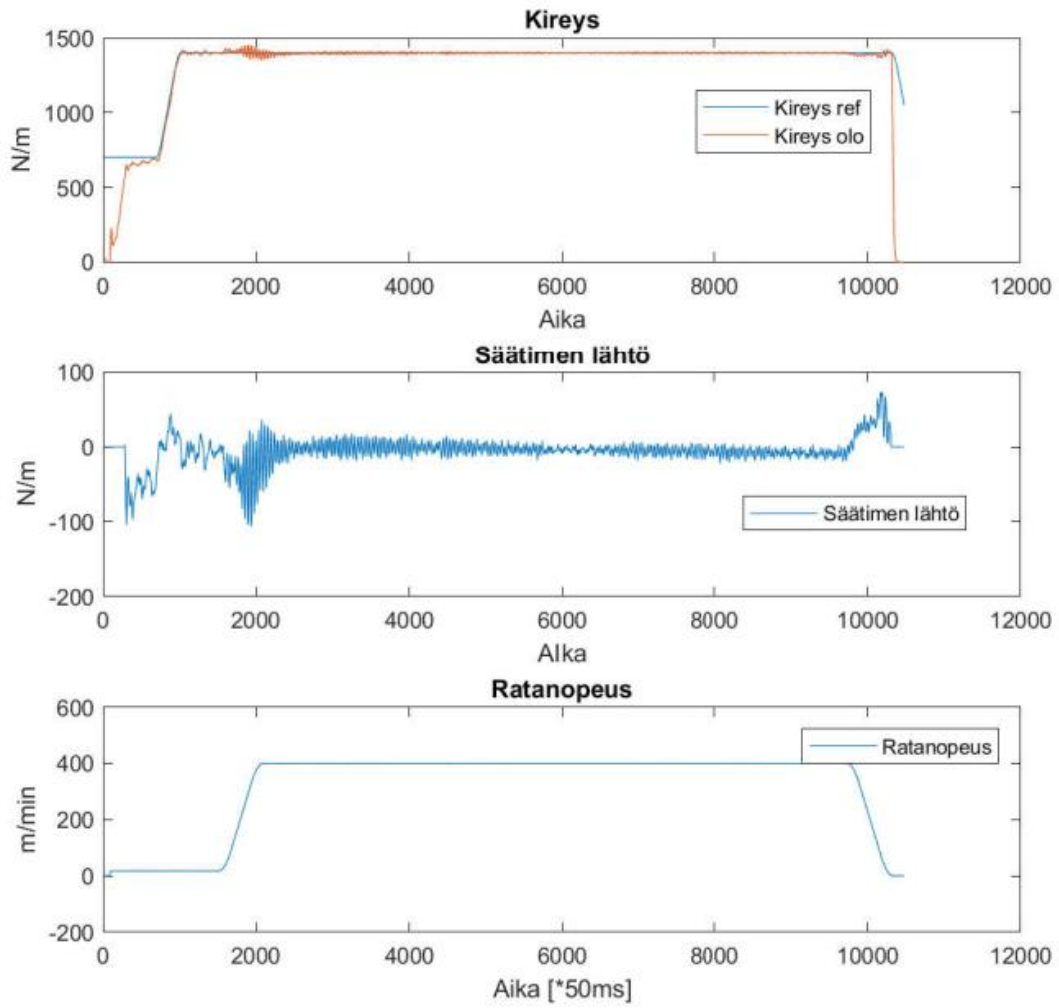
Jälkileikkurilla leikattavissa raaka-aineissa voi olla erittäin paljon variaatioita esimerkiksi dimensioissa ja laatutyypeissä. Kaikkia muuttujia ei voida mallintaa täydellisesti. Tämän takia ratakireyden vääntömomenttiohjaukseen on lisättävä säädin, joka kompensoi mallivirheitä ja muuttuvia olosuhteita. Kuvassa 4.6 on aukirullauksen periaatteellinen

kireydensäätoakaavio. Kireyssäädintä käytetään myötäkytettynä, jonka lähdön yksikkö on N/m. Säätimen viritys on tehtävä kokeellisesti leikkurin käyttöönotossa. Jälkileikkureissa säädinparametrit voidaan valita leikattavan tuotteen mukaan. Kireyssäädin on viritettävä pienen kaistanleveyden omaavaksi, jolloin se kompensoi raaka-aineen laatuvirheistä tai mekaniikan muutoksista johtuvia vaikutuksia. Kireyssäätimellä ei pyritä kompensoimaan nopeita ja jaksollisia häiriöitä. Kireyssäädin saa takaisinkytkennän voima-anturilta, joka on kytketty vapaaseen telaan radalla.



Kuva 4.6 Kireyssäädön periaatekaavio.

Kuvassa 4.7 näkyy säätimen toiminnan mittausarvoja yhdestä tuotannonaikaisesta kiinnirullauksesta. Kuvaajasta nähdään, että säädin korjaa vääntömomenttiohjetta vain ratanopeuden kiihdytyksessä ja hidastuksessa. Kuvaajasta nähdään myös, miten kireyssäädin joutuu korjaamaan vääntömomenttiohjetta ratanopeuden muutoksissa. Tämä kertoo siitä, että rullan hitausmomentin estimaatissa on virhettä. Tasaisella nopeudella säätimen ei tarvitse korjata vääntömomenttiohjetta. Tästä voidaan päätellä, että rata-kireysmomentin ja kitkan kompensoinnin mallintaminen on onnistunut. Säätimen lähdön suurin ohjausarvo on -106.6 N/m, joka on 5.3 % säätimen maksimilähtöarvosta.



Kuva 4.7 Kireyssäätimen toiminta.

Aukirullauksen kokonaismomenttiohje koostuu ratakireyden vääntömomenttiohjeesta, kitkan kompensointimomentista, kiihtyvyyden inertiamomentin kompensoinnista ja kireyssäätimen ohjeesta. Vääntömomenttiohje redusoidaan vaihteen yli

$$\tau_{momref} = \frac{1}{i_{AR}} (\tau_{ref} - \tau_{ARk} - (\tau_{Coulomb} + b_{AR} * \tau_{AR}) - (J_{AR} + J_{mek}) * \alpha_{AR} + u_{out} * \frac{D_{AR}}{2} w), \quad (4.8)$$

jossa τ_{momref} on aukirullauksen vaihteen yli redusoitu vääntömomenttiohje, i_{AR} on aukirullauksen vaihteen suhdeluku ja u_{out} on kireyssäätimen lähtö. Koska aukirullauksessa

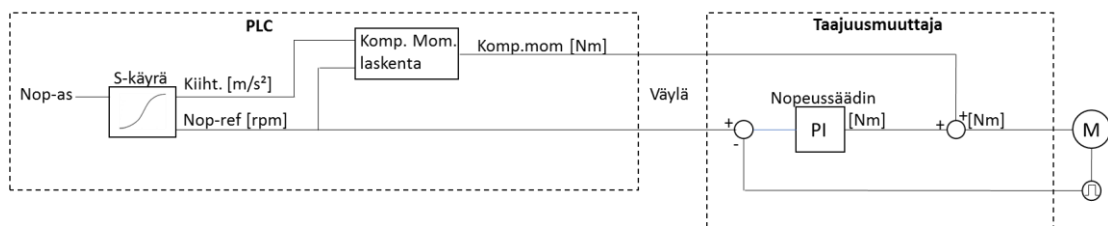
on käyttö- ja hoitopuolella omat moottorit, vääntömomenttiohje jaetaan vielä puoliksi molemmille moottoreille.

4.3 Kiinnirullaus

Kiinnirullaus muodostuu kahdesta kantotelasta, etu- ja takatelasta. Molempia teloja ohjataan erikseen. Takakantotela (TK) toimii koko linjan nopeusisäntänä, eli sen pyörimisnopeussäätö määrittää koko kiinnirullaimen ratanopeuden ja etukantotela (EK) toimii leikkurin käydessä takakantotelan vääntömomenttiorjana. Painotela rullaa vapaasti, eikä sitä oteta huomioon mallinnuksessa.

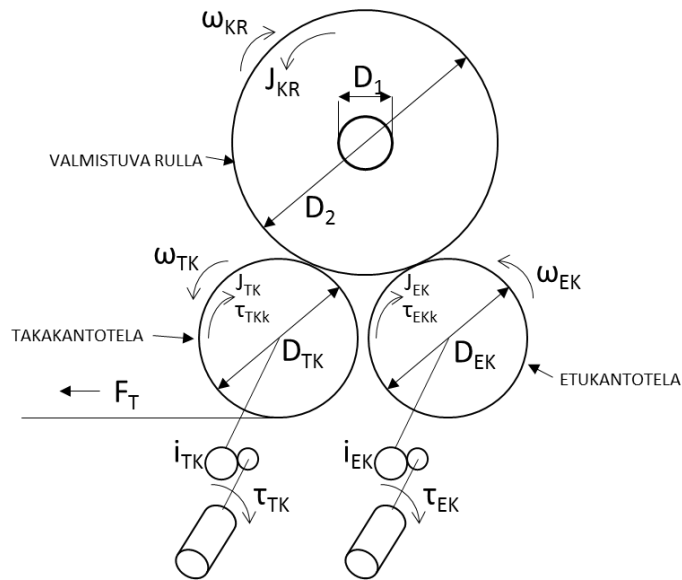
4.3.1 Takakantotela

Takakantotelan taajuusmuuttajan nopeussäätäjä on viritetty ylläpitämään tyhjän kantotelan tasaista nopeutta. Takakantotelaa vaikuttaa kuitenkin muuttuvia voimia, jotka on otettava huomioon ja kompensoitava ohjauksessa. Kompensointivääntömomentti lasketaan leikkurin ohjausjärjestelmässä ja välitetään taajuusmuuttajalle väylän kautta. Kuvassa 4.8 on takakantotelan nopeus- ja vääntömomenttiohjauksen periaatekuva.



Kuva 4.8 Takakantotelan nopeus- ja vääntömomenttiohjauksen periaatekuva.

Valmistuva rulla pyörii etu- ja takakantotelojen päällä ja valmistuvan rullan inertiaääntömomentti ja aukirullauksen ylläpitämä ratavoima vaikuttavat mekaniikan kautta takakantotelan moottorin akselille. Myös kiinteä ja dynaaminen kitka on otettava huomioon. Valmistuvan rullan inertiaääntömomentti jakautuu etu- ja takakantoteloille telojen halkaisijan suhteessa. Valmistuvan rullan inertiaääntömomentti redusoidaan kantoteloille. Kuvassa 4.9 on kiinnirullauksen rakenne.



Kuva 4.9 Kiinnirullauksen rakenne. Kuvassa J_{TK} on Takakantotelan inertia ja J_{EK} on etukantotelan inertia.

Valmistuvan rullan inertiamomentti lasketaan seuraavasti

$$J_{KR} = \frac{\pi}{32} (D_2^4 - D_1^4) * w * \rho, \quad (4.9)$$

jossa J_{KR} on valmistuvan rullan inertiamomentti, D_2 on valmistuvan rullan ulkohalkaisija, D_1 on hylsyn halkaisija, w on radan halkaisija ja ρ on rullattavan materiaalin tiheys.

Valmistuvan rullan halkaisija D_2 ja takanantotelan halkaisijan D_{TK} suhde toimii laskennassa vaihteena. Valmistuvan rullan inertiamomentti redusoidaan vaihteen yli ja jaetaan kantoteloille telojen halkaisijoiden suhteen.

$$J_{KRr} = J_{KR} * \left(\frac{D_{TK}}{D_2} \right)^2 * \frac{D_{TK}}{D_{TK} + D_{EK}} \quad (4.10)$$

jossa J_{KRr} on valmistuvan rullan vaihteen yli redusoitu inertiamomentti, D_{TK} on takakantotelan halkaisija, D_2 on valmistuvan rullan ulkohalkaisija ja D_{EK} on etukantotelan halkaisija.

Takakantotelan kokonaishitausmomentti koostuu valmistuvan rullan kantotelalle redusoidusta hitausmomentista ja kantotelan omasta hitausmomentista. Kantotelan hitausmomentti on konevalmistajan antama parametri. Kokonaismomentti lasketaan seuraavasti

$$J_{TKtot} = J_{KRr} + J_{KT}, \quad (4.11)$$

jossa J_{TKtot} on takakantotelan kokonaisinertiamomentti, J_{KRr} on valmistuvan rullan vaihteen yli redusoitu inertiamomentti ja J_{KT} on takakantotelan telan ja mekaniikan inertiamomentti.

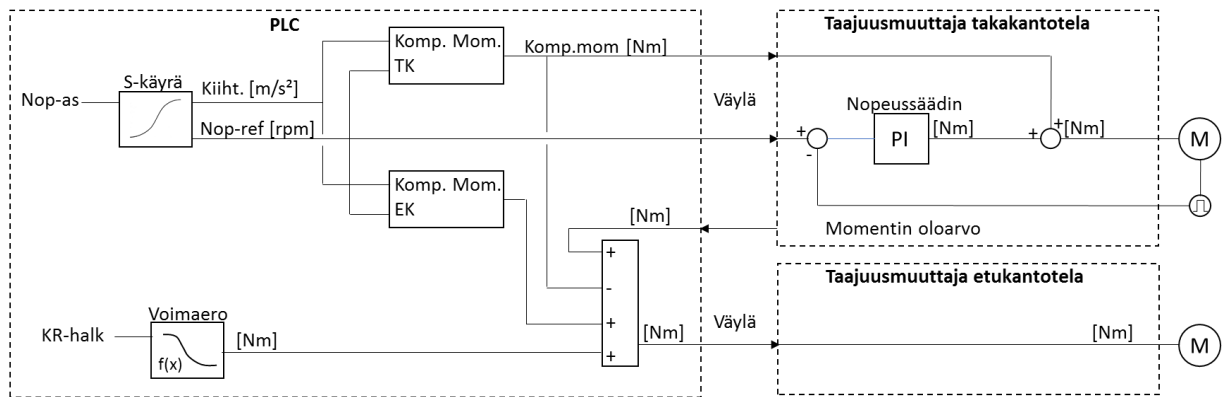
Takakantotelan kompensointimomentti koostuu takakantotelan kokonaishitausmomentista ja kulmakiihtyvyydestä, takakantotelan kiinteästä kitkasta, kulmanopeudesta riippuvasta dynaamisesta kitkasta ja ratavoiman aiheuttamasta vääntömomentista. Ratavoima vaikuttaa kantotelaa kantotelan halkaisijan suhteen. Kompensointimomentti redusoidaan vaihteen yli moottorin akselille. Takakantotelan kompensointimomentin laskenta ja redusointi vaihteen yli moottorin akselille lasketaan seuraavasti

$$\tau_{TKmomref} = \frac{1}{i_{TK}} \left(\alpha_{TK} * J_{TKtot} + \tau_{TKCoulomb} + b_{TK} * \omega_{TK} + F_T * \frac{D_{TK}}{2} * k_{TK} \right), \quad (4.12)$$

jossa $\tau_{TKmomref}$ on takakantotelan vaihteen yli redusoitu vääntömomenttiohje, i_{TK} on takakantotelan vaihteen suhdeluku, α_{TK} takakantotelan kulmanopeus, $\tau_{TKCoulomb}$ on takakantotelan lepokitka, b_{TK} on takakantotelan kitkakerroin, ω_{TK} on takakantotelan kulmanopeus, F_T on ratavoiman vaikutus ja k_{TK} ratakireyden vaikutuskerroin. Vaikutuskertoimella määritellään ratakireyden vaikutus takantotelalle. Jos ratakireyden vaikutus halutaan jakaa tasaisesti molemmille kantoteloille, kertoimen arvo on 0.5.

