

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
SÄHKÖTEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

DIPLOMITYÖ

SÄHKÖISEN LIIKKEENOHJAUSKÄYTÖN MITOITUS,
KÄYTTÖÖNOTON DOKUMENTOINTI JA
PAKKAUSLINJASOVELLUKSET

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastolla 11.10.2007.

Työn tarkastajana on toiminut professori Juha Pyrhönen.

Toisena tarkastajana ja ohjaajana on toiminut TkT Markku Niemelä.

Lappeenrannassa 12.02.2008

Mari Haapala
Kaivosuonkatu 3 F 16
53850 Lappeenranta
Puh. 040-7025399

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Mari Emilia Haapala

Työn nimi: Sähköisen liikkeenohjauksen mitoitus, käyttöönoton dokumentointi ja pakkauslinjasovellukset

Osasto: Sähkötekniikka

Vuosi: 2008

Paikka: Lappeenranta

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

81 sivua, 60 kuvaa, 20 taulukkoa

Tarkastajat: Juha Pyrhönen, Markku Niemelä

Hakusanat: seurantakäyttö, paikoituskäyttö, servokäyttö, sähkökäyttö

Liikkeenohjaustekniikasta on kehittymässä uusi markkina-alue taajuudenmuuttajille. Taajuudenmuuttajien tiedonsiirto- ja säätöominaisuudet ovat tavoittaneet servovahvistinten ominaisuuksia viime vuosien aikana.

Tässä työssä selvitettiin taajuudenmuuttajista, lineaarijohteista ja kestopagneettiservomootoreista koostuvan liikkeenohjausjärjestelmän ominaisuuksia ja edellytyksiä teollisuussovelluksissa. Ominaisuuksia pohdittiin sekä paikoituskäytön, että seurantakäytön kannalta.

Koelaitteistolle tehtiin sarja mittauksia, joiden perusteella laitteiston suorituskykyä pystyttiin arvioimaan alustavasti. Mittauksien avulla selvitettiin laitteen nopeudet sekä rata- ja paikoitustarkkuus eri liikesuunnissa. Mittausten antamien tulosten perusteella arvioitiin laitteen valmiutta pakkauslinjan osana.

ABSTRACT

Author: Mari Emilia Haapala

Title: Electrical position control drive; documentation, commissioning and packaging applications

Department: Electrical engineering

Year: 2008

Place: Lappeenranta

Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology.

81 pages, 60 pictures, 20 tables

Examiner: Juha Pyrhönen, Markku Niemelä

Keywords: electric drives, servo drives, positioning, motion control

Frequency converters have started to gain new market areas in the field of motion control applications. The communication and control properties of frequency converters have reached the properties of traditional servo amplifiers during the past few years.

In this thesis a motion control system was examined. This particular system consists of frequency converters, permanent magnet synchronous motors and linear belt drives. The properties and prerequisites for packing are discussed.

A test setup was build and measurement sets were done to examine the performance of the system. Speed and accuracy measurements were done in all three dimensions. Based on the measurement results applicability of the system for packing industry was evaluated.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja ABB:n yhteiselle Carelian Drives and Motor Centre (CDMC) tutkimus- ja tuotekehityskeskukseen.

Kiitän professori Juha Pyrhöstä mielenkiintoisesta aiheesta ja työni tarkastamisesta sekä TkT Markku Niemelää ohjauksesta ja hyvistä neuvoista. Haluan kiittää myös kaikkia MC-ryhmän jäseniä saamastani avusta ja hyvästä työilmapiiristä projektin aikana sekä laboratorioinsinöörejä Martti Lindhiä ja Harri Loistaa käytännön avusta.

Erityisesti osoitan lämpimät kiitokset vanhemmilleni kaikesta saamastani tuesta ja kannustuksesta. Kiitos myös rakkaalle avopuolisolleni Samulille siitä, että olet valanut minuun uskoa ja jaksanut potkia minua eteenpäin vaikeimpina hetkinä

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	3
1 JOHDANTO	5
1.1 Työn tavoite	6
2 LIIKKEENOHJAUSKÄYTÖT	7
2.1 Rakenne ja ohjaus	7
2.2 Reaaliaikaisuus ja kenttäväylät	8
2.3 Suorituskyvyn reunaehdot	14
2.4 Kestomagneettitahtikoneet servomootoreina.....	16
2.5 ACS M1 taajuudenmuuttaja	21
2.6 Pakkauslinjat ja liikkeenohjaus.....	23
3 KOELAITTEEN RAKENNE JA MITOITUS	25
3.1 Mekaaniset osat.....	25
3.1.1 Pneumaattiset osat.....	26
3.2 Moottorit ja taajuudenmuuttajat.....	27
3.3 Mittalaitteet.....	30
3.4 Mitoituksen lähtökohdat.....	32
3.4.1 Laitteen massat.....	32
3.4.2 Kiihtyvyydestarkastelu.....	33
3.4.3 Muuttuvan massakeskipisteen vaikutus	40
3.4.4 Hihnojen suorituskyvyn tarkastelu.....	40
4 KOELAITTEEN KÄYTTÖÖNOTTO	42
4.1 Esivalmistelut.....	42
4.2 Taajuudenmuuttajat ja moottorit.....	42
4.3 Toiminnan testausta ACSM1:n avulla	44
4.4 Kitkamittaukset.....	45
4.5 Kenttäväylät.....	46
5 SUORITUSKYKYMITTAUKSET ACS M1:N AVULLA JA MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI	48

5.1 x-akseli	51
5.2 y-akseli	61
5.3 z-akseli.....	70
5.4 Johtopäätökset ja koelaitteen soveltuvuus pakkauslinjalle.....	76
6 YHTEENVETO.....	78
LÄHDELUETTELO.....	80

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

a	kiihtyvyys
E	napajännite
F	voima
i	virta, muuntosuhde
J	hitausmassa
K	vahvistus
L	induktanssi
l	pituus
m	massa
p	napapariluku
P	jakso
r	säde
R	resistanssi
t	aika
T	vääntömomentti
U	jännite
v	nopeus
x	paikka

Kreikkalaiset kirjaimet

δ	tehokulma
ψ	käämivuo
τ	aikavakio
ω	sähköinen kulmanopeus
Ω	mekaaninen kulmanopeus

Lyhenteet

DTC	Direct torque control, suora vääntömomentin säätö
DP	decentralized peripherals, hajautettu järjestelmä
ID	identifionti
NdFeB	Neodyymi-rauta-boori

PMSM Permanent magnet servo motor, kestmagneettiservomoottori
Sercos SERIAL ReAltime COmmunication System

1 JOHDANTO

Teollisuusautomaatio elää jatkuvassa muutoksessa. Käytössä oleva tekniikka on monin paikoin vanhentunutta ja hidasta, minkä seurauksena on syntynyt kehitystarpeita uusille ratkaisuille sekä automaation lisäämiselle. Automatisoinnin päätarkoitus on nopeuttaa ja helpottaa työtehtävää, sekä parantaa valmistettavan tuotteen laatua ja markkina-arvoa. Liikkeenohjaustekniikan kehittyminen on tuonut mukanaan uusia teollisuusautomaation sovellusmahdollisuuksia. Sähköisten servokäyttöjen viimeaikainen kehitys on puolestaan mahdollistanut entistä tarkempien ja nopeampien sovellusten kehityksen. Hyvien ominaisuuksiensa ja kompaktin kokonsa vuoksi kestoplaneettakoneet ovat yleistyneissä servokäytöissä. Myös taajuudenmuuttajien ja ohjausjärjestelmien kehittyminen sekä hintojen lasku ovat mahdollistaneet uuden sukupolven teollisuusautomaation yleistymisen. Nyt pyritään entistä nopeampaan liikkeenohjaukseen ja kompaktimpaan laitteistoon. Teollisuuden taajuudenmuuttajien ja perinteisten servovahvistimien ominaisuudet lähestyvät toisiaan. Teollisuuden taajuudenmuuttajat ovat suoran vääntömomenttisäädön (direct torque control, DTC:n) tai edistyneiden virtavektorisäätömenetelmien avulla saavuttaneet tai ohittaneet vääntömomentin säädön suorituskyvyssä perinteiset servovahvistimet. Servovahvistimien etuna ovat enää olleet teollisuusmuuttajia monipuolisemmat liitännät ja väyläratkaisut, kuten esimerkiksi reaaliaikainen SERCOS väylä, jonka avulla useita käyttöjä voidaan synkronoida keskenään. Sercos-väylätuki on alkanut yleistymään myös teollisuusmuuttajissa. Servovahvistimet ovat yleensä sovelluskohtaisesti räätälöity, jolloin niiden systeemimallit ovat hyvin tarkkoja. Tässä suhteessa servovahvistinten voidaan katsoa olevan vielä teollisuusmuuttajia kehittyneempiä.