4.3.2 Etukantotela

Valmistuvan rullan kireys muodostetaan etu- ja takakantotelojen välisellä vääntömomenttieroilla. Mitä suuremmalla vääntömomentilla etukantotela vetää suhteessa takakantotelaa, sitä kireämpi valmistuvasta rullasta tulee. Valmistuvan rullan kireys määritellään rullausvoiman parametrilla. Kuvassa 4.10 on etukantotelan vääntömomenttisäädön periaatekuva. Rullausvoima on kantotelojen välinen vääntömomenttiero suhteessa valmistuvan rullan leveyteen. Rullausvoima on tuotekohtainen ohje, joka annetaan valmistuvan rullan halkaisijan funktiona.



Kuva 4.10 Etukantotelan nopeus- ja vääntömomenttiohjauksen periaatekuva.

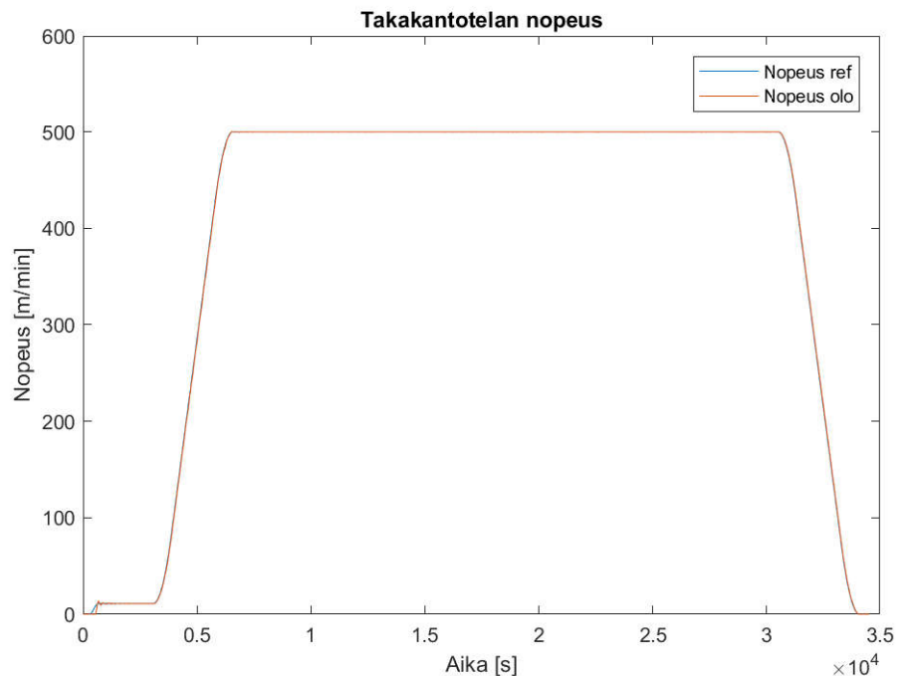
Etukantotelaa ohjataan vääntömomenttisäädöllä. Vääntömomenttiohje muodostetaan lisäämällä voimaeron vaatima vääntömomentti takakantotelan vääntömomentin oloarvoon, joka luetaan väylän kautta takakantotelan taajuusmuuttajalta. Vääntömomenttiohjeeseen on myös lisättävä valmistuvan rullan etukantotelalle redusoitu hitausmomentti, joka lasketaan samalla tavalla kuin takakantotelalle yhtälöt (4.11) ja (4.12), takakantotelan hitausmomentti ja kulmanopeudesta riippuva dynaaminen kitka. Takakantotelan kompensointivääntömomentti pitää vähentää etukantotelan vääntömomenttiohjeesta, jottei etukantotelan vääntömomenttiohjeeseen kertaudu myös takakantotelan kompensointivääntömomentti. Etukantotelan vääntömomenttiohje muodostetaan seuraavasti.

$$\tau_{EKmomref} = \frac{1}{i_{EK}} (\tau_{TKolo} + \tau_{VOIMAERO} + \alpha_{EK} * J_{EKtot} + \tau_{EKCoulomb} + b_{EK} * \omega_{EK} - \tau_{TK}), \quad (4.13)$$

jossa $\tau_{EKmomref}$ on etukantotelan vaihteen yli redusoitu vääntömomenttiohje, τ_{TKolo} on takakantotelan vääntömomentti oloarvo, $\tau_{VOIMAERO}$ on rullausvoima, J_{EKtot} etukantotelan kokonaisinertia, i_{EK} on etukantotelan vaihteen suhdeluku, α_{EK} etukantotelan kulmanopeus, $\tau_{EKCoulomb}$ on etukantotelan lepokitka, b_{EK} on etukantotelan kitkakerroin ja ω_{EK} on etukantotelan kulmanopeus.

4.4 Kiinnirullauksen mallin yksinkertaistaminen

Kuvassa 4.11 näkyy todellisesta tuotantotilanteesta mitattu takakantotelan nopeusreferenssi ja nopeuden takaisinkytkentä. Referenssi on ohjausjärjestelmän s-liikkeenohjausprofiilin laskema nopeus, joka lähetetään väylän kautta takakantotelan taajuusmuuttajalle. Nopeuden oloarvo luetaan taajuusmuuttajalta väylän kautta ohjausjärjestelmään. Taajuusmuuttaja lukee nopeutta pulssianturilta, joka on kytketty moottorin akselille. Kuvaajasta nähdään, että takakantotela seuraa nopeusreferenssiä lähes täydellisesti. Aukirullauksen mallintamisessa kiinnirullausta voidaan käsitellä komponenttina, joka tuottaa ideaalisesti halutun ratanopeuden.



Kuva 4.11 Takakantotelan nopeusohje ja nopeusoloarvo.

4.5 Halkaisijoiden laskenta

Jälkileikkurin rullien halkaisijat lasketaan moottoreiden akseleihin kytkettyjen pulssianturiarvojen perusteella. Simulointimallissa halkaisijoiden oloarvot on määriteltävä laskennallisesti. Aukirullauksen säteelle r_{ARolo} saadaan

$$r_{ARolo} = r_{ARalku} - \int_0^{\Delta t} \omega_{AR}(t) \frac{h}{2*\pi}, \quad (4.14)$$

jossa r_{ARalku} on aukirullauksen säde alussa, h on radan paksuus ja ω_{AR} on aukirullauksen kulmanopeus (Boulter, s. 39). Kiinnirullauksen säteelle r_{KRolo} saadaan.

$$r_{KRolo} = r_{KRalku} + \int_0^{\Delta t} \omega_{KR}(t) \frac{h}{2*\pi}, \quad (4.15)$$

jossa r_{KRalku} on kiinnirullauksen säde alussa ja ω_{KR} on kiinnirullauksen kulmanopeus.

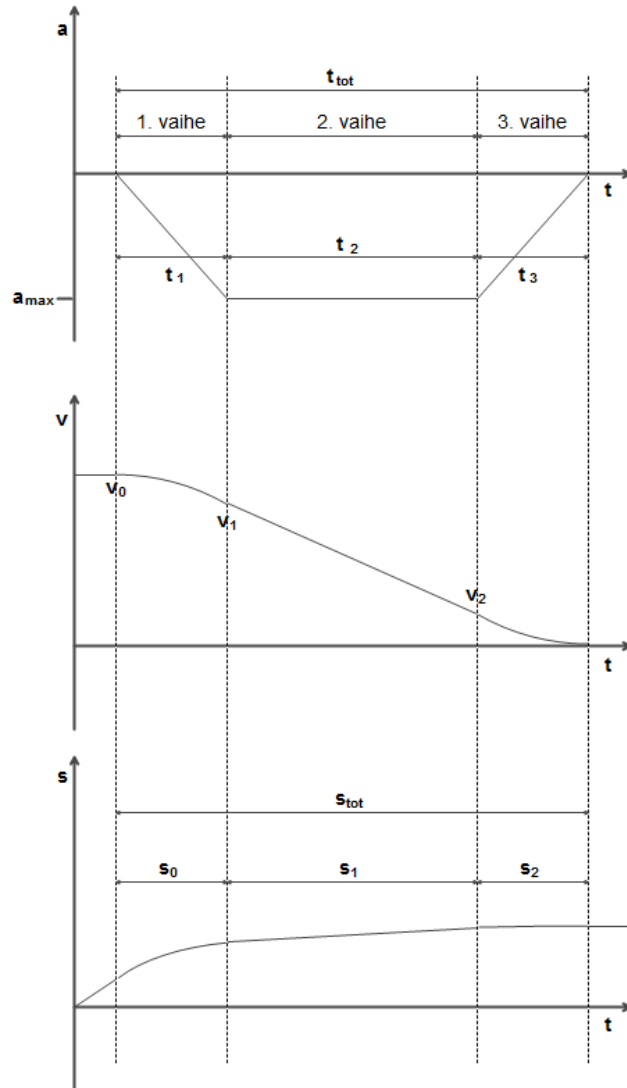
4.6 Määräpysäytykset

Pituusleikkurissa valmistuva rulla pyritään ajamaan tiettyyn loppuhalkaisijaan tai metrimäärään. Määräpysäytystapa ja pituus- tai halkaisijatavoite ovat tuotekohtaisia parametrejä. Määräpysäytys vaatii toimivan linjakäyttöjen ohjauksen. Ratakireyden huojunta tai telojen luistaminen aiheuttavat heittoa pysäytyspaikan laskentaan. Myös ohjausjärjestelmän komponentit, pulssianturit ja pulssinluku järjestelmään on mitoitettava oikein. Jos asiakasrulliin tulee toleranssivaatimuksia isompia heittoa, tuotteesta voi tulla sekundalaatua.

4.6.1 Pysäytysmatkan laskenta

Ratanopeuden kiihdytys ja hidastus tapahtuu kappaleessa 4.1 kuvatulla tavalla. Määräpysäytyksessä on laskettava pysäytysmatka, jonka rata kulkee sen hetkisestä ratanopeudesta nollanopeuteen. Ratanopeuden hidastus voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Kuvassa 4.12 on kuvattu ratanopeuden hidastuksen kiihtyvyyden, nopeuden ja matkan kuvaajat. Vaiheessa 1, kiihtyvyys muuttuu nollakihtyvyydestä minimiarvoonsa. Vaiheessa

2, kiihtyvyys on minimiarvossaan. Vaiheessa 3, kiihtyvyys muuttuu minimikihtyvyydestä nolllakiihtyvyyteen.



Kuva 4.12 Ratanopeuden hidastuksen kiihtyvyyden- nopeuden- ja matkan kuvaajat.

Pysähtymisaika tasaisesta nopeudesta tavoitenopeuteen lasketaan seuraavasti

$$t_{tot} = \frac{v_0 - v_{ref}}{a_{max}} + \frac{t_1 + t_3}{2}, \quad (4.16)$$

jossa t_{tot} on pysähtymiseen tarvittava kokonaisaika, v_0 ja v_{ref} ovat ratanopeuden alkuarvo ja tavoitenopeus, t_1 ja t_3 ovat vaiheen 1 ja 3 pyöristysarvot.

Radan kulkema matka 1. vaiheessa lasketaan seuraavasti

$$v_1 = v_0 - \iint_0^{t_1} \frac{a_{max}}{t_1} dt, \quad (4.17)$$

$$s_1 = \int_0^{t_1} v_0 dt - \iiint_0^{t_1} \frac{a_{max}}{t_1} dt, \quad (4.18)$$

jossa v_1 on ratanopeus 1. vaiheen jälkeen, t_1 on 1. vaiheen pyöristysarvo, a_{max} on maksimi kiihtyvyys ja s_1 on radan kulkema matka 1. vaiheessa.

Radan kulkema matka 2. vaiheessa lasketaan seuraavasti

$$t_2 = t_{tot} - t_1 - t_3, \quad (4.19)$$

$$v_2 = v_1 - \int_0^{t_2} a_{max} dt, \quad (4.20)$$

$$s_2 = \int_0^{t_2} v_1 dt - \iint_0^{t_2} a_{max} dt, \quad (4.21)$$

jossa t_2 on 2. vaiheen kesto, t_{tot} on pysähtymiseen tarvittava kokonaisaika, t_1 ja t_3 ovat vaiheen 1 ja 3 pyöristysarvot, v_2 on ratanopeus 2. vaiheen jälkeen, on maksimi kiihtyvyys ja s_2 on radan kulkema matka 2. vaiheessa.

Radan kulkema matka 3. vaiheessa lasketaan seuraavasti

$$s_3 = \int_0^{t_3} v_2 dt - \iiint_0^{t_3} \frac{a_{max}}{t_3} dt, \quad (4.22)$$

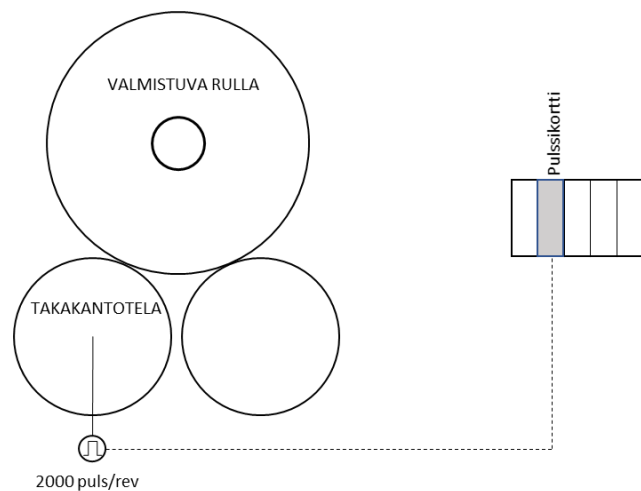
jossa s_3 on radan kulkema matka 3. vaiheessa, v_2 on ratanopeus 2. vaiheen jälkeen, t_3 on 3. vaiheen pyöristysarvo ja a_{max} on maksimi kiihtyvyys.

Kokonaispysäytymismatka s_{tot} saadaan laskemalla vaiheiden 1, 2 ja 3 matkat yhteen,

$$s_{tot} = s_1 + s_2 + s_3. \quad (4.23)$$

4.6.2 Kiinnirullauksen tavoitepituus

Tavoitepituuden mukaan pysäytyksessä rata pysäytetään pituusmittauksen ja pysäytykseen tarvittavan pysäytysmatkan mukaan. Pituusmittaus tehdään takakantotelan akseliin asennetulla pulssianturilla, joka luetaan logiikkaan pulssilukukortilla. Kuvassa 4.13 on kuvattu kiinnirullauksen pituusmittauksen laskennassa käytettävä pulssianturi.



Kuva 4.13 Kiinnirullauksen pituusmittauksen pulssianturi.

4.6.3 Kiinnirullauksen tavoitehalkaisija

Tavoitehalkaisijan mukaan pysäytyksessä rata pysäytetään pituusmittauksen ja pysäytykseen tarvittavan pysäytysmatkan mukaan. Lisäksi on estimoitava, kuinka paljon kiinnirullaukseen täytyy ajaa kartonkia, jotta tavoitehalkaisija täyttyy. Jos raaka-aineen tiheys ja neliöpainon estimaatit ovat tiedossa, voidaan kiinnirullauksen tavoitehalkaisijaan tarvittava metrimäärä estimoida seuraavasti

$$l_{KR} = \frac{(D_{ref}^2 - D_{KR1}^2) * \rho * \pi}{\rho_A * 4}, \quad (4.23)$$

jossa l_{KR} on kiinnirullauksen tavoitehalkaisijaan tarvittava metrimäärä, D_{ref} on kiinnirullauksen tavoitehalkaisija, D_{KR1} on hylsyn halkaisija, ρ kartongin tiheys ja ρ_A on kartongin neliöpaino.

Jos raaka-aineen tiheyden tai neliöpainon estimaatit poikkeavat paljon todellisista arvoista, tavoitehalkaisijan laskennasta saadaan virheellisiä arvoja. Vaihtoehtona on käyttää tavoitelaskennassa radan paksuutta. Paksuus voidaan laskea leikkurin pituus- ja halkaisijamittausten perusteella. Radan paksuun lasketaan seuraavasti

$$h = \frac{(D_{olo}^2 - D_0^2) * \rho * \pi}{l * 4}, \quad (4.24)$$

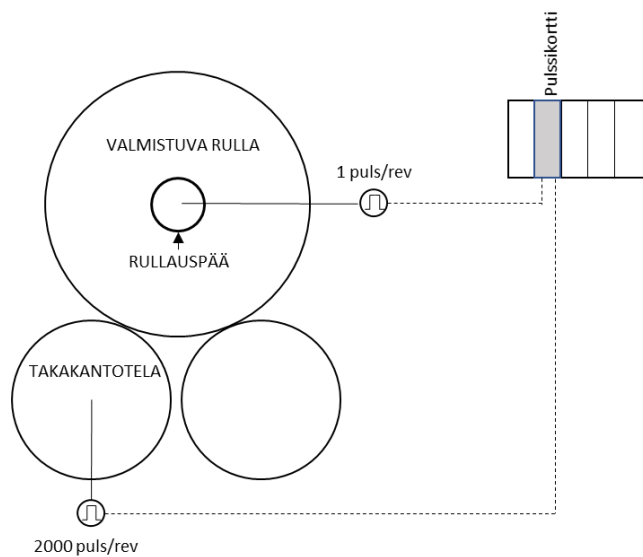
jossa h on radan paksuus, D_{olo} on kiinnirullauksen halkaisijan oloarvo, D_0 on kiinnirullauksen halkaisijan rullauksen alussa ja ρ kartongin tiheys. Paperin paksuuden avulla kiinnirullauksen tavoitehalkaisijaan tarvittava metrimäärä lasketaan seuraavasti

$$l_{KR} = \frac{(D_{ref}^2 - D_{KR1}^2) * \pi}{h * 4}, \quad (4.25)$$

jossa l_{KR} on kiinnirullauksen tavoitehalkaisijaan tarvittava metrimäärä, D_{ref} on kiinnirullauksen tavoitehalkaisija, D_{KR1} on hylsyn halkaisija ja h on radan paksuus.

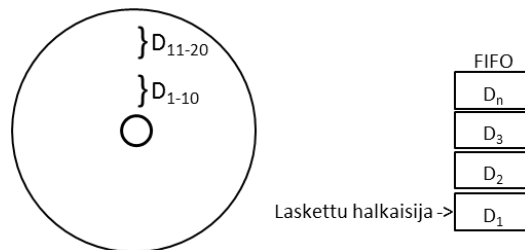
Radanpaksuus laskettuna yhtälöllä (4.24) ei ota huomioon radan paksuuden on muutoksia. Leikattavassa materiaalissa saattaa olla huomattavia eroja pituussuuntaisessa paksuudessa, jos raaka-aine on ”lajinvaihtolaatua” tai sekundaa. Paksuusmuutokset voidaan ottaa

huomion laskemalla kiinnirullauksen halkaisijaa jokaisella kiinnirullauksen kierroksella ja tallettamalla halkaisijan FIFO (first in – first out) siirtorekisteriin. Kuvassa 4.14 on kuvattu kiinnirullaushalkaisijan laskennassa käytettävät pulssianturit. Takakantotelan akseli ja rullauspää ovat varustettu pulssiantureilla. Molemmat pulssianturit ovat kytketty samalle pulssilukukortille. Jokaisella rullauspään kierrospulssilla takakantotelan pulssimäärä otetaan talteen ja nollataan. Luetun pulssimäärän perusteella lasketaan kiinnirullaushalkaisija, joka tallennetaan FIFO siirtorekisteriin ensimmäiseen paikkaan D_1 .



Kuva 4.14 Kiinnirullauksen halkaisijanmittauksen pulssianturit.

Kiinnirullauksen halkaisijoiden FIFO rekisterin arvoista voidaan laskea radan paksuus D_{1-10} ja D_{11-20} keskiarvojen erotuksesta.



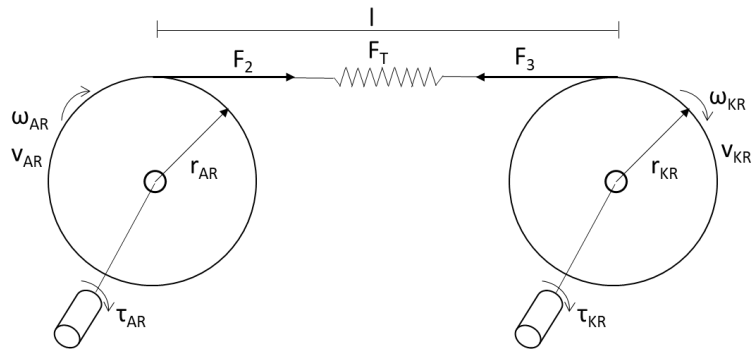
Kuva 4.15 Kiinnirullaushalkaisijoiden FIFO rekisteri.

5 SIMULOINTIMALLI

Tässä kappaleessa muodostetaan lohkokaavioesitys auki- ja kiinnirullauksesta ja niiden välisestä joustavasta kartonkiradasta. Esityksessä on myös mukana aukirullauksen hitausmomentin ja kitkojen kompensointi ja kireyssäädin. Lohkokaavioesityksen mukaista mallia simuloidaan Simulink:llä. Lohkokaavion toiminnot perustuvat kappaleessa 4 esitettyihin yhtälöihin. Simulointimallissa on järjestelmän dynamiikkaa yksinkertaistettu soveltuvin osin.

5.1 Auki- ja kiinnirullauspari

Auki- ja kiinnirullausta voidaan käsitellä kahden inertiaan systeeminä, jotka on kytketty toisiinsa joustavan radan välityksellä. Kuvassa 5.1 F_2 ja F_3 ovat ratakiireyttä kuvaavia voimia, F_T on kartongin kireysvoima, v_{AR} ja v_{KR} ovat rullien kehänopeudet ja l on kartonkiradan pituus telaparin välissä.



Kuva 5.1. Auki- ja kiinnirullauksen muodostama inertiaari, jotka ovat yhdistetty toisiinsa joustavalla radalla.

Aukirullaukselle voidaan kirjoittaa liikeyhtälö

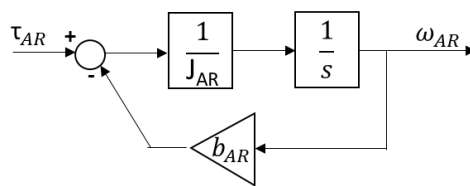
$$J_{AR} \frac{d\omega_{AR}}{dt} = \tau_{AR} - b_{AR}\omega_{AR} + F_2 r_{AR}. \quad (5.1)$$

Kiinnirullaukselle voidaan kirjoittaa liikeyhtälö

$$J_{KR} \frac{d\omega_{KR}}{dt} = \tau_{KR} - b_{KR}\omega_{KR} - F_3 r_{KR}. \quad (5.2)$$

5.2 Aukirullauksen mekaniikan lohkokkaavio

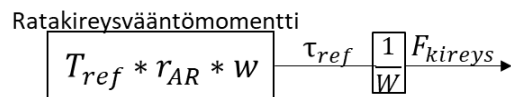
Aukirullaimen mekaniikka voidaan mallintaa ensimmäisen asteen siirtofunktiolla, jossa on mukana aukirullaimen kokonaishitausmomentti ja kitka. Dynamiikasta voidaan muodostaa kuvan 5.2 mukainen lohkokkaavio. Kuvassa τ_{AR} on aukirullaimelle menevä vääntömomentti, J_{AR} on aukirullaimen hitausmomentti, b_{AR} on aukirullaimen kitkakerroin ja ω_{AR} on aukirullaimen kulmanopeus.



Kuva 5.2. Aukirullaimen simulointilohkokkaavio.

5.3 Ratakireys

Kuten kappaleessa 2.10 on kuvattu, leikkurin rata on aina seisontakireydessä ennen tuotannon käynnistämistä. Ratakireyttä pidetään yllä myös nolllanopeudella. Kun leikkuri on käynnistetty, ratakireys nostetaan tuotantokireyteen. Ratakireysohjeen mukainen kireysvääntömomentti on aina mukana aukirullauksen kokonaisvääntömomenttiohjeessa. Ratakireysvääntömomentti ja kireysratavoima F_{kireys} voidaan simuloida kuvassa 5.3 esitetyllä lohkokkaaviolla.

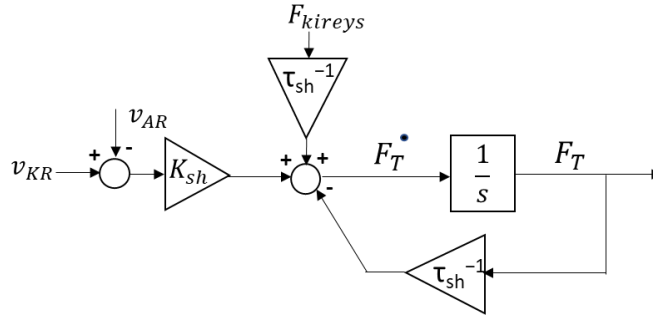


Kuva 5.3. Ratakireysvääntömomentin ja ratakireysvoiman simulointilohkokkaavio.

5.4 Kartonkiradan mallinnus ja lohkokkaavio

Joustavaa kartonkirataa voidaan mallintaa radan jousivakion K_{sh} ja radan aikavakion τ_{sh} avulla. Ratavoima muodostuu aukirullauksen ja kiinnirullauksen kehänopeuksien erosta ja ulkopuolisesta ratavoimasta (Ramirez ym. 2014, s. 1679). Ulkopuolinen ratavoima, joka on aukirullauksen ratakireysvääntömomentin muodostama, syötetään kartonkiradan malliin

myötäkytkentäarvona. Kartonkiradan dynamiikkaa voidaan simuloida kuvassa 5.4 esitetyllä lohkokaaviolla. Kuvassa v_{AR} ja v_{KR} ovat kuvassa 5.1 esitetyn telaparin kehänopeudet. F_T on ratavoima, joka vaikuttaa telapariin.



Kuva 5.4. Ratavoiman dynamiikan simulointilohkokaavio.

Radan jousivakio lasketaan seuraavasti

$$K_{sh} = \frac{AE}{l}, \quad (5.3)$$

jossa A on radan poikkipinta-ala ja E on kartongin kimmokerroin.