Liikkeenohjausjärjestelmä poikkeaa puhtaasti paikoitustyyppisestä sovelluksesta siinä, että sen on seurattava annettua ajorataa tarkasti niin, että tietynä ajanhetkenä ollaan aina tietyssä halutussa pisteessä rataa. Tällaista sovellusmallia on käytetty jo pitkään esimerkiksi laserleikkauksessa tai numeerisesti ohjatussa jyrsinnässä. Laserleikkauksovellukset ovat yleensä ruuvivetoisia ja siksi melko hitaita. Paikoitussovellukset ovat puolestaan nopeita, mutta nimensä mukaisesti ne vain liikkuvat paikasta toiseen, eikä käytettävällä radalla ole merkitystä lopputuloksen kannalta. Tässä työssä käsiteltävässä koelaitteessa yhdistyvät siis nämä kaksi tekniikkaa; Tarkoituksena on saada aikaan nopea liikkeenohjauskäyttö.

ABB Oy on lanseerannut markkinoille uuden erityisesti liikkeenohjaukseen tarkoitetun taajuudenmuuttajan. ACS M1 - nimeä kantava laite on suunniteltu nimenomaan liikkeenohjausjärjestelmän osaksi ja sen avulla voidaan ohjata sekä induktiomootoreita, että kestopagneettitahtikoneita. ACS M1 perustuu suoraan vääntömomentin säätömenetelmään (DTC), kuten sen teollisuuskäyttöihin suunnitellut edeltäjänsä, mutta suuria muutoksia on tehty taajuudenmuuttajan ulkoisiin liitäntöihin ja ohjelmistopuolelle, joissa on siirrytty modulaariseen toteutukseen.

Tässä työssä tarkastellaan lineaarisen liikkeenohjauksen mitoituksen, käyttöönottoon ja käyttöön liittyviä asioita, sekä tutkitaan koelaitteen rajoituksia ja soveltuvuutta pakkauslinjasovelluksiin. Tarkoituksena on selvittää, voidaanko lineaarisella portaalirobotilla korvata melko hitaita ja raskaita nivelrobotteja yksinkertaisissa pakkaussovelluksissa ja näin nopeuttaa pakkauslinjan toimintaa, sekä kuinka hyvin taajuudenmuuttaja toimii servokäyttönä.

1.1 Työn tavoite

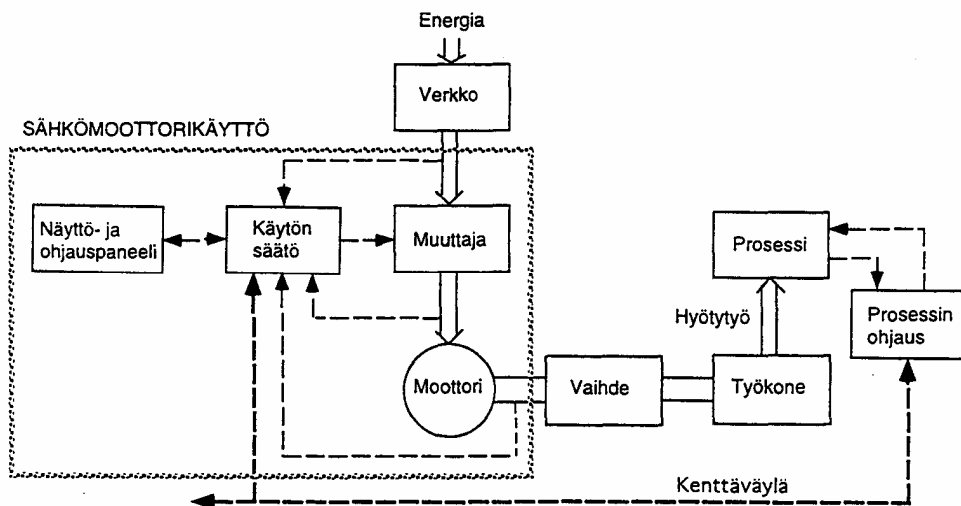
Työn tavoite on tarkastella liikkeenohjaukseen tarkoitetun koelaitteiston rakennetta sekä arvioida laitteen suorituskykyä ja pohtia sen sovellusmahdollisuuksia. Työssä tarkastellaan aluksi yleisesti liikkeenohjausjärjestelmiä ja niiden keskeisimpiä osia sekä käydään läpi kestopagneettitahtikoneiden ja kenttäväylien ominaisuuksia. Tämän jälkeen työssä keskitytään koelaitteiston rakenteeseen ja kokoonpanoprosessiin. Työssä pohditaan myös mitoituksen liittyviä asioita sekä laitteiston suorituskykyä ja sitä rajoittavia tekijöitä. Työn loppuosa keskittyy koelaitteelle suoritettuihin mittauksiin ja niistä saatuihin tuloksiin sekä pohtimaan koelaitteen soveltuvuutta teollisuuskäyttöön.

2 LIIKKEENOHJAUSKÄYTÖT

Servokäytöksi kutsutaan sellaista sähköistä, hydraulista tai pneumaattista erittäin suorituskykyistä paikansäätöjärjestelmää, joka perustuu nopeus- ja paikkatiedon takaisinkytkentään ja jossa on monipuoliset liitynnät automaatiosovelluksia silmälläpitäen. Servokäytöt ovat tyypillisesti dynaamisia sovelluksia, joilla on kyky toimia hyvinkin laajalla toiminta-alueella ja reagoida nopeasti tilojen muutoksiin. Suuren joustavuutensa ja muokattavuutensa vuoksi sähköiset servokäytöt ovat yleistyneet jo pitkään muiden servokäyttöjen kustannuksella, mutta perinteisesti sähköiset servojärjestelmät on toteutettu niin sanottujen servovahvistimien avulla. Liikkeenohjaukseen käytetään tyypillisiä sähköisiä servokäyttöjä. Kehityksen myötä teollisuuskäyttöön tarkoitettujen taajuudenmuuttajien edelleen kehitetyistä versioista on tullut potentiaalisia kilpailijoita perinteisille servovahvistinjärjestelmille. Tässä kappaleessa keskitytäänkin hajautetun taajuudenmuuttajaohjatun liikkeenohjauksen tarkasteluun.

2.1 Rakenne ja ohjaus

Liikkeenohjauksen pääosat ovat moottorit, säätö- ja ohjauslaitteet, työkone, erilaiset mittalaitteet ja tiedonsiirtojärjestelmät. Kuvassa 2.1 on esitetty tällaisen käytön rakennekaavio.



Kuva 2.1 Sähkömoottorikäytön periaatekaavio (Niiranen, 1999).

Käytännössä liikkeenohjausjärjestelmän ohjaus ja säätö toteutetaan jollakin ylemmän hierarkiatason laitteella kuten teollisuustietokoneella. Perinteisesti liikkeenohjaussovellukset ovat teollisuudessa toteutettu servovahvistinten ja tietokoneen avulla. Taaju-

denmuuttajia voidaan teoriassa käyttää itsenäisesti siten, että yksi muuttajista valitaan isäntälaitteeksi, joka lähettää käskyt muille laitteille. Taajuudenmuuttajan tärkein etu servovahvistimeen nähden on se, että taajuudenmuuttaja on itsenäinen laite, eikä näin ollen välttämättä tarvitse ylemmän hierarkiatason ohjausta, vaan se voi suorittaa yksinkertaisia automaatiotehtäviä itsenäisesti.

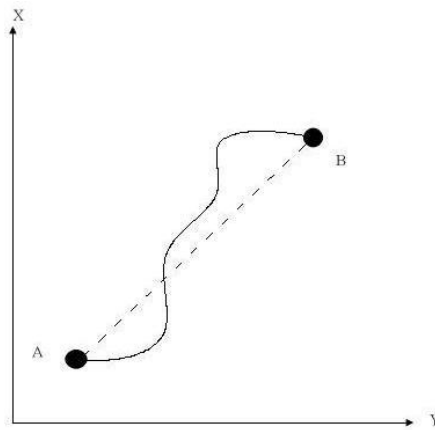
Liikkeenohjauksen säätö voi kuitenkin muodostua hyvin monimutkaiseksi johtuen laitteiston epälineaarisuuksista ja dynamiikasta. Tämä vaikeuttaa säädön toteuttamista pelkän taajuudenmuuttajan avulla. Tutkittavassa liikkeenohjausjärjestelmässä käytetään dSpace-laitteistoa säädön ja ohjauksen toteuttamiseen. Taajuudenmuuttajien rooliksi jää halutun vääntömomentin toteuttaminen, sekä kommunikointirajapintana toimiminen. On kuitenkin huomattava, että mikäli säätö olisi mahdollista toteuttaa taajuudenmuuttajassa, saataisiin järjestelmän viiveet minimoiduksi.

2.2 Reaaliaikaisuus ja kenttäväylät

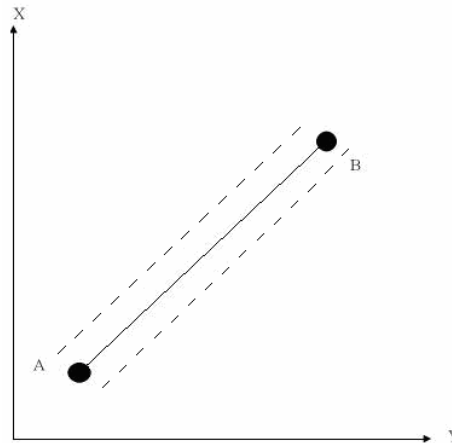
Reaaliaikaisuus moniakselisissa liikkeenohjauksikäytöissä ei ole kovin yksiselitteinen asia. Asiaa voidaan paremminkin tarkastella suorituskykyvaatimusten kannalta. Tiedonsiirron aikatasovaatimukset muodostuvat pääasiassa niistä reunaehdoista, jotka ratatarkkuus ja liikenopeus määräävät. Riippuen suoritusten nopeudesta ja tarkkuusvaatimuksista liikkeenohjauksikäytöissä, tiedonsiirtonopeuden vaatimukset voivat olla hyvin tiukat. Mikäli laite toimii pelkästään paikkasäädettynä, toteuttaa se oman paikkaohjeensa riippumatta muiden akselien virhe- tai poikkeamatiedoista. Tällainen järjestelmä on yleensä hajautettu eli paikka- ja nopeussäätö on toteutettu taajuudenmuuttajilla. Ylemmältä hierarkiatasolta saadaan ainoastaan referenssit sekä liipaisusignaalit. Hajautetulla järjestelmällä pystytään toteuttamaan myös rataohjetta. Taajuudenmuuttajat tulisi tällaisessa tapauksessa pystyä synkronoimaan keskenään käyttämällä esimerkiksi virtuaaliakselia (virtual master axis). Virtuaaliakselilla tarkoitetaan keskitettyä signaaligeneraattoria, joka generoi paikkaohjeen kaikille akseleille. Käytännössä virtuaaliakseli sijaitsee yhdessä taajuudenmuuttajassa. Liikkeenohjauksessa kaikkien akselien on seurattava jatkuvasti tarkkaa liikerataa, jolloin pienikin virhe yhdellä akselilla johtaa radan muuttamiseen. Näin ollen liikkeenohjauksessa ajatellen, reaaliaikaisuus on välttämätöntä riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi. Rataohjeella ajettaessa paikka- ja nopeussäätö tapahtuu kuitenkin yleensä ylemmältä hierarkiatasolta, jolloin kyseessä on keskitetty järjestelmä. Synkronointi tapahtuu erillisen synkronisen kellopulssin avulla. Kenttäväylä asettaa

kaikkien siihen kytkettyjen laitteiden kellot synkroniseen aikaan, jonka jälkeen pulssit saapuvat kaikille laitteille yhtä aikaa. Tällaisessa järjestelmässä rataohje generoidaan jokaiselle akselille toteutuneen radan perusteella ja näin pyritään varmistamaan, että säätö toteuttaa halutun radan.

Liikkeenohjaukset ovat yleensä hyvin nopeita. Liikkeenohjauksen tarkkuus määritellään rata-avaruuden avulla. Rata-avaruus määrittelee sallitut virherajat dynaamisessa tilanteessa. Kuvassa 2.2 on esitetty periaatekuva liikeradasta ja syntyvästä dynaamisesta virheestä. Kuvassa 2.3 on puolestaan havainnollistettu rata-avaruuden käsite.



Kuva 2.2 Kaksiakselisen liikkeenohjauksen kuvitteellinen rata paikasta A paikkaan B. Kiinteä käyrä kuvaa tilannetta, jossa akselit eivät pysty kommunikoimaan reaaliaikaisesti ja dynaaminen virhe pääsee syntymään. Katkoviivalla esitetty liikerata on toivottu. Kaksiulotteisessa kuvassa ei voida esittää aikaa, mutta kullekin katkoviivan pisteelle tulisi vielä esittää ajankohdat.

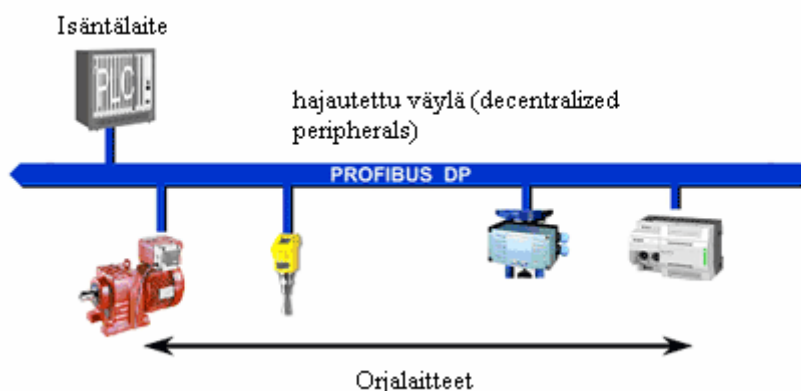


Kuva 2.3 Kaksiulotteinen rata-avaruus. Radan halutaan kulkevan kiinteää viivaa pitkin pisteestä A pisteeseen B. Tällöin kuvassa olevat katkoviivat määrittelevät sallitun rata-avaruuden, jonka sisällä radan on kuljettava täyttääkseen tarkkuusvaatimukset.

Esimerkkinä voitaisiin tarkastella tilannetta, jossa kolmen akselin järjestelmä liikkuu rataa pitkin nopeudella 5 m/s. Leikkaussovelluksessa ratatarkkuusvaatimuksen voidaan olettaa olevan noin 1 mm. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli akseleilla tapahtuu ratapoikkeama, pitäisi tarvittavan tiedonsiirron ja säädön tapahtua alle 200 mikrosekunnissa, jotta ratatarkkuus säilytetään. Hajautetussa järjestelmässä säädön nopeus riippuu virtuaaliakselin nopeussäätimen aikatasosta. Keskitetyssä järjestelmässä säädön hitaus aiheuttaa omat rajoitteensa. Järjestelmissä, joissa on suuria hitausmassoja, mekaaniset aikavakiot muodostuvat suuriksi. Tämä aiheuttaa rajoitteita säädön toteuttamisnopeuteen.