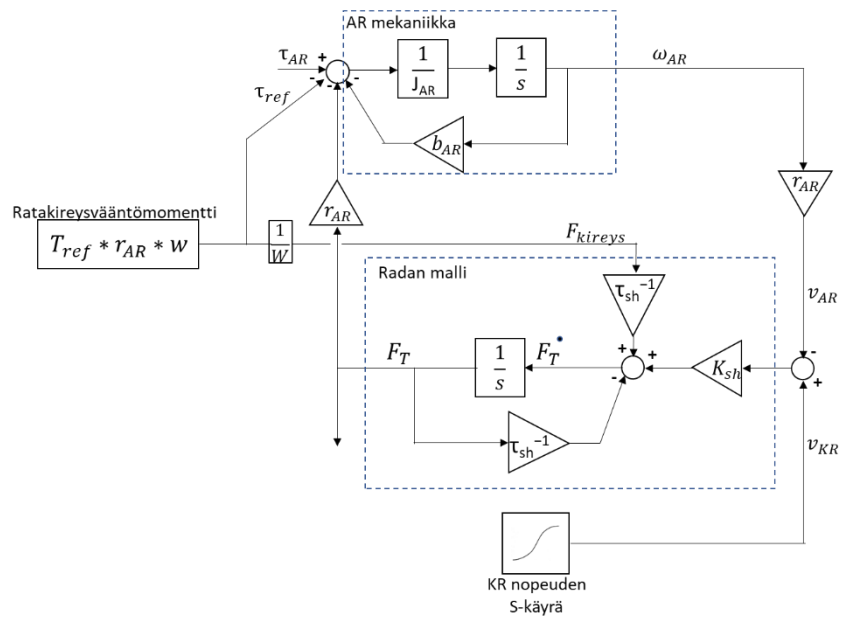
Radan aikavakio lasketaan seuraavasti

$$\tau_{sh} = \frac{l}{v_0}, \quad (5.4)$$

jossa v_0 on ratanopeus toimintapisteessä. Tässä työssä oletetaan, että radan jousivakio pysyy vakiona. Oletetaan myös, että nopeus $v_0 = 10$ m/s.

5.5 Yhdistetty malli

Kuvassa 5.5. on esitetty yhdistetty malli aukirullauksen mekaniikan, radan mallin ja ratakireysvääntömomentin lohkokaavioista. Järjestelmän mallissa kiinnirullaus voidaan olettaa toimivan ideaalisena systeeminä, joka tuottaa tarkasti referenssin mukaisen ratanopeuden kuten kuvaajasta 4.11 voidaan havaita. Ratakireysvääntömomentti ja sen tuottama ratakireys voidaan syöttää malliin ulkopuolisena voimana (Ramirez ym. 2014, s. 1680). Ratakireysvääntömomentti, joka muodostaa radan malliin syötettävän ratakireysvoiman, kompensoidaan pois aukirullauksen vääntömomenttiohjeesta.



Kuva 5.5. Yhdistetty aukirullauksen ja joustavan kartonkiradan dynamiikka.

6 SIMULOINTI- JA MITTAUSTULOKSET

Tässä kappaleessa esitetään simulointi- ja mittaustulokset sekä tarkastellaan mallinnuksen vastaavuutta. Jälkileikkurin aukirullauksen käyttöä ohjataan kappaleessa 4.2 esitetyn mallin mukaisesti. Myös simulointimalli on rakennettu mallinnuksen perusteella. Kappaleen aluksi esitellään simulointimallilla suoritettuja testauksia, jonka jälkeen esitellään leikkurilla tehtyjä mittaustuloksia. Lopuksi arvioidaan mallin vastaavuutta todellisen systeemin kanssa.

6.1 Simulointimalli

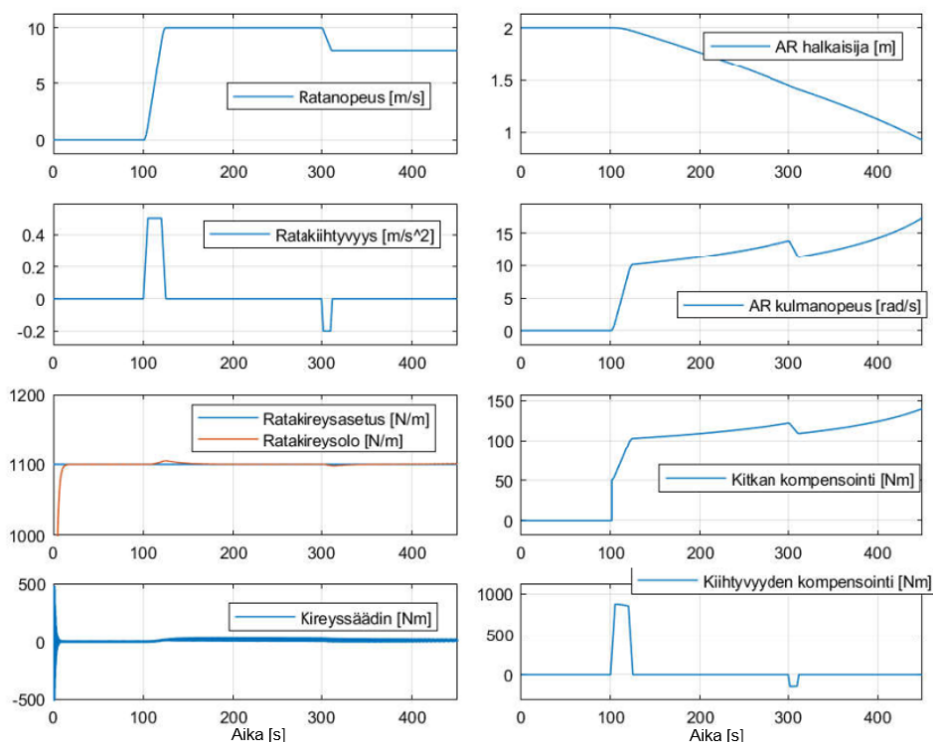
Simulointimallin simuloinnit on toteutettu Simulink-ohjelmistolla. Taulukossa 6.1 on esitetty parametrit, joita simulointimallissa käytetään.

Taulukko 6.1 aukirullauksen simuloinnissa käytetyt parametrit

Parametri	Arvo
Kireyssäätimen vahvistus K_p	1.5
Kireyssäätimen vahvistus K_i [s]	10
Kartongin tiheys ρ	800 kg/m ³
Kartongin kimmomoduuli E	7.5 Mpa
Aukirullaimen Mekaanikan inertia J_{mek}	84.3 kgm ²
Aukirullauksen lepokitka $\tau_{Coulomb}$	50 Nm
Aukirullauksen kitkakerroin b_{AR}	5.152 Nms/rad
Rataleveys w	2.13 m
Radan paksuus h	0.2 mm
Aukirullauksen ja kiinnirullauksen etäisyys l	7 m

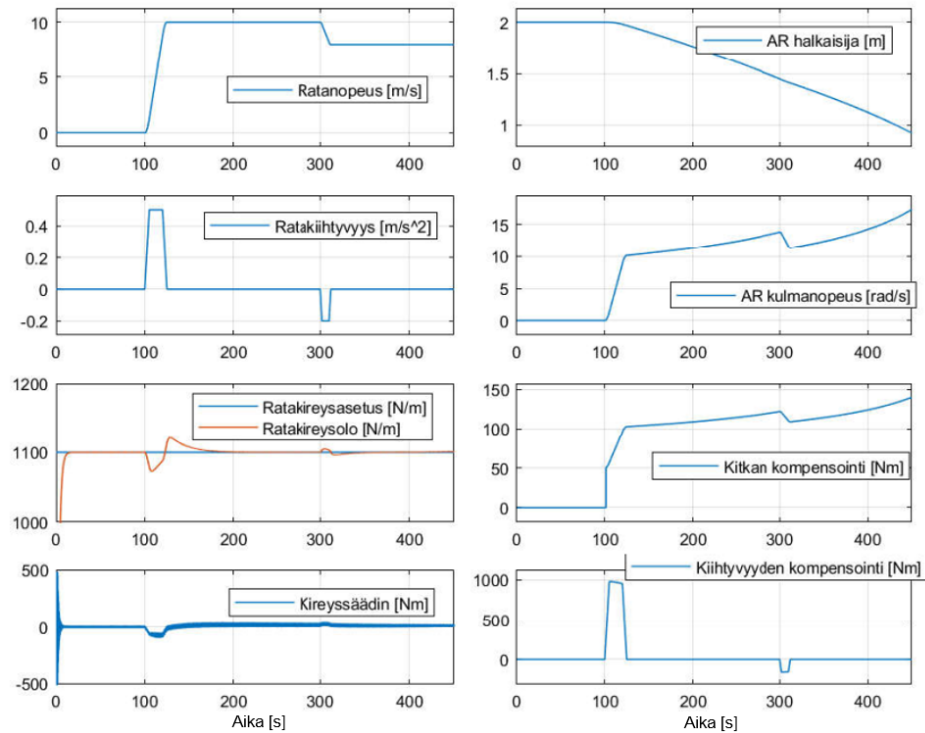
Kuvassa 6.1 on esitetty yksi simulointimallilla ajettu aukirullaustapahtuma taulukossa 6.1 esitetyillä lähtöarvoilla. Simuloinnissa raaka-ainerullan tiheyden ja kitkan estimaatit vastaavat täydellisesti todellisia arvoja. Aluksi rata on ollut kireys päällä nollanopeudella, jonka jälkeen ratanopeutta on alettu kasvattamaan hetkellä 100 s s-liikkeenohjausprofiililla nopeuteen 10 m/s. Tasaisen ratanopeuden jälkeen ratanopeutta on aloitettu pienentämään hetkellä 300 s nopeuteen 8 m/s, jolla on jatkettu kunnes aukirullauksen halkaisija on

saavuttanut rullan hylsyn halkaisijan. Simuloinnin ratakireysasetus on koko simuloinnin ajan 1100 N/m. Kuvassa 6.1 on esitetty ratanopeus [m/s], ratakiihtyvyys [m/s²], ratakireuden asetusarvo [N/m] ja oloarvo [N/m], kireyssäätimen ulostulo [Nm], aukirullauksen halkaisija [m], aukirullauksen kulmanopeus [rad/s], kitkan kompensoinnin vääntömomentti [Nm] ja kiihtyvyyden kompensoinnin vääntömomentti [Nm].



Kuva 6.1 Simuloitu aukirullaustapahtuma, jossa ratakiihtyvyyden ja kitkan vaikutukset ovat täydellisesti kompensoituja.

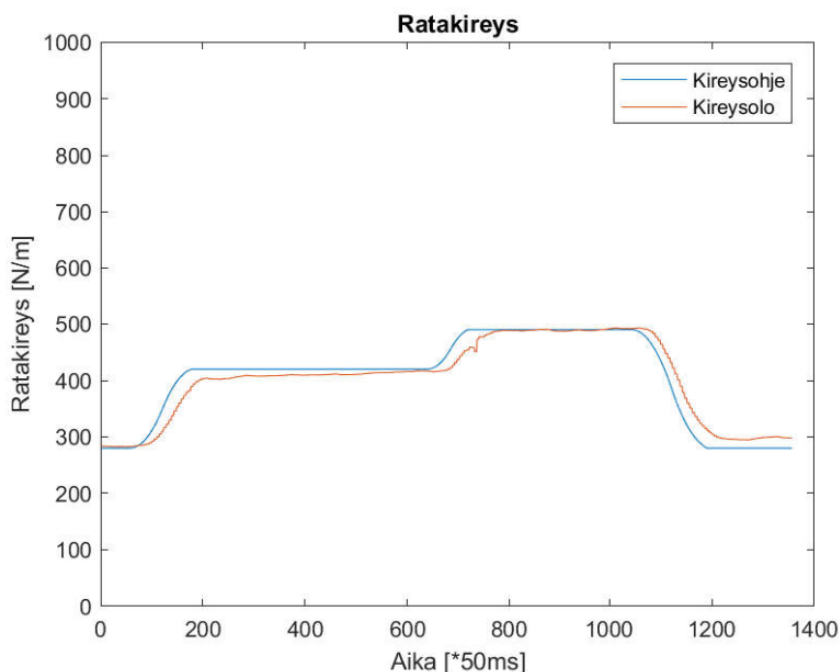
Kuvassa 6.2 on esitetty aukirullaustapahtuma muuten samoilla lähtöarvoilla ja parametreilla kuin kuvassa 6.1, mutta raaka-ainerullan tiheyden estimaatti on 900 kg/m³. Kuvasta 6.2 havaitaan, että kireyssäädin joutuu korjaamaan aukirullauksen vääntömomenttiohjetta ratanopeuden muutoksissa. Todellisen tiheyden ja sen estimaatin poikkeama aiheuttaa väärän suuruisen kiihtyvyyden kompensointivääntömomenttiin, joka taas aiheuttaa poikkeaman ratakiireyteen. Tiheyden väärä estimaattiarvo vaikuttaa enemmän ratakiireyteen ratanopeuden muutoksessa hetkellä 100 s kuin hetkellä 300 s, koska hetkellä 300 s aukirullauksen inertia on pienempi aukirullauksen pienemmän halkaisijan myötä.



Kuva 6.2 Simuloitu aukirullaustapahtuma, jossa tiheyden estimaatti on suurempi kuin todellinen.

6.2 Testaukset jälkileikkurilla

Kuvan 6.3 mittausjärjestelyssä leikkurin kartonkirata on ollut paikallaan ja kiinnirullauksen telojen jarrut ovat olleet lukittuina. Aukirullauksen käyttöjä on ohjattu vääntömomenttisäädöllä. Ratakireyden PI-säädin ei ole ollut aktiivisena. Kuvassa on esitetty kuinka ratakireyden oloarvo seuraa asetusarvoa. Asetusarvosta [N/m] lasketaan vääntömomenttiohje [Nm] aukirullauksen käytöille aukirullauksen halkaisijan, ratalevyden ja vaihteen perusteella. Ratakireyden asetusarvo on rampitettu s-liikkeenohjausprofiililla.