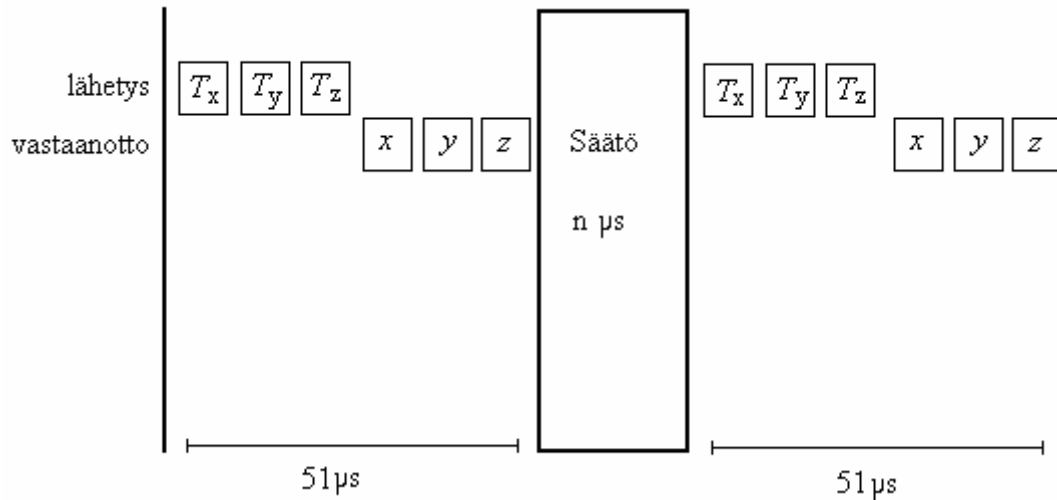
Kenttäväylä on tyypillinen kommunikointikanava teollisuusautomaatio-sovelluksissa. Kenttäväylien tarkastelun tekee hankalaksi se, että niille ei ole olemassa yhtä yhtenäistä standardia, vaan eri tavoin standardoituja kenttäväyliä löytyy ainakin kymmeneltä eri valmistajalta. Kenttäväyläratkaisut kehitettiin korvaamaan analogisia 4...20 mA kommunikointijärjestelmiä. Kenttäväylä on analogista järjestelmää kompaktimpi ja edullisempi kokonaisuus. Lisäksi sen ominaisuudet ovat huomattavasti monipuolisemmat ja siirtonopeudet suuremmat. Sähkökäyttöjen synkronisen kommunikoinnin tulee täyttää tiettyjä erityisvaatimuksia. Väyläprotokollan on pystyttävä siirtämään prosessidataa syklistä reaaliajassa ja diagnostiikkadataa asyklisesti sekä tuettava isäntäseuraajakommunikointia ja seuraajalaitteiden synkronointia. Tämän lisäksi väylillä on oltava riittävän korkea häiriönsietokyky. (Lin & al. 2000)

Kenttäväylä on ylemmän rajapinnan digitaalinen kommunikointiväylä, joka soveltuu sekä nopeisiin aikakriittisiin tehtäviin, että monimutkaisempaa rakennetta vaativiin kommunikaatiotehtäviin. Profibus-kenttäväylä on yleisin kenttäväylätyyppi eurooppalaisissa teollisuussovelluksissa. Profibus DP (decentralized peripherals, hajautettu käyttö) on Profibusin kenttäväyläprotokolla, josta on julkaistu kolme versiota. Ensimmäinen versio (V0) perustuu lähinnä sykliseen tiedonsiirtoon. V0-moduuli sisältää protokollan mukaiset perusosat: tiedonsiirron, asema-, moduuli- tai kanava-kohtaisen diagnostiikan sekä neljä erilaista keskeytystyyppiä. Seuraavassa versiossa (V1) on protokollaa kehitetty entistä paremmaksi, ottaen huomioon prosessiautomaation tarpeet. Suurin muutos on asyklinen tiedonsiirto, joka parantaa väylän tiedonsiirtonopeutta huomattavasti. Lisäksi V1-moduuli sisältää kolme uutta keskeytysalgoritmia aikaisempaan versioon nähden. V1-moduuli soveltuu älyä sisältävien kenttälaitteiden ohjaukseen. Uusin V2-moduuli on reaaliaikaominaisuuksiltaan kaikkein kehittynein. Se on kehitetty erityisesti uusien sähkökäyttöjen vaatimuksia ajatellen. Erityisesti seuraajalaitteiden välinen kommunikointi (slave-to-slave communication) V2-moduulissa parantaa väylän synkronointiominaisuuksia. Tiedonsiirtonopeus voi Profibus-väylässä olla jopa 12 Mbit/s ja jaksonaika lyhimmillään 250 μ s. (Profibus, www.profibus.com) Hajautetussa järjestelmässä servo-moottorikäytön nopeussäädön aikataso ratkaisee. Väylän nopeuden perusteella voidaan päätellä, ettei Profibus V2-väylä säädön nopeudesta riippumatta pysty esimerkkitapausta toteuttamaan. Nopeus, jolla haluttu ratatarkkuus pysyy alle 1 millimetrissä, riippuu siis nopeussäädön aikatasosta. Jo pelkkä tiedonsiirto rajoittaa maksiminopeuden alle 2 m/s. Hajautetun Profibus-väylän periaate on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4 Esimerkki hajautetusta Profibus-kenttäväylästä (www.profibus.com)

Profibus-kenttäväylän lisäksi ainakin Sercos-väylät ovat yleistymässä liikkeenohjauskäytöissä. Sercos-väylästä on myös julkaistu kolme versiota: Sercos I, Sercos II ja Sercos III. Versioiden I ja II ainoa oleellinen ero on tiedonsiirtonopeus. Version I nopeus on 2 tai 4 Mbit/s ja version II nopeus 2, 4, 8 tai 16 Mbit/s. Versiot I ja II käyttävät tiedonsiirtoon valokuitua, kun taas versiossa III on käytössä myös Ethernet-liityntä, jonka ansiosta tiedonsiirtonopeus voi olla jopa 100 Mbit/s. Sercos-väylissä on erittäin hyvät synkronointiominaisuudet, sillä väylät ovat alun perin suunniteltu liikkeenohjauskäyttöjä varten. Jaksonajat ovat myös hyvin lyhyitä; versioissa I ja II jaksonaika on lyhimmillään 62,5 μ s ja versiossa III 31,25 μ s, kun väylällä on korkeintaan kahdeksan laitetta. Todellinen jakson pituus määräytyy kuitenkin kenttäväylien tapauksessa liitettävien laitteiden määrästä ja lähetettävän datapaketin koosta. Sercos III-väylän tapauksessa jokaisen lähetyksen yhteydessä tarvittava oheisdata vie noin 45 tavua eli 360 bittiä, jonka lisäksi säätötavasta riippuen tarvitaan 8 tai 12 tavua ohjeiden lähetykseen ja luentaan. Hajautetussa käytössä, jota ohjataan vääntömomenttiohjeella riittää 8 tavua ja keskitetyssä paikkasäädetyssä järjestelmässä tarvitaan 12 tavua. Näin ollen 100 Mb/s väylänopeudella edestakainen 8-12 tavun ohjeen lähetys kolmelle seuraajalaitteelle kestää 25,5-27,5 μ s. Sercos III-väylä suoriutuisi esimerkkitapauksen mukaisesta tilanteesta tiedonsiirron osalta hieman yli 100 μ s:ssa. (Sercos, www.sercos.com, 05.02.2008). Näin ollen säädön tulisi tapahtua esimerkkitapauksen kannalta noin 100 μ s:ssa. Keskitettyä järjestelmää tarkasteltaessa on otettava huomioon, että säätörakenne on hajautettua järjestelmää raskaampi ja siksi myös hitaampi. Keskitetyn järjestelmän säätö toteutetaan erillisessä isäntälaitteessa, kuten teollisuustietokoneessa. Esimerkin tilannetta keskitetyssä järjestelmässä on havainnollistettu kuvassa 2.5.



Kuva 2.5 Esimerkkitalanteen ajoituskaavio Sercos III-väylän tapauksessa keskitetyssä säädössä. Kuvassa T on vääntömomenttiosioje ja x,y,z akselien paikkatiedot.

Voidaan todeta, että säädön aikataso keskitetyssä järjestelmässä voi olla kenttäväylän aikatasoa ratkaisevampi tekijä. Hajautetussa järjestelmässä sen sijaan hidas kenttäväylä hidastaa koko järjestelmää yksittäisten säätimien ollessa nopeita.