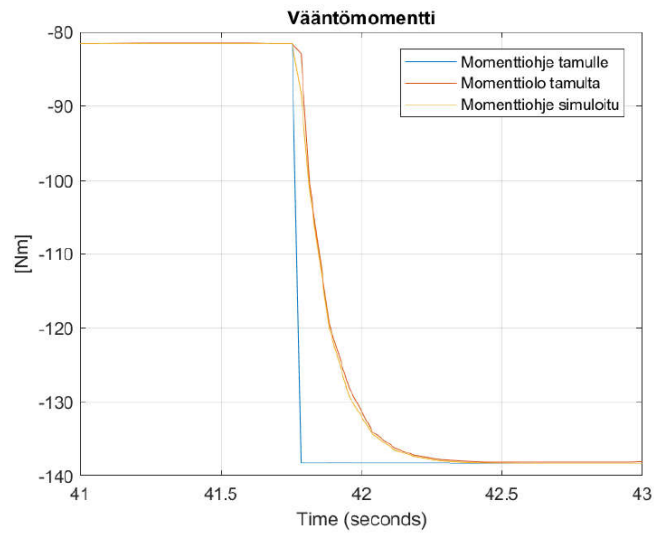


Kuva 6.3 Ratakireyden asetusarvo ja mitattu oloarvo vääntömomenttisäädöllä.

Kuvasta 6.3 huomataan, että ratakireysasetuksesta lasketulla vääntömomenttiohjeella päästään melko hyvin asetettuun kireyteen ilman PI-säädintä. Oloarvo ryömii hieman vääntömomenttiohjeen muutoksen jälkeen. Tämä saattaa johtua jälkileikkurilla käytettävästä vanhasta analogisesta voima-anturin lähettimestä.

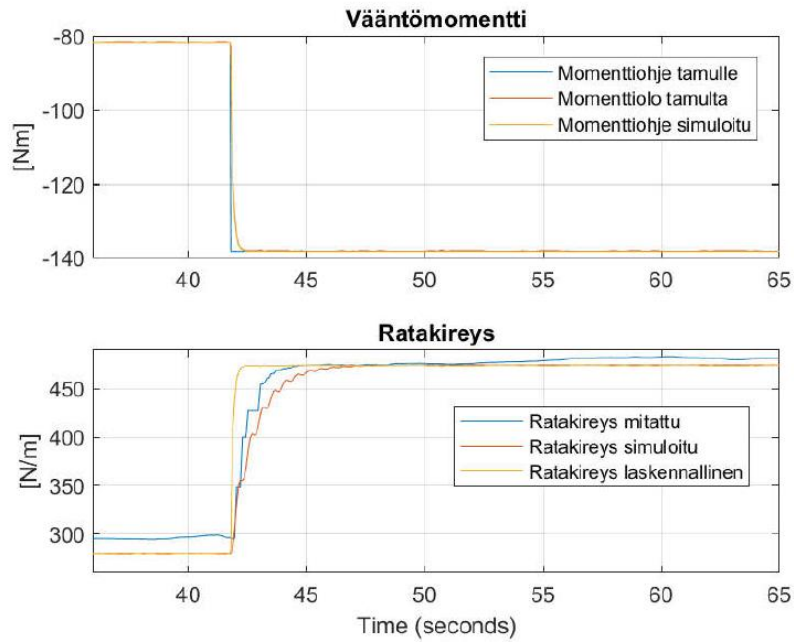
6.3 Mallinnuksen vastaavuus

Kuvien 6.5 ja 6.6 mittausjärjestelyssä leikkurin aukirullaimen taajuusmuuttajalle ja simulointimallille on syötetty askelmainen vääntömomenttiohjeen muutos. Vääntömomenttiohje on syötetty taajuusmuuttajalle ilman rampitusta. Leikkurin rata on ollut paikallaan ja kiinnirullauksen telojen jarrut ovat olleet lukittuina. Aukirullausta on ohjattu vääntömomenttiohjeella [Nm]. Kuvassa 6.5 on esitetty aukirullaimen toisen moottorikäytön taajuusmuuttajalle annettu vääntömomenttiohje, taajuusmuuttajalta luettu vääntömomentin oloarvo ja simuloitu vääntömomenttiohje. Käytännössä rullaimen molempien päiden moottorikäytöt käyttäytyvät identtisesti. Kuvaajasta huomataan, että taajuusmuuttajan sisäisessä vääntömomenttiohjauksessa on suodatus, jota voidaan simuloida ensimmäisen asteen suodattimella ja 0.1 sekunnin aikavakiolla.



Kuva 6.6 Taajuusmuuttajan vääntömomenttiohje ja takaisinkytkentä.

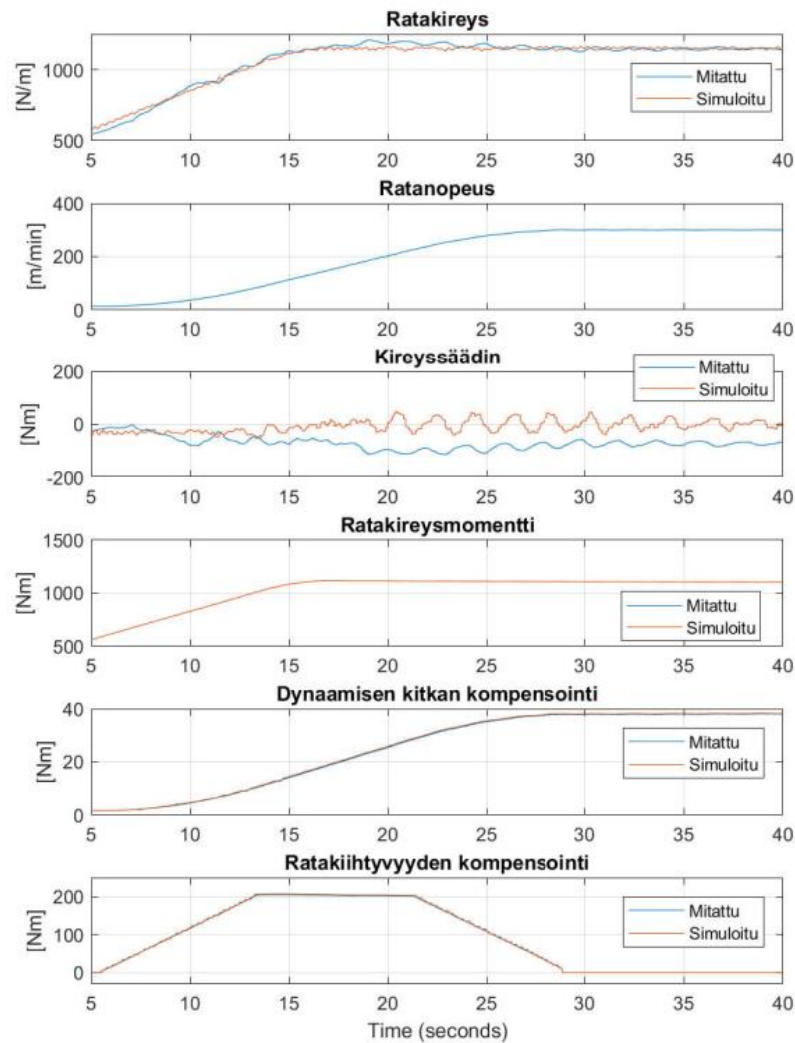
Kuvan 6.7 kuvaajissa on esitetty samat vääntömomentin kuvaajat kuten kuvassa 6.6. Lisäksi kuvassa esitetään ratakireyden mitattu ja simuloitu arvo ja ratakireyden laskennallinen kireys. Ratakireyden mittaesarvo on suodattamaton signaali voima-anturilta. Laskennallinen kireys kertoo kuinka paljon mitatun kireysarvon pitäisi olla tietyllä vääntömomenttiohjeella.



Kuva 6.7 Ratakireyden mitattu, simuloitu ja laskennallinen arvo askelmaisessa vääntömomenttiohjeen muutoksessa aukirullauksessa.

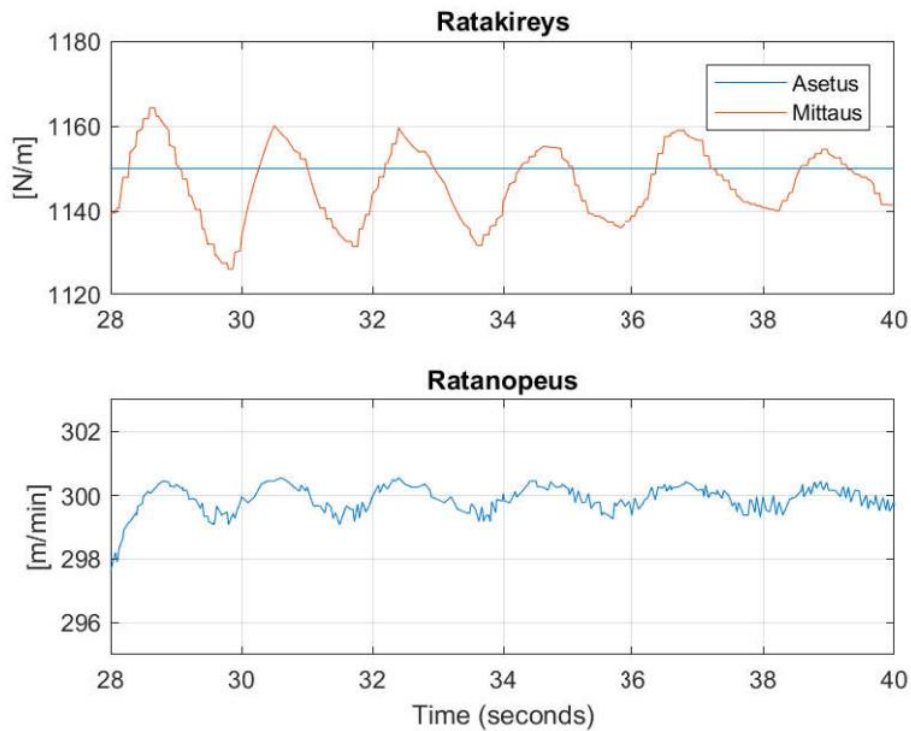
Kuvasta 6.7 havaitaan, että mitattu kireys saavuttaa laskennallisen kireyden viiveen jälkeen. Viive johtuu voima-anturin lähettimen sisäisestä suodatuksesta. Simulointimallissa ratakiireyden oloarvoa suodatetaan ensimmäisen asteen suodattimella 1 sekunnin aikavakiolla. Kuvasta 6.7 havaitaan samanlainen ratakiireysmittauksen ryömiminen kuten kuvassa 6.6.

Kuvassa 6.8 mittausjärjestelyissä simulointimallille on syötetty mittausdataa tuotannonkäynnistystilanteessa, jossa aluksi leikkurin ratakiireyttä rampitetaan tuotantokiireyteen ja ratanopeuden rampitus aloitetaan hieman myöhemmin. Mallille syötetään todellinen ratanopeus, ratakiihtyvyys, aukirullauksen halkaisija, raaka-aineen tiheys, rataleveys ja aukirullauksen pyörimisnopeus. Kuvan 6.8 kuvaajissa esitetään todellisen systeemin ja simulointimallin arvot ratakiireydestä, kireyssäätimen ulostulosta, ratakiireyden vääntömomentista, dynaamisen kitkan kompensointivääntömomentista ja ratakiihtyvyyden kompensointivääntömomentista. Todellisen systeemin ja simulointimallin kireyssäätimenä on diskreetti PI-säädin, joka toimii näytteistysajalla 100 ms.



Kuva 6.8 Simulointimallin ja todellisen systeemin arvojen vertailu leikkurin tuotannonkäynnistystilanteessa.

Kuvasta 6.8 havaitaan, että todellisen järjestelmän ja simulointimallin ratakireyden vääntömomentit ja kompensointivääntömomentit ovat yhdenmukaiset, kuten myös ratakireyden oloarvot. Vain kireyssäätimien lähdoissä on poikkeamaa. Kireyssäätimien poikkeava toiminta johtuu todennäköisesti simulointimallin ja todellisen systeemin erilaisista kartongin ominaisuuksista. Simulointimallissa kiinnirullaus on yksinkertaistettu ideaaliseksi ratanopeuden tuottajaksi. Todellisuudessa ratanopeudessa on huojuntaa, joka aiheuttaa huojuntaa myös ratakireyteen. Kuvassa 6.9 on tarkempi kuvaaja samasta tilanteesta kuin kuvassa 6.8. Simulointimallille syötetyssä ratanopeudessa havaitaan huojuntaa, joka aiheuttaa ratakireyteen saman vaiheisen huojunnan.



Kuva 6.9 Mitattu ratakireyden ja ratanopeuden huojunta.

6.4 Johtopäätökset

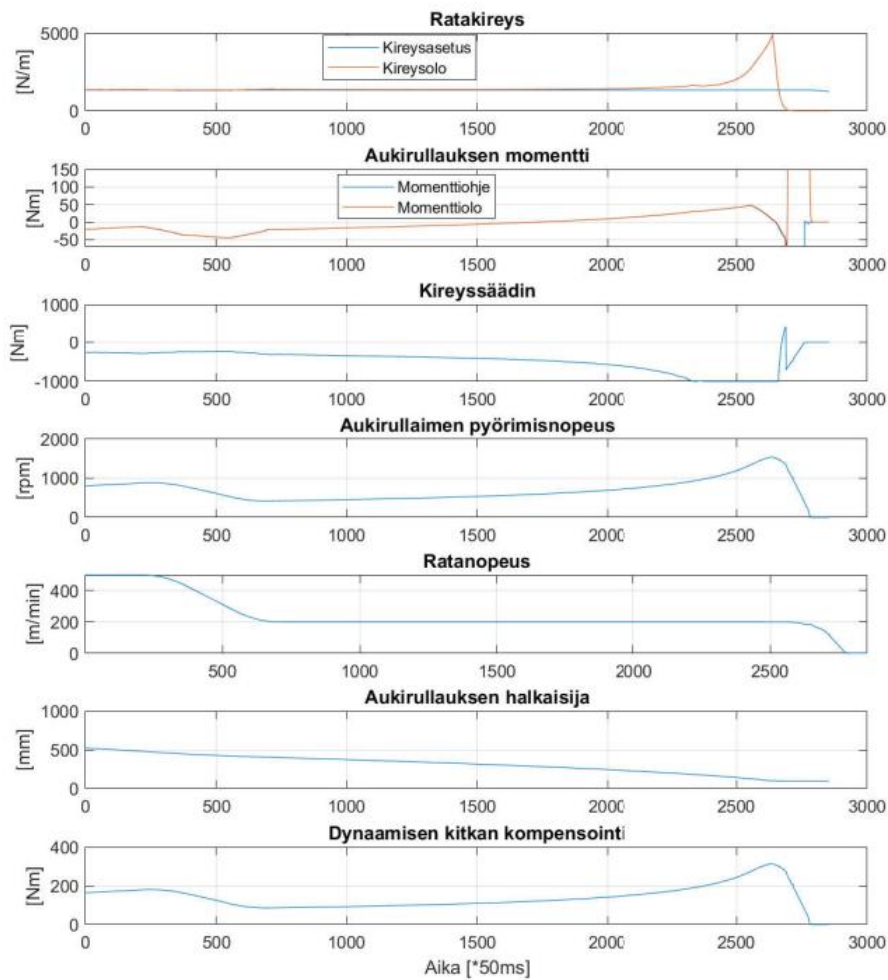
Aukirullauksen tarkka matemaattinen mallinnus on haastavaa. Osaltaan mallintamista vaikeuttavat pituusleikkurin epälineaariset ominaisuudet ja osittain tuntemattomat muuttujat. Tässä työssä aukirullauksen dynamiikan mallinnuksen voidaan kuitenkin katsoa onnistuneen. Simuloinnit vastaavat varsin hyvin todellista systeemiä. Malli käyttäytyy, kuten todellinen systeemi, kun sen lähtöarvoja ja parametrejä varioidaan. Tässä diplomityössä mallinnuksen vertailussa esiintyneet poikkeamat johtuvat suurelta osin estimaateista, jotka poikkeavat todellisista arvoista. Muodostetulla aukirullauksen mallilla voidaan simuloida myös muita pituusleikkureiden aukirullaimia, koska malli on parametroitava ja mallia voidaan muokata simuloitavan kohteen mukaan.

7 KIREYSSÄÄDÖN KEHITYS

Tässä kappaleessa käydään läpi jälkileikkurilla esiintyneitä kireyssäätöön liittyviä ongelmatilanteita, niiden syitä ja korjaavia toimenpiteitä. Kaikki ongelmatilanteet liittyvät aukirullauksen loppuvaiheeseen, kun raaka-ainerullan hylsy on pienisäteinen ja aukirullattavan rullan halkaisija alittaa 250 mm. Ongelmatilanteiden selvittäminen on haastavaa, koska pieniä hylsyjä on leikkurilla varsin harvoin ajettavana ja säätöjen virittämiseen tarvittavia toistoja ei saada riittävästi. Myös jatkuva tuotanto vaikeuttaa säätöjen testaamista.

7.1 Esimerkki ongelmatapaus 1

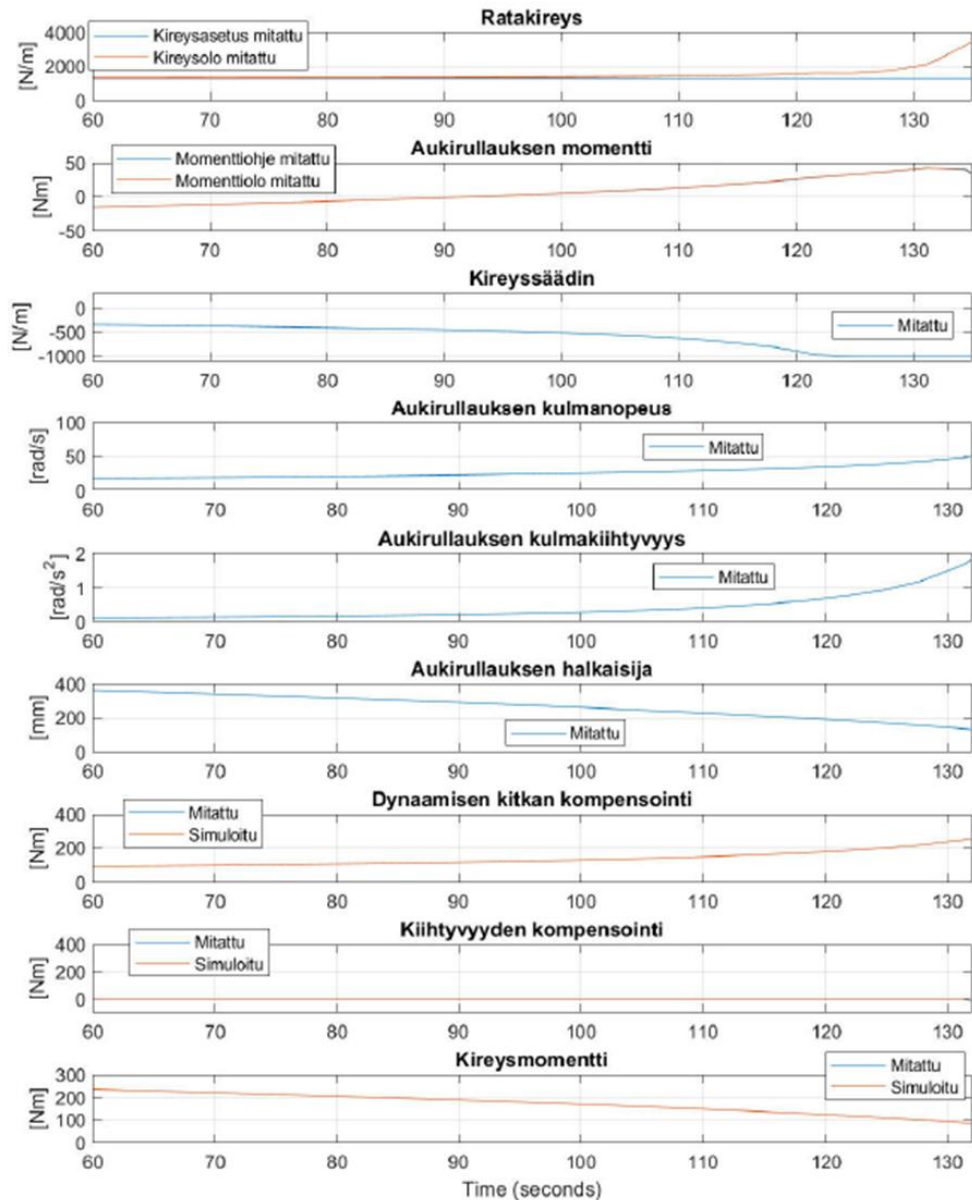
Kuvassa 7.1 on esitetty yksi ongelmatilanne. Kuvaajat ovat todellisen systeemin mitattuja arvoja. Kuvasta havaitaan, että ratakiireys kasvaa huomattavasti aukirullauksen loppuvaiheessa, kun aukirullauksen halkaisija on alle 300 mm. Kireyssäädin pyrkii pienentämään aukirullauksen vääntömomenttia, mutta säädin saavuttaa minimiraja-arvon - 1000 Nm, jonka jälkeen ratakiireys jatkaa vielä nousuaan. Kuvaajasta havaitaan myös, että dynaamisen kitkan kompensoinnillakaan ei pystytä rajoittamaan ratakiireyden nousua. Hetkillä 12.5 s ja 112.5 s dynaamisen kitkan kompensointi on samalla tasolla, mutta hetkellä 112.5 s ratakiireys on jo lähtenyt kohoamaan.



Kuva 7.1. Kuvaaja kireyssäädön ongelmatilanteesta, jossa ratakireys nousee hallitsemattomasti.

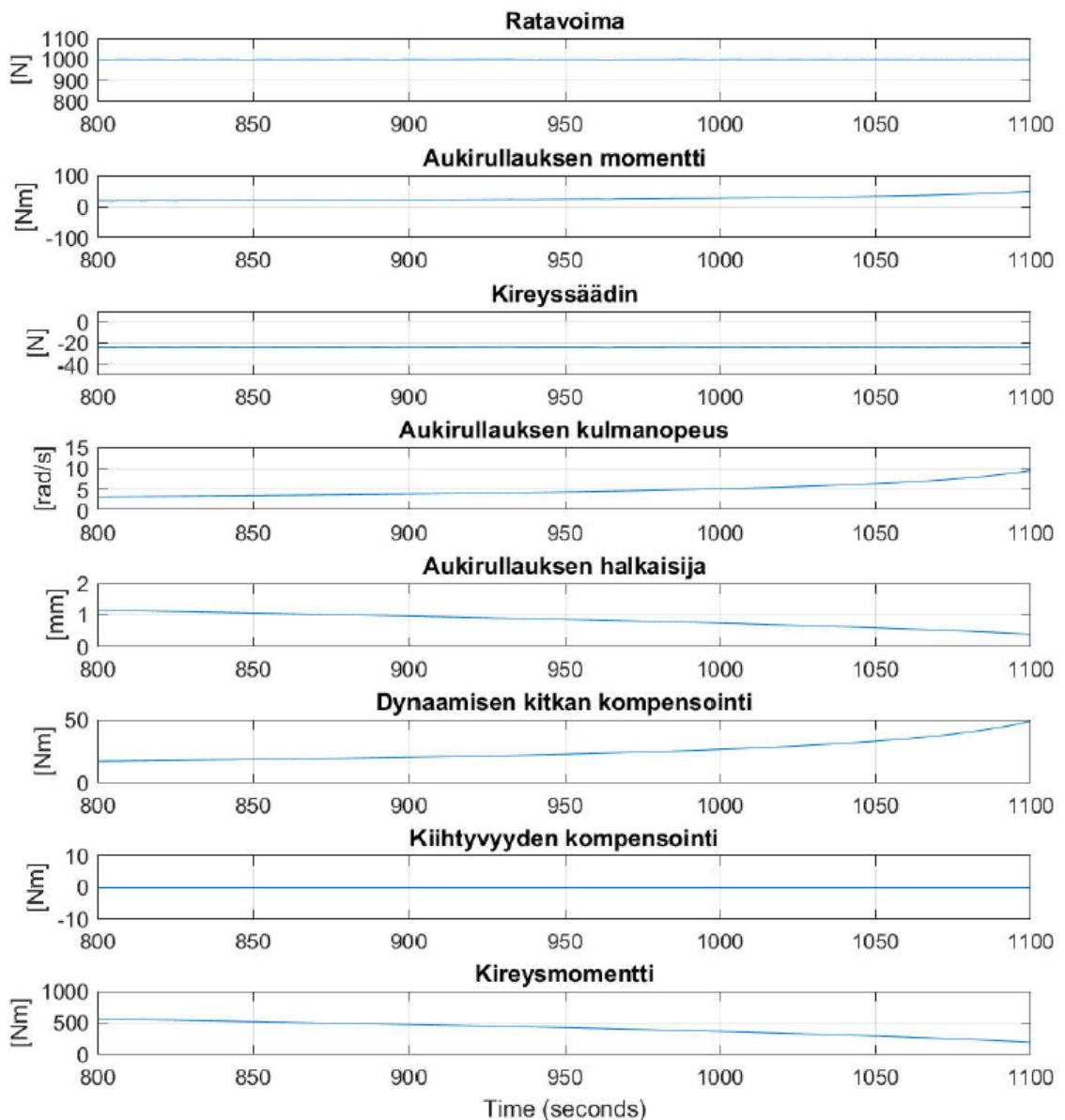
Kuvassa 7.2 on esitetty sama tilanne kuin kuvassa 7.1. Kuvaajiin on lisätty kiihtyvyyden ja dynaamisen kitkan kompensointivääntömomentit sekä kireysvääntömomentin simuloituvat arvot. Simulointimallille on syötetty leikkurilta mitatut todelliset arvot, kuten ratanopeus [m/min], aukirullauksen pyörimisnopeus [rpm] ja aukirullauksen halkaisija [mm]. Simulointimallille syötettyjen arvojen perusteella on laskettu kireyssäädön myötäkytkentäarvot. Kuvasta 7.2 huomataan, että leikkurin ohjausjärjestelmä laskee myötäkytkentäarvot samalla tavalla kuin simulointimalli. Tästä huolimatta ratakireyden hallinta ei toimi aukirullauksen loppuvaiheessa. Voidaan todeta, että kappaleessa 4.2 **Aukirullauksen mallinnus** kuvattu aukirullauksen matemaattinen malli ja sen perusteella muodostettu simulointimalli eivät täsmää erikoistilanteessa. Kuvassa 7.3 on esitetty

simulointi aukirullaustapahtumasta, jossa ratavoima pysyy tasaisena aukirullauksen loppuun asti.



Kuva 7.2. Kuvaaja kireyssäädön ongelmatilanteesta, johon on lisätty simuloitua kireyssäädön myötäkytkennät.

Kuvassa 7.3 on esitetty simulointimallilla suoritettu simulointi, jossa aukirullainta on ajettu tasaisella ratanopeudella, kunnes aukirullaimesta on loppunut kartonki. Simuloinnissa ratanopeus on 120 [m/min] ja hylsyn halkaisija 92.8 [mm]. Kuvasta 7.3 huomataan, että kireyssäätimen ei tarvitse korjata vääntömomenttiohjetta aukirullauksen loppuvaiheessa. Ratavoima pysyy asetusarvossa dynaamisen kitkan kompensointiarvon avulla.



Kuva 7.3. Simulointi, jossa aukirullaustapahtumasta, jossa ratavoima pysyy tasaisena.