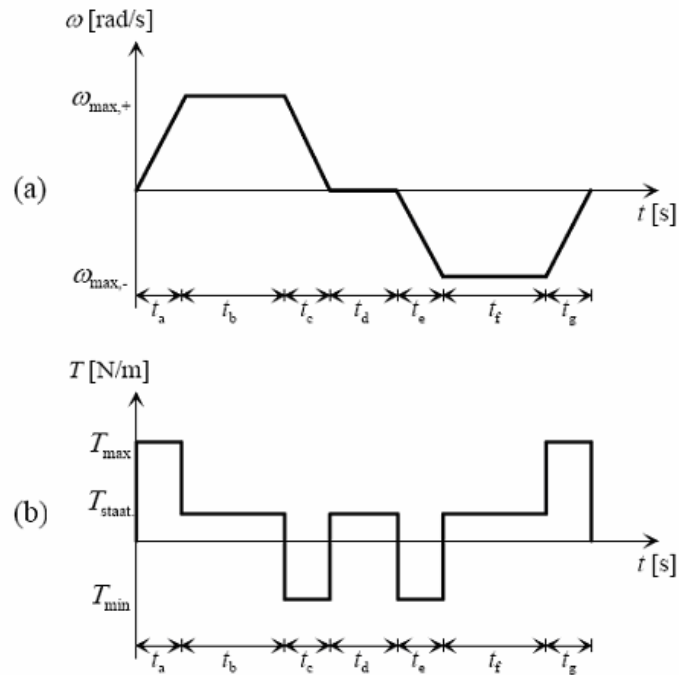
Taulukossa 2.1 on vielä esitetty lyhyt vertailu muutamista teollisuusmuuttajien tukemista väyläratkaisuista.

Taulukko 2.1 Kenttäväylävertailu

Laite	Topologia	Nopeus	Johdotus	Liitettävien laitteiden maksimimäärä
Profibus DP	väylä	12 MB/s	2	127
DeviceNet	väylä	500 kb/s	4	64
CANopen	väylä	1 MB/s	2	64
Industrial Ethernet	väylä	max. 1GB/s	valokuitu	1024
Sercos III	rengas/ väylä	100 MB/s	valokuitu	254

2.3 Suorituskyvyn reunaehdot

Servokäytön tai tarkemmin liikkeenohjauksen suorituskykyä voidaan arvioida työkierron suoritusajan perusteella. Kuvassa 2.6 on esitetty tyypillinen servokäytön työkierto, joka pätee myös tässä työssä tarkasteltavalle laitteistolle. Kuvasta nähdään, ettei käyttö ole jatkuvaa, mikä antaa mahdollisuuden kuormittaa moottoria reilusti yli nimellispisteen kiihdytysvaiheessa. Nimellispiste riippuu myös koneen leimatusta käyttötavasta. Ylikuormitettavuus on siis voitu osittain ottaa huomioon jo ilmoitettuna käyttötapana (S1, S2 ...). Esimerkiksi servokäyttöön suunniteltu kestopagneettitahtimoottori pystyy hetkellisesti tuottamaan 2 - 5 -kertaisen vääntömomentin nimellisarvoonsa nähden. Työkierron suoritus aika määräytyy laitteen kiihtyvyyden ja nopeuden perusteella. Kiihtyvyys on usein määräävä ominaisuus, koska radat ovat melko lyhyitä, eivätkä vakionopeusalueet ole merkittäviä. Nopeusohje on yleensä trapetsimuotoinen, mutta vääntömomenttiohje ei käytännössä voi olla askelmainen, vaan sitä on pyöristettävä. Lineaarisen laitteen kiihtyvyyden määrää voima, jonka akselistolle voi tuoda vaurioittamatta sitä tai siihen kytkettyä laitteiston osaa tai toimilaitetta. Paikoitus- tai liikkeenohjauslaitteistolle on hankalaa löytää taulukoituja suoritusarvoja, sillä laitteistojen vaatimukset ovat voimakkaasti sovellusriippuvaisia. Sen sijaan laitteiston säätöä voidaan tarkastella myös kirjallisuudesta ja standardeista löytyvien ohjeiden pohjalta.



Kuva 2.6 Periaatteellinen servokäytön työkierto (Andersson, 2000). Kohdassa a) on esitetty kulmanopeusprofiili ja kohdassa b) vääntömomenttiprofiili, joissa t_a ja t_e ovat kiihdytysaikoja, t_b ja t_f vauhtinopeusaikoja, t_c ja t_g jarrutusaikoja, sekä t_d lepoaika.

Paitsi nopeus, myös tarkkuus on tällaisen laitteiston suorituskyvyn arvioinnin peruste. Tarkkuus ilmoitetaan usein toistotarkkuutena. Useimmilla liikkeenohjauslaitteistojen valmistajilla on näkyvillä ainoastaan toistotarkkuudet. Tämä on seurausta siitä, että toistotarkkuudella on suurempi merkitys lopputuloksen kannalta. Linearijohteille puolestaan luvataan mekaaniseksi tarkkuudeksi 0,01–0,1 mm riippuen siitä, onko johde ruuvi- vai hammashihnavetoinen. Varsinainen suoritustarkkuus määritellään erikseen paikointitarkkuutena ja ratatarkkuutena, jota käsiteltiin kappaleessa 2.2.

Suoritustarkkuus riippuu osin myös käytetystä anturoinnista. Tarkkuuteen vaikuttaa esimerkiksi takaisinkytkennän sijainti laitteistossa. Yleisesti takaisinkytkentä sijoitetaan moottorin akselille, mutta se on mahdollista sijoittaa myös kuorman puolelle. Joissain tapauksissa voidaan käyttää anturia sekä moottorilla, että kuormalla. Mikäli anturi on sijoitettu moottorin akselille, se ei pysty huomioimaan mekaniikassa aiheutuvia virheitä.

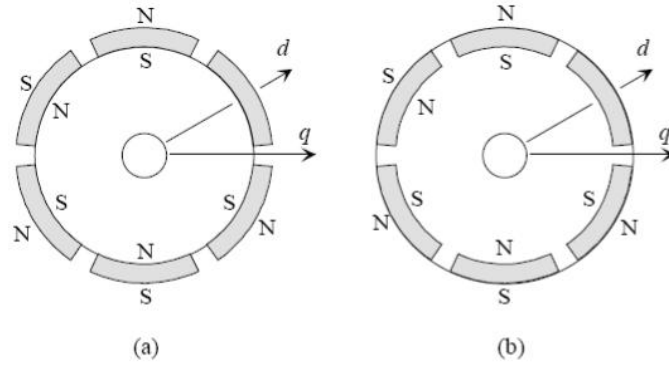
2.4 Kestomagneettitahtikoneet servomoottoreina

Liikkeenohjaukseen moottorilta vaaditaan pientä hitausmassaa, jotta systeemin dynamiikka olisi hyvä sekä erittäin tasaista, väreetöntä vääntömomenttia. Tämän tyyppiseen servokäyttöön moottoriksi soveltuvat parhaiten moninapaiset – yleensä 6 – 10 – napaiset - kestoplaneettitahtimoottorit (PMSM, permanent magnet synchronous motor), joissa on käytetty pintamagneetteja, mikä tuottaa pienet tahti-induktanssit ja siten suuren ylikuormitettavuuden. Moninapaisuus johtaa ohueen roottorin selkään, mikä pienentää hieman koneen hitausmomenttia ja mahdollistaa roottorin jäähtymisen sisältäpäin ilman erillistä tuuletinta. Taulukossa 2.2 on vertailtu PM-servokoneiden hitausmassoja vastaavien induktioservomoottoreiden hitausmassoihin. Voidaan huomata, että kestoplaneettirakenne on induktiokoneen roottorirakennetta kevyempi, vaikka kestoplaneettimateriaalit ovat lähes yhtä raskaita kuin rauta. NdFeB-materiaalin tiheys on $7,6 \text{ g/cm}^3$ ja raudan tiheys on $7,8 \text{ g/cm}^3$. (Neorem, 2008)

Taulukko 2.2 Hitauksmassojen vertailu induktioservomoottoreiden ja PM-servomoottoreiden välillä. Tähdellä (*) merkitty kone kuuluu koelaitteistoon.