7.1.1 Korjaavat toimenpiteet

Analyysin perusteella matemaattisessa mallissa ja aukirullauksen kireyssäädössä ei ole otettu huomioon aukirullauksen halkaisijan pienentymisestä johtuvaa kasvavaa kulmakihtiä. Aukirullauksen loppuvaiheessa aukirullattavan rullan inertia ei ole suuri, mutta mekaniikan inertia ja iso kulmakihti aiheuttaa rullan purkaussuuntaan vastaisen vääntömomentin, joka täytyy kompensoida myötäkytkentänä kireyssäädössä. Luotettavin tieto aukirullauksen kulmanopeudesta saadaan aukirullauksen taajuusmuuttajalta

kenttäväylän kautta. Aukirullauksen halkaisijasta ja kehänopeudesta ei saada ohjusjärjestelmään suoraa mittaustietoa. Aukirullaimen kulmakiiktyvyyden laskentaan tarvittava kulmanopeus ω_{AR2} lasketaan seuraavasti

$$\omega_{AR2} = \frac{2\pi}{60} * \frac{n_{AR}}{i_{AR}}, \quad (7.1)$$

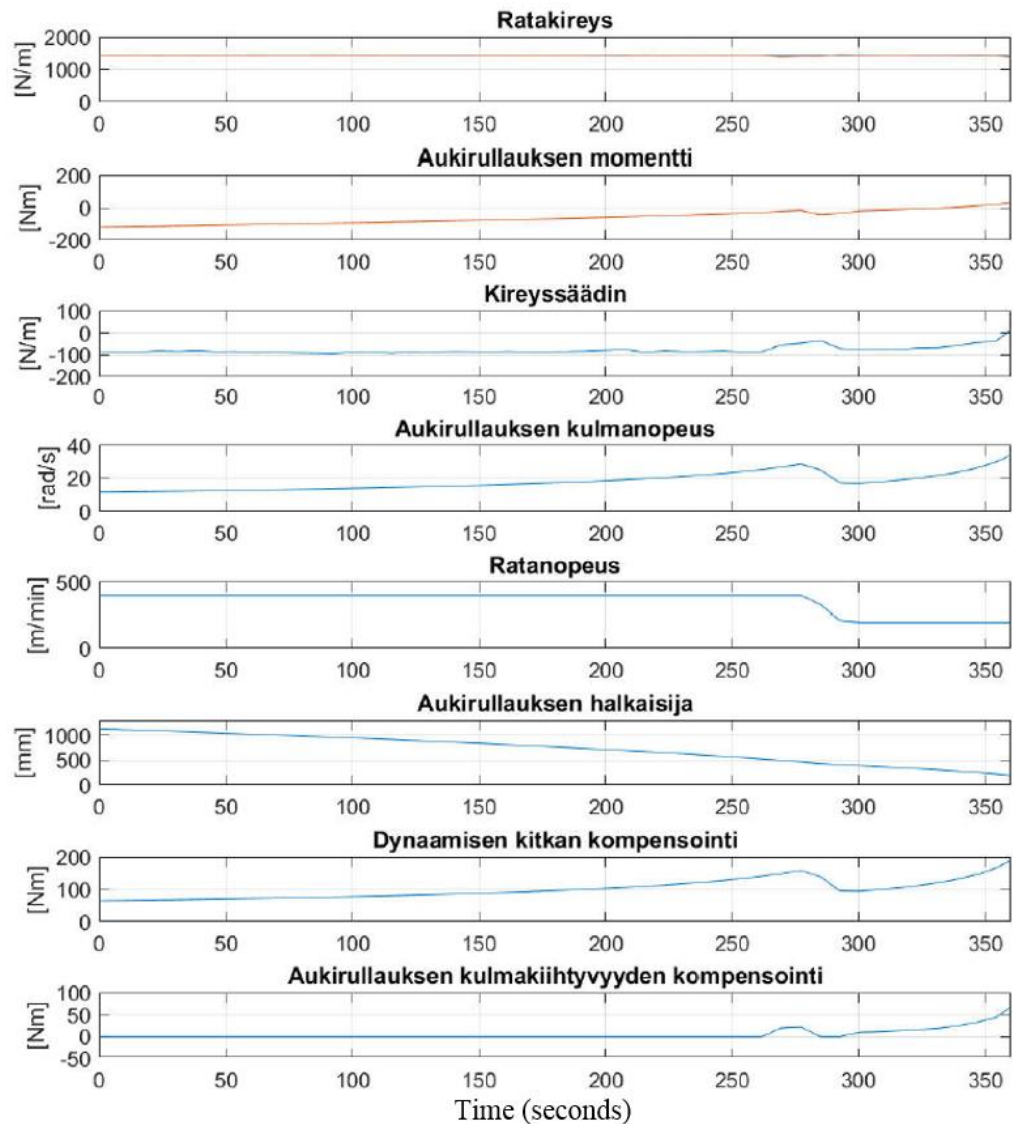
jossa n_{AR} on aukirullauksen pyörimisnopeus rpm.

Aukirullaimen kulmakiiktyvyys lasketaan seuraavasti

$$\alpha_{AR2} = \frac{\Delta\omega_{AR2}}{\Delta t}, \quad (7.2)$$

jossa $\Delta\omega_{AR2}$ on aukirullaimen kulmanopeuden muutos ajan suhteen ja Δt on ajan muutos.

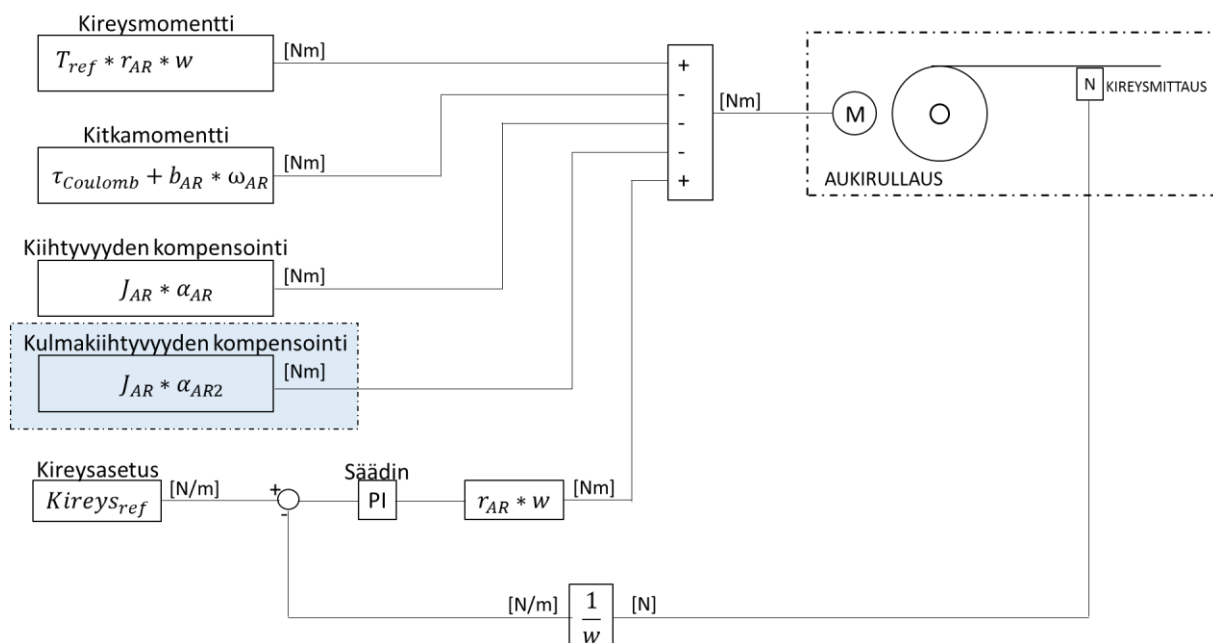
Jälkileikkurin kireyssäätöön lisättiin myötäkyykentänä kulmakiiktyvyyden kompensointi. Kuvassa 7.4 on esitetty kireyssäätimen toiminta.



Kuva 7.4. Mittausten kuvaajat kireyssäädöstä, johon on lisätty kulmakiiktyvyyden kompensointi.

Kuvasta 7.4 huomataan, että kireyssäätö toimii aukirullauksen loppuvaiheessa paremmin kulmakiiktyvyyden kompensoinnin myötä. Kireyden oloarvo pysyy tasaisena ja kireyssäätimen lähtö ei ajaannu ääriarvoonsa.

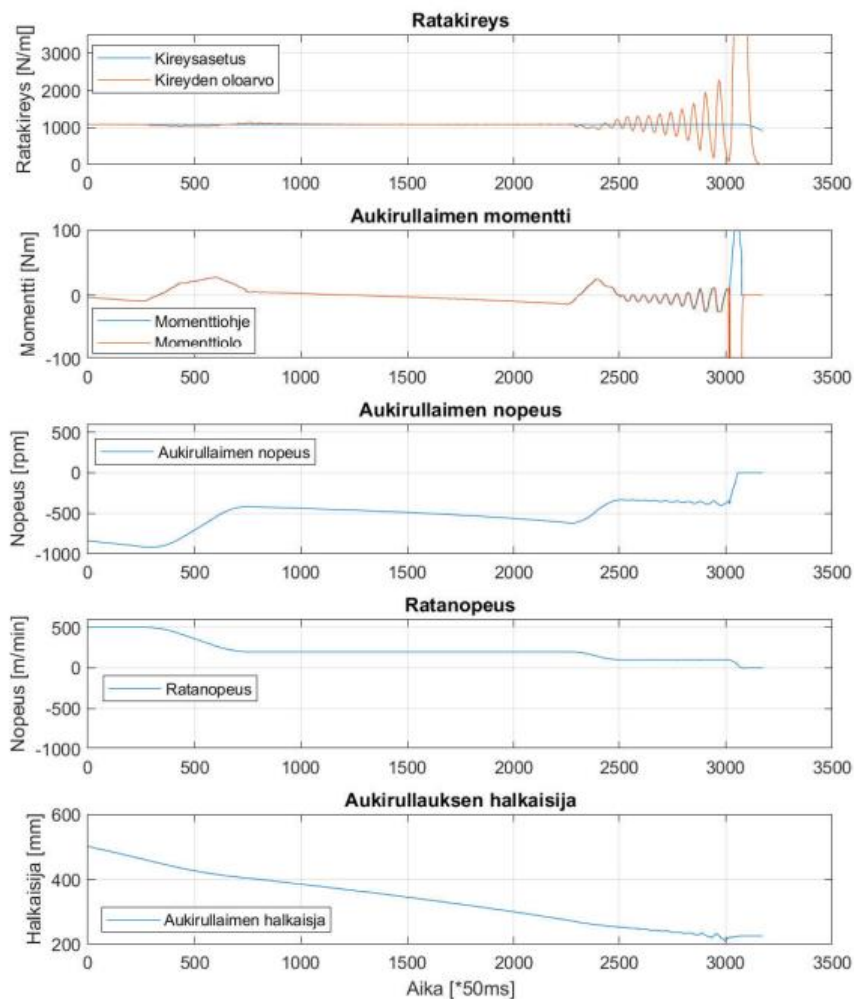
Myös simulointimalli on päivitettävä kulmakiiktyvyyden kompensoinilla. Kuvassa 7.5 on esitetty kulmakiiktyvyyden kompensoinnin myötäkytkentäarvolla varustettu kireyssäädön periaatekuva.



Kuva 7.5 Kulmakihtyvyyden kompensoinnin myötäkytkennällä varustettu kireyssäädön periaatekuva.

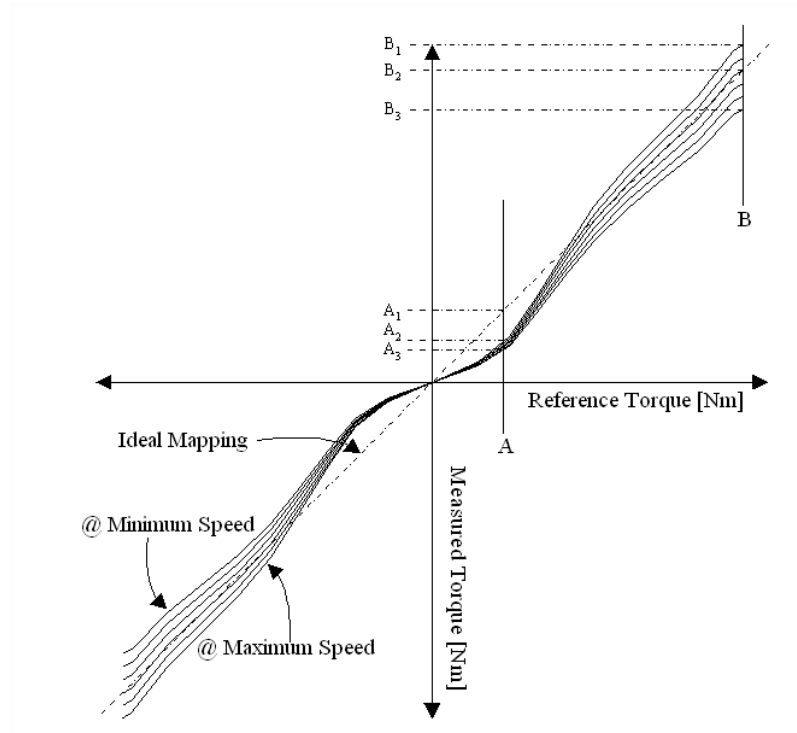
7.2 Esimerkki ongelmatapaus 2

Kuvassa 7.6 on esitetty toisen ongelmatilanteen kuvaajat. Kuvasta huomataan, että kireyssäätö muuttuu epästabiiliksi, kun aukirullauksen halkaisijan pienenemisen myötä ratakireyden ylläpitämiseen tarvittava vääntömomenti lähenee nollaa. Ratakireys oskilloi vaikka rata on pysähdyksissä.



Kuva 7.6 Kuvaaja kireyssäädön ongelmatilanteesta, jossa ratakireys muuttuu epästabiiliksi.

Voidaan olettaa että, ongelma johtuu järjestelmän epälineaarisuudesta. Ohjausjärjestelmän laskemat kireyssäädön myötäkytkentäarvot ja kireyssäädin saavat systeemin epästabiiliin tilaan. Epälineaarisuutta saattavat aiheuttaa esimerkiksi raaka-ainerullan materiaali, joka ei purkaannu normaalisti tai jumittava mekaniikka. Rullan halkaisijan ja inertian ollessa pieni mekaniikasta johtuvat poikkeamat vaikuttavat aukirullauksen dynamiikkaan suhteellisesti enemmän kuin isolla rullalla. Lisäksi merkittävästi vaikuttava asia voi olla myös moottorikäytön epälineaarisuus. Kuvassa 7.7 on kuvattu erään AC-käytön vääntömomenttiferenssin ja vääntömementioloarvon kuvaajat eri moottorin nopeuksilla. Kuvasta voidaan nähdä, että vääntömomenttikäyrät eivät ole lineaarisia. Vääntömomentin oloarvon vastaavuus referenssiin riippuu vääntömomentin suuruudesta ja moottorin pyörimisnopeudesta.



Kuva 7.7 Erään leikkurin AC-käytön vääntömomenttireferenssi- ja oloarvokuvaajat (Boulter).

Seuraavassa esimerkissä tarkastellaan vääntömomenttiohjeen lineaarisuutta erilaisilla vääntömomenttiohjeilla. Taulukossa 7.1 on moottorin vääntömomenttivasteita eri moottorin pyörintänopeuksilla. Taulukossa on 7.2 esimerkkilaskelman aukirullauksen dimensio- ja vääntömomenttiraja-arvot sekä ratavoima-asetus.

Taulukko 7.1. Kuvan 7.7 vääntömomentin takaisinkytkennät eri pisteissä.

A (ref)	A ₁	A ₁	A ₃
1 [Nm]	1 [Nm]	0.85 [Nm]	0.75 [Nm]
B (ref)	B ₁	B ₂	B ₃
10 [Nm]	10.1 [Nm]	10 [Nm]	9.8 [Nm]

Taulukko 7.2. Esimerkkilaskennassa käytetyt arvot.

Minimi rullan halkaisija r_{ARmin}	0.1 [m]
Maksimi rullan halkaisija r_{ARmax}	1.0 [m]
Ratavoiman asetusarvo $Tension_{ref}$	10 [N]
Vääntömomenttiohje minimi halkaisijalla τ_{min}	$Tension_{ref} * AR_{rmin} = 10 [Nm] * 0.1 [m]$
Vääntömomenttiohje maksimi halkaisijalla τ_{max}	$Tension_{ref} * AR_{rmax} = 10 [Nm] * 1 [m]$

Seuraavana lasketaan moottorin vääntömomenttivasteet ja niiden suhteelliset virheet aukirullauksen minimi ja maksimi säteillä.

$$\Delta T_{r_{min}} = |0.1(1 - (0.85 \rightarrow 0.75))| = 1.5 \rightarrow 2.5 [N] \quad (7.3)$$

$$\%T_{err} = \frac{\Delta T_{r_{min}}}{Tension_{ref}} * 100 = \frac{1.5 \rightarrow 2.5 [N]}{10 [N]} * 100 = 15 \rightarrow 25\% \quad (7.4)$$

$$\Delta T_{r_{max}} = |0.1(1 - (10.1 \rightarrow 9.8))| = 0.1 \rightarrow 0.2 [N] \quad (7.5)$$

$$\%T_{err} = \frac{\Delta T_{r_{max}}}{Tension_{ref}} * 100 = \frac{0.1 \rightarrow 0.2 [N]}{10 [N]} * 100 = 1 \rightarrow 2\% \quad (7.6)$$

Yhtälöistä (7.3), (7.4), (7.5) ja (7.6) ja kuvasta 7.6 huomataan, että vääntömomenttiohjeen ollessa lähellä nollapistettä vääntömomentin oloarvo on huomattavan paljon epälineaarinen. JL2:n aukirullauksen moottoreiden vääntömomenttivasteiden tarkkaa mittausta ei pystytä järjestämään, mutta edellä esitettyä esimerkkiä voidaan pitää suuntaa antavana.

7.2.1 Korjaavat toimenpiteet

Kireyssäätö täytyi virittää huonoimman tilanteen mukaan. Kitkan kompensointiarvoja sekä kireyssäätimen kaistanleveyttä pienennettiin. Tavoitteena oli estää säädön ylikompensointi ja hyväksyä hieman hitaampi säätö. Yksi vaihtoehto olisi tehdä aukirullauksen inertian mukaan vaihtuvat säädinparametrit, mutta kiinteillä parametreillä saavutettiin tyydyttävä lopputulos.

8 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tutkittiin pituusleikkurin aukirullauksen dynamiikkaa, jota mallinnettiin matemaattisesti. Mallinnuksen perusteella muodostettiin aukirullauksen simulointimalli. Mallin perusteena oli kiinnirullauksen ja aukirullauksen muodostama telapari, jotka on yhdistetty toisiinsa joustavalla kartonkiradalla. Mallia yksinkertaistettiin kiinnirullauksen osalta. Simulointimallissa kiinnirullausta kuvataan ideaalisena ratanopeuden tuottajana. Simulointimallin vastaavuutta ja toimintaa testattiin jälkileikkurilta saadun mittausdatan avulla ja käytännön mittauksilla.

Simulointimallin muodostamisen taustalla oli kaksi tavoitetta. Ensimmäisenä tavoitteena oli muodostaa parametroiva simulointimalli, jota voitaisiin käyttää olemassa olevien, sekä tulevien leikkureiden säädön ja toiminnan kehittämiseen. Mallilla voidaan testata erilaisia ajomalleja vaihtuvilla raaka-aineilla. Toinen tavoite oli tehdä malli, joka voitaisiin liittää erilaisiin simulointi- ja virtuaalialustoille. Mallin avulla osa leikkurin käyttöönotosta ja operaattorikoulutuksesta voidaan tehdä ilman leikkurin mekaniikka virtuaalisesti.

Diplomityössä haluttiin löytää ratkaisut kireyssäädön ongelmiin aukirullaustapahtuman loppuvaiheessa. Käytännön mittauksissa havaittiin, ettei simulointimallin toiminta vastannut todellisen aukirullauksen toimintaa, kun aukirullauksen halkaisija pieneni alle 250 mm. Alkuperäisessä mallinnuksessa ei oltu otettu huomioon aukirullauksen halkaisijan pienenemisen myötä syntyvää kulmakiiltyvyyttä. Mallia täydennettiin aukirullauksen kulmakiiltyvyyden kompensoinnilla. Säädön parannus testattiin käytännön mittauksilla.

Aukirullauksen mallinnuksessa onnistuttiin melko hyvin. Simuloinnit vastaavat varsin hyvin todellista systeemiä. Malli käyttäytyy, kuten todellinen systeemi, kun sen lähtöarvoja ja parametrejä varioidaan. Muodostettua mallia voidaan käyttää suunnitellusti testaus- ja virtualisointitarkoituksiin.

Jatkotutkimuksen kohteena olisi luonnollista siirtyä mallintamaan kantotelaleikkurin kiinnirullaustapahtumaa. Kantotelojen rullausvoiman ja painotelan muodostaman nippikuorman vaikutus rullan muodostukseen ja rullauksen dynamiikka ovat haastavia

kohteita. Kiinnirullauksen malli voidaan liittää tässä diplomityössä muodostettuun aukirullauksen malliin.

LÄHTEET

Boulter, B.T. 2001. Applying Drive Specifications to Systems Applications: Part II: Current/Torque Regulation. 2001 IEEE IAS Annual Meeting. APPLIED INDUSTRIAL CONTROL SOLUTIONS LLC.

Coper, G. Tension control: Dancer System Defined. 2009. [verkkodokumentti] [Viitattu 5.5.2019]. Saatavilla <https://www.pffc-online.com/ar/7076-tension-control-dancer-0409>

Ellis, G. 2014. Control System Desing Guide. Third Edition. London. Elsevier Academic Press.

Harju, T & Marttinen, A, 2000. Sääteotekniikan koulutusmateriaali [verkkodokumentti] [Viitattu 7.3.2019]. Saatavilla https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1367/pid_kirja_1-1.pdf

Hou, Y. 2001. Novel Control Approaches For Web Tension Regulation. doctoral thesis. Cleveland State University

Jin, J & Pieper, K. 2002. Model Reference Adaptive Tension Control in a Papermaking Machine, IFAC Mechatronic Systems.

Kortela, U. & Virkkunen, J. 1976. Sääteotekniikan perusteet. Espoo: TKY Otapaino, ISBN 951-671-136-7.

Nevaranta, N. Kartonkikoneen telasysteemin dynaaminen kireydenhallinta, Diplomityö, 2011, Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Energia.

PROFIBUS and PROFINET International
[verkkodokumentti]. Saatavilla <https://www.profibus.com/>

Rautiainen, P. 2009. Papermaking Part 3, finishing, book 10, Helsinki, Paper Engineers' Assosiation/Paperi ja Puu Oy

Ramirez, G. Lorenz, R. D. Valenzuela , M. A. Observer-Based Estimation of Modulus of Elasticity for Papermaking Process, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 50, NO. 3, 2014.

Siemens, Application Winder with DCC, Article ID: 38043750, V4.3.0, 06/2018. Tekninen manuaali.

Skogestad, S. & Postlethwaite, 2005. I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design, Second Edition, Wiley

Stefanova. H. Improving the production process through better web tension control. 2012. suunnitteluohje, Optima.

Virtanen, J. 1981. Yleinen säätötekniikka. Jyväskylä: K.J GUMMERUS, ISBN 951-737-093-8.

Whiteside. D. Basics of Web Tension Control, 2007, PLASE Conference, St Louis, MO, TAPPI

LIITE A JÄLKILEIKKURI 2 TEKNISET TIEDOT

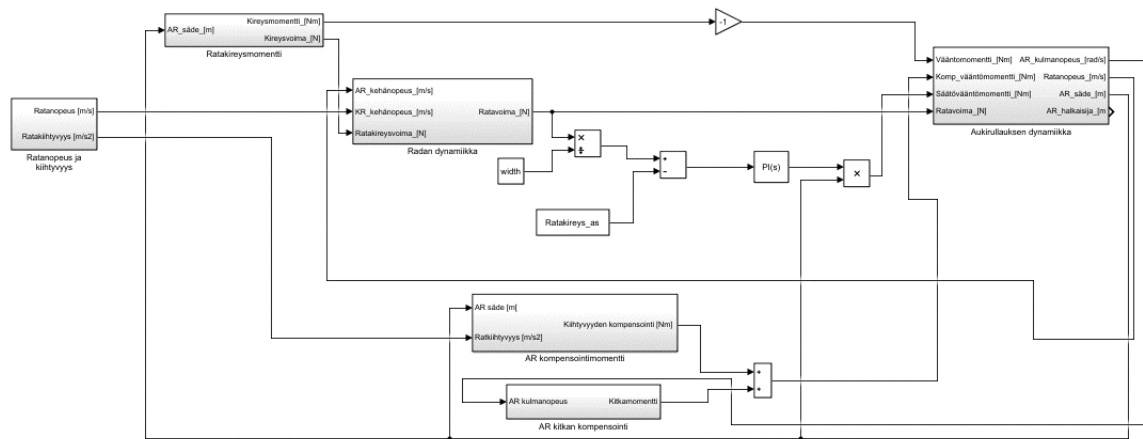
Tässä liitteessä on esitetty jälkileikkurissa käytettyjen moottoreiden ja taajuusmuuttajien tiedot.

Moottorin ABB M2BA 315MA tekniset tiedot:	
Nimellinen pyörimisnopeus	989 rpm
Nimellinen teho	132 kW
Nimellinen virta	137 A
Nimellinen vääntömomentti	1270 Nm
Roottorin inertia	5.8 kgm ²
Pulssianturi takaisinkytkentä	2048 p/kierros

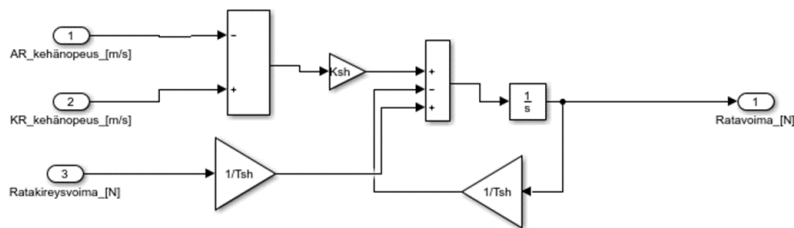
Taajuusmuuttajan Siemens Sinamics S120 tekniset tiedot:	
Nimellinen teho	110 kW
Nimellinen virta	210 A
Syöttöjännite	400 V

Aukirullauksen mekaniikan tiedot:	
Vaihde	2.647
Moottorin inertia	5.8 kgm ²
Mekaniikan inertia	52.7 kgm ²

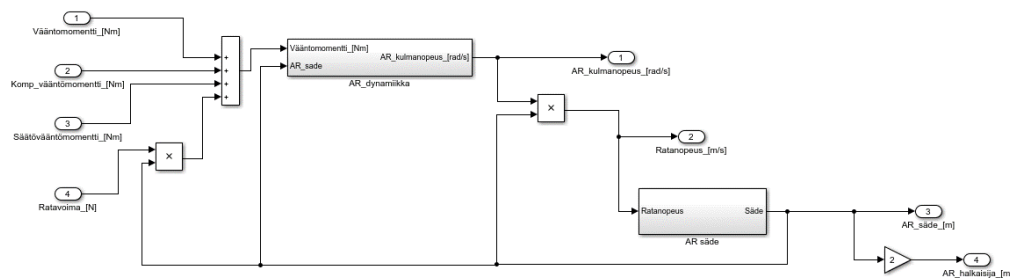
LIITE B SIMULINK-MALLI



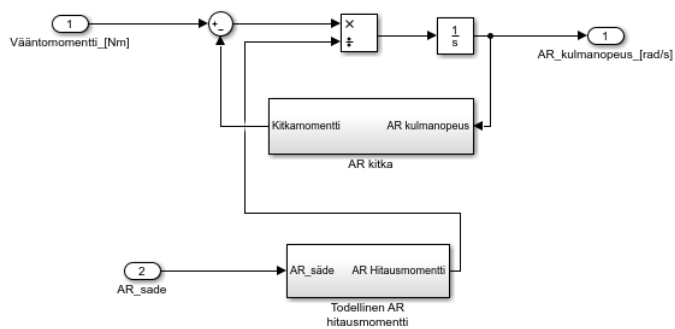
Kuva 1 Järjestelmän simulointimalli. Mallissa on mukana kireyssäädin, kiihtyvyyden ja kitkan kompensointiarvojen laskenta ja ratakiireysvääntämömentin muodostus.



Kuva 2 Radadienamiikan malli.



Kuva 3 Aukirullauksen malli ja aukirullauksen säteen laskenta.



Kuva 4 Aukirullauksen dynamiikan malli.