Konetyyppi	Valmistaja	Teho [kW]	Hitausmomentti [kgm^2]
Induktio	Lenze	4,1	0,0036
Induktio	Bosch-Rexroth	4,4	0,019
PMSM	Lenze	4,6	0,001
PMSM	ESR *	4,08	0,00158

Nykyisissä kestoplaneettikoneissa käytetään NdFeB-magneetteja. Kestoplaneettimateriaaleille on ominaista pieni suhteellisen permittiivisyyden arvo, joka aiheuttaa koneisiin melko suuren efektiivisen pitkittäisen ilmavälin. Tästä syystä kestoplaneettikoneiden induktanssit ovat tyyppillisesti pienet. Kuva 2.7 havainnollistaa pintamagneettimoottorin rakennetta. Kuvasta voidaan myös nähdä, että umpinapaisella koneella efektiivinen ilmaväli on lähes yhtä suuri pitkittäisessä ja poikittaisessa suunnassa, kun taas avonaparakenteessa poikittainen ilmaväli on pitkittäistä lyhyempi. Uppomagneettiroottori edustaa puolestaan ns. käänteistä avonapaisuutta, jossa poikittaisakselin induktanssi on pitkittäisakselin induktanssia suurempi.



Kuva 2.7. Pintamagneetikoneen poikkileikkauskuvat (Heikkilä, 2002). Kohdassa a) on esitetty umpinaparakenne ja kohdassa b) avonaparakenne.

Pintamagneetikoneen magneetit voidaan kiinnittää useammalla erilaisella menetelmällä, kuten liimaamalla, käyttämällä lasikuitupantoja tai austeniittisia teräsvöitä. Nopeasti pyörivässä koneissa pelkkä liimaus ei välttämättä riitä, jos kehänopeus muodostuu suureksi. Tällöin voidaan lisäksi käyttää esimerkiksi lasikuitupantaa magneettien kiinnitykseen. Lasikuitu soveltuu hyvin nopeasti pyöriviin koneisiin, koska se on eriste, eikä siihen näin ollen pääse syntymään pyörrevirtoja. Tässä työssä käsiteltävän koelaitteiston moottoreiden nimelliset pyörimisnopeudet ovat 3000 tai 6000 rpm, ja niiden magneetit on kiinnitetty pelkästään liimaamalla.

Kestomagneetikoneiden jänniteyhtälöt roottorikoordinaatistossa ovat (Luukko, 2000)

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega \psi_{sq} \quad (2.1)$$

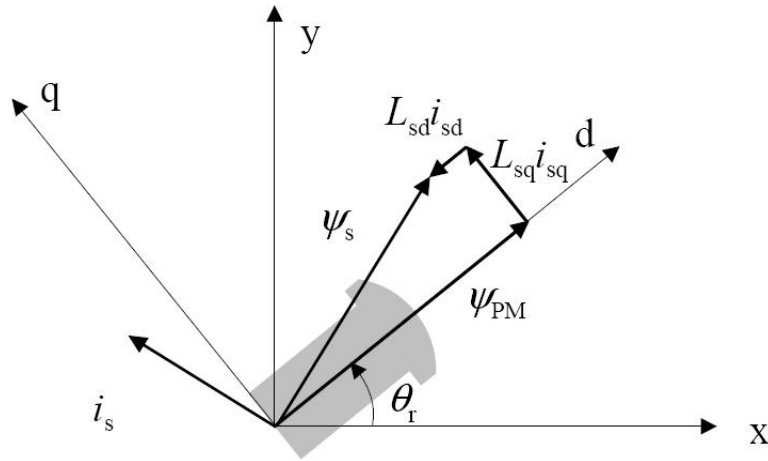
$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega \psi_{sd} \quad (2.2)$$

Yhtälöissä u_s on staattorin jännite, R_s staattorin resistanssi, i_s staattorin virta, ψ_s staattorin käämivuo ja ω koneen sähköinen kulmanopeus. Staattorisuureet ovat reduoitu roottorikoordinaatistoon. Vaimennuskäämiyhtälöt on voitu jättää pois, sillä kesto-
magneettitahtikoneissa ei yleensä käytetä erillisiä vaimennuskäämejä ja magneettien pyörrevirrat ovat niin heikkoja, ettei niillä ole käytännössä vaimennusvaikutusta. Jänniteyhtälöissä esiintyvät käämivuot voidaan puolestaan kirjoittaa muotoon

$$\psi_{sd} = L_{sd}i_{sd} + \psi_{PM} \quad (2.3)$$

$$\psi_{sq} = L_{sq}i_{sq} \quad (2.4)$$

Yhtälöissä L_s on staattorin induktanssi ja ψ_{PM} kestopagneettien tuottama käämivuo. Yhtälöitä 2.1–2.4 voidaan käyttää apuna kestopagneettitahtikoneen osoitinpiirroksen muodostamisessa (kuva 2.8).



Kuva 2.8. (Pyrhönen, 2005a) Kestomagneettitahtimoottorin vektoripiirros. Kuvassa on esitetty sekä staattorikoordinaatiston (xy) akselit, että roottorikoordinaatiston (dq) akselit.

Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentille pätee yhtälö (Luukko, 2000)

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_{PM} i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] \quad (2.5)$$

Yhtälössä p on koneen napapariluku, i_{sd} ja i_{sq} avaruusvektoriteorian mukaiset staattorin virtakomponentit ja, L_{sd} ja L_{sq} staattori-induktanssin komponentit. Lausekkeen ensimmäinen osa kuvaa kestopagneettien tuottamaa vääntömomenttia ja induktanssierosta riippuva osa ns. reluktanssivääntömomenttia. Pienen induktanssieronsa vuoksi pinta-magneetein varustettu kestopagneettitahtimoottori ei tuota juuri lainkaan reluktanssivääntömomenttia. Toisin sanoen staattorin induktanssi on lähes yhtä suuri pitkittäis- ja

poikittaissuunnassa. Jos induktanssitermi menee nolllaksi, vääntömomentin yhtälö supistuu muotoon

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_{PM} i_{sq} \quad (2.6).$$

Yhtälöstä 2.6 voidaan huomata, ettei staattorivirran pitkittäiskomponentti osallistu vääntömomentin tuottoon. Vaikka induktanssisuhde poikkeaa hieman ykkösestä, voidaan olettaa, ettei induktanssien ero vaikuta merkittävästi vääntömomentin tuottoon johtuen pienistä staattorin induktanssin arvoista.

Kuten kuvasta 2.6 voidaan nähdä, servokäyttö vaatii moottorilta suuren hetkellisen vääntömomentin kiihdytys- ja jarrutusvaiheissa. Suurin hetkellinen vääntömomentti, jonka moottori pystyy tuottamaan, riippuu tahtikoneen tehokulmayhtälön mukaisesti erityisesti moottorin pitkittäisestä tahti-induktanssista L_d . (Heikkilä, 2002)

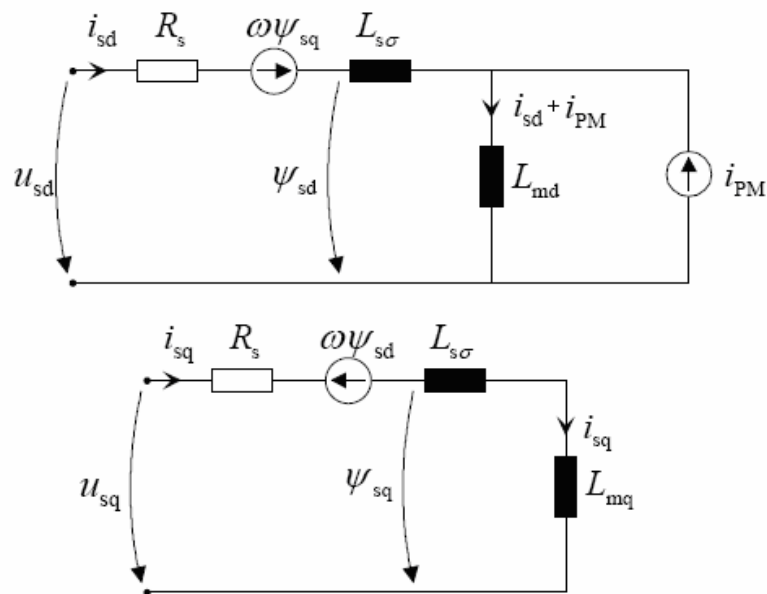
$$T_e = \frac{3p}{\omega^2} \left(\frac{U_s E_{PM}}{L_d} \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \sin 2\delta \right) \quad (2.7)$$

Yhtälössä T_e on sähköinen vääntömomentti, p napapariluku, ω kulmataajuus, U_s staattorijännite, E_{PM} kestomagneettien tuottama vastasähkömotorinen voima, ja δ tehokulma. Servomoottorin pitkittäinen tahti-induktanssi voi olla suhdearvona luokkaa 0.2. Kestomagneetikone pystyy siis tuottamaan suuren hetkellisen vääntömomentin ja soveltuu senkin vuoksi erinomaisesti servomoottoriksi. Pienet induktanssit arvot vaativat myös riittävän suuren kytkentätaajuuden, jotta moottorin virrat saadaan käyttäytymään toivotulla tavalla. (Pyrhönen, 2005a) Esimerkkejä PMSM:n tahti-induktansseista on esitetty taulukossa 2.3.

Taulukko 2.3 PM-servomootoreiden pitkittäisen tahti-induktanssin arvoja (Naumanen, 2006). Arvot on selvitetty tyhjäkäyntikokeen avulla. Koneet ovat tehoiltaan 3 – 5 kW.

Valmistaja	L_d [mH]	L_d [pu]
ABB	3,54	0,15
ATS	7,06	0,35
Bosch-Rexroth	6,66	0,29
Faurndau	4,14	0,22
Lenze	3,88	0,21
Parvex-Eurodrive	5,22	0,27
SEW	5,84	0,33
Siemens	6,54	0,47

Koska kestopagneettimootorin roottorissa on vain vähän rautaa, on sen rakenne kevyt ja hitausmassa pieni. Kevyt roottori mahdollistaa erittäin hyvät dynaamiset ominaisuudet. Moottorin dynaamisia ominaisuuksia voidaan arvioida sähköisen ja mekaanisen aikavakion avulla. Näistä suurempi arvo määrää moottorin dynamiikan. Moottorin sähköistä aikavakiota voidaan tarkastella sijaiskytkentöjen avulla. Kuvassa 2.9 on esitetty kestopagneettitahtimootorin yksivaiheiset sijaiskytkennät d- ja q-suunnissa. Sijaiskytkennät esitetään erikseen pitkittäis- ja poikittaissuunnissa, jotta moottorin magneettinen epäsymmetria pystytään ottamaan huomioon. (Pyrhönen, 2005a). Kuten jo aiemmin todettiin, servokäyttöön tarkoitetuissa kestopagneettimootoreissa ei yleensä käytetä vaimennuskäämejä. Tästä syystä vaimennusvaikutusta ei myöskään esitetä sijaiskytkennöissä.



Kuva 2.9 Kestomagneettitahtimootorin sijaiskytkennät. Ylempi kuva edustaa pitkittäissuuntaista (d-) sijaiskytkentää ja alempi kuva poikittaista (q).

Sähkökoneen poikittaisakselin virtaa voidaan muuttaa poikittaisakselin aikavakion määrittämällä nopeudella.

$$\tau_e = \frac{L_q}{R_s} \quad (2.8)$$

Yhtälössä 2.8 poikittainen tahti-induktanssi L_q saadaan kuvan 2.8 sijaiskytkennän avulla $L_q = L_{s\sigma} + L_{mq}$. Mekaaniselle aikavakiolle on eri määritelmiä. Servomoottorin tapauksessa mekaaninen aikavakio voidaan ratkaista moottorin akselille redusoidun hitausmassan, maksimivääntömomentin ja nimelliskulmanopeuden avulla.

$$\tau_{mec} = J \frac{\Omega_n}{T_{max}} \quad (2.9)$$

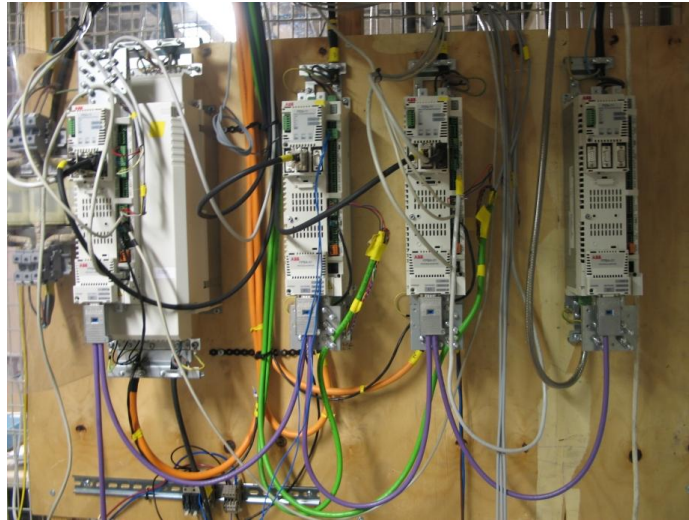
Yhtälössä J on moottorin kokonaishitausmassa, Ω_n moottorin nimellinen mekaaninen kulmanopeus ja T_{max} moottorin maksimivääntömomentti. Normaalisti mekaaninen aikavakio määritellään ajaksi, jossa moottori kiihdytetään nimellisnopeuteen nimellisellä vääntömomentilla. Servokäyttöjen tapauksessa on kuitenkin järkevämpää käyttää maksimivääntömomenttia, sillä systeemi pyritään kiihdyttämään mahdollisimman nopeasti täyteen nopeuteen. Tällainen ajotapa edellyttää, että taajuudenmuuttajan mitoituksessa on otettu huomioon moottorin virran tarve. Servokäyttöjen tapauksessa tärkein mitoitusperuste on muuttajan maksimivirta, jonka tulisi olla sama tai hieman suurempi kuin moottorin maksimi virta. Yhtälöiden 2.8 ja 2.9 perusteella lasketut aikavakiot on esitetty taulukossa 3.3 kappaleessa 3.2.

2.5 ACS M1 taajuudenmuuttaja

Koelaitteistossa tullaan käyttämään ABB:n valmistamia ACS M1-taajuudenmuuttajia. ACS M1 on tullut markkinoille vasta loppuvuodesta 2006, ja on siis aivan uusi tuote ABB:n taajuudenmuuttajaperheessä. Kuvassa 2.10 on esitetty neljä ACS M1 taajuudenmuuttajaa kytkettyinä.

ACS M1 on ABB Drives Oy:n täysin uudistettu taajuudenmuuttaja, joka soveltuu nopeus- ja vääntömomenttisäätöön, ja erityisesti liikkeenohjaukseen (motion control). ACS

M1 soveltuu niin induktiomootoreille, kuin kestopagneettitahtimootoreillekin. Muuttajan moottorisäädön toiminta perustuu suoraan vääntömomenttisäätöön (DTC, direct torque control), kuten ABB:n muissakin korkean suorituskyvyn muuttajissa.



Kuva 2.10 ACS M1 taajuudenmuuttajia. Vasemmalla oleva muuttaja on runkokooltaan C ja kolme pienempää muuttajaa ovat runkokokoa A.

ACSM1 on rakennettu modulaariseksi myös fyysisesti. Se on jaettu kolmeen itsenäiseen moduuliin: teho-, säätö- ja muistimoduuleihin. Itsenäinen muistimoduuli helpottaa laitteiden määrittelyä ja tuo joustavuutta. Muistimoduuli sisältää kaiken oleellisen tiedon parametreista ja laitteen asetuksista ja se on helposti siirrettävissä laitteelta toiselle. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että ohjelmistopäivityksien tekeminen onnistuu kerran päivityksellä. Vaikka muu laite vikaantuisi pysyvästi, on todennäköistä, että muistimoduuli säilyy ehjänä, ja näin ollen voidaan suoraan siirtyä käyttämään uutta laitetta ilman uusien parametrien määrittelyä. Myös liityntärajapinnat on rakennettu helposti vaihdettaviksi.

ACSM1:llä on useita sisäisiä ja ulkoisia liityntärajapintoja. Muuttajista löytyy vakiona digitaalisia ja analogisia tuloja ja lähtöjä, sekä yksi relelähtö lähinnä mekaanista jarrua varten.

Muuttajan etupaneelissa on kolme korttipaikkaa, johon voidaan kytkeä erilaisia säätö- ja kommunikaatiomoduuleja. Paikkoihin voidaan kytkeä esimerkiksi I/O-laajennus, takaisinkytkentärajapinta tai kenttäväylä. Takaisinkytkentärajapinta tukee FEN-sarjan lii-

tyntöjä, kuten TTL enkooderia, SinCos absoluuttianturia tai resolveja. Moduuli sisältää myös nopeampia digitaalituloja ja – lähtöjä. Kenttäväylätuki löytyy nykyisin Profibus- (V1), CANopen-, DeviceNet ja ETHERNET- kenttäväylille.

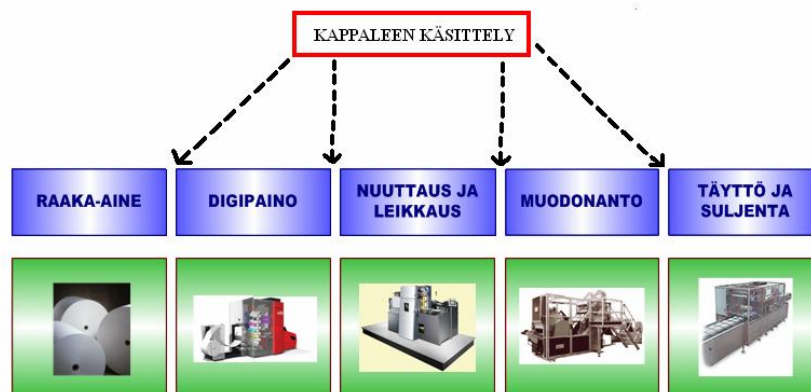
ACS M1 on uusi tuote ja sen kehityskaari on vielä kesken. Laitteeseen on suunnitteilla useita parannuksia ja laajennuksia. Suurimmat parannukset liittyvät liityntärajapintojen monipuolistamiseen. Jo aiemmin todettiin ACS M1:n tukevan Profibus V1-tyypin kenttäväylää. Liikkeenohjauksen kannalta tehokkaampien kenttäväylien kuten Sercos- ja Profibus V2 – kenttäväylien tuki on kehitteillä. Lisäksi on tulossa muuttajien välinen kommunikaatioyhteys, D2D link (drive to drive link), jolla pystytään suoraan kytkeämään useita M1-muuttajia yhteen ja synkronoimaan ne keskenään. Tällöin yksi taajuudenmuuttaja voidaan valita isäntälaitteeksi, ja laitteet voivat toimia itsenäisenä kokonaisuutena ilman kenttäväylää.

2.6 Pakkauslinjat ja liikkeenohjaus

Kartonkipakkausteollisuus on kehittynyt Suomessa viime vuosina paperiteollisuusyrityksissä yhä tärkeämmäksi osaksi yhtiöiden toimintakonsepteja. Kun hienopaperin tuotannolla kilpaileminen ei ole kannattavaa, on kehitettävä uusia markkinaideoita. Elintarviketeollisuus laajentaa yhä enemmän kartonkipakkausten käyttöä. Kartonki korvaa myös yleisesti muovina pakkausmateriaalina. Tämä on kannattavaa myös ekologiselta kannalta. Pakkausmateriaalin muuttuessa, myös pakkauslinjat vaativat muutoksia. Samalla kun linjoja on tarpeen muokata uudelle materiaalille, voidaan niiden automatisointia viedä eteenpäin. Toisaalta vanhojen kartonkipakkauslinjojen käyttämät menetelmät ovat hyväksi havaittuja, mutta soveltuvat vain todelliseen massatuotantoon heikon muokattavuutensa vuoksi.

Pakkauslinjoilla käytettäviltä laitteilta vaaditaan lyhyttä suoritusaikaa ja suurta kapasiteettia. Esimerkkinä voidaan mainita kartonkivuokkia muotoileva puristin, jonka tuotantonopeus on jopa 60 - 80 kpl/min. Laitteen suurin ongelma on se, että se kykenee valmistamaan ainoastaan yhdenlaisia tuotteita. Puristimen toiminta perustuu muottiin, joka pystyy kerralla muotoilemaan yhden vuoan valmiiksi. Stanssaus eli arkkien irtileikkaus voitaisiin suorittaa myös lineaarisella liikkeenohjausjärjestelmällä. Liikkeenohjausjärjestelmä on erittäin joustava nykyisiin stansseihin verrattuna ja sen toimintaa voidaan

ohjata ohjelmallisesti. Nykyisin stanssaus tapahtuu muotin eli muototerän avulla. Muotit ovat kalliita valmistaa ja niiden vaihtaminen on hidasta. Myös aihoiden nuuttaus voitaisiin tehdä samalla laitteella. Nuuttauksella tarkoitetaan kartonkimateriaalin taivuttamisen helpottamiseksi tehtyjä uria ja painaumia. (Karjalainen, 1982). Ongelmaksi on muodostunut lähinnä se, etteivät nykyiset liikkeenohjauskäytöt pysty riittävän suuriin tuotantokapasiteetteihin. Rajoittavia tekijöitä ovat tuotantonopeus, sekä nopeuden kasvamisen johdosta syntyvä epätarkkuus. Toisaalta nykyisillä pakkauslinjoilla on useita työvaiheita, joissa aihioita siirrellään koneelta toiselle. Nämä työvaiheet tehdään usein käsin. Liikkeenohjauslaitteistot soveltuvat erinomaisesti kappaleen käsittelyyn ja niiden avulla siirtovaiheet pystyttäisiin automatisoimaan. Kuvassa 2.11 on havainnollistettu kartonkipakkauslinjan rakennetta sekä paikkoja, joissa kappaleenkäsittelyä voitaisiin hyödyntää.



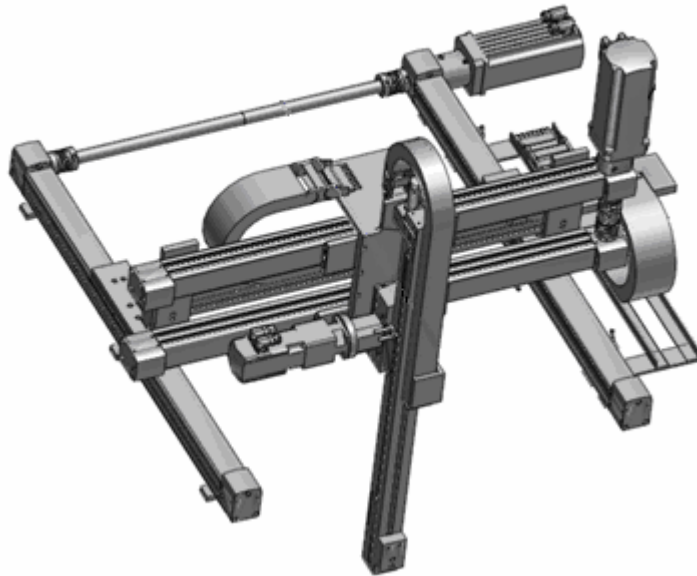
Kuva 2.11 (Kainusalmi, 2007) Pakkauslinjan rakennekaavio, jossa on havainnollistettu kappaleenkäsittelyn tarvetta linjan eri vaiheissa.

3 KOELAITTEEN RAKENNE JA MITOITUS

Tässä kappaleessa käsitellään koelaitteiston mitoittamiseen liittyviä tekijöitä sekä käydään läpi koelaitteen mekaaninen rakenne ja osat. Koelaitteen kaltaisia valmiita laitepaketteja on saatavilla muutamalta laitevalmistajalta. Koelaitteen suurin poikkeavuus valmiisiin laitteistoihin verrattuna on suoravetoiset kestmagneettitahtimoottorit ja niiden avulla saavutettava laajempi nopeusalue, sekä taajuudenmuuttajien käyttäminen servovahvistinten sijaan.

3.1 Mekaaniset osat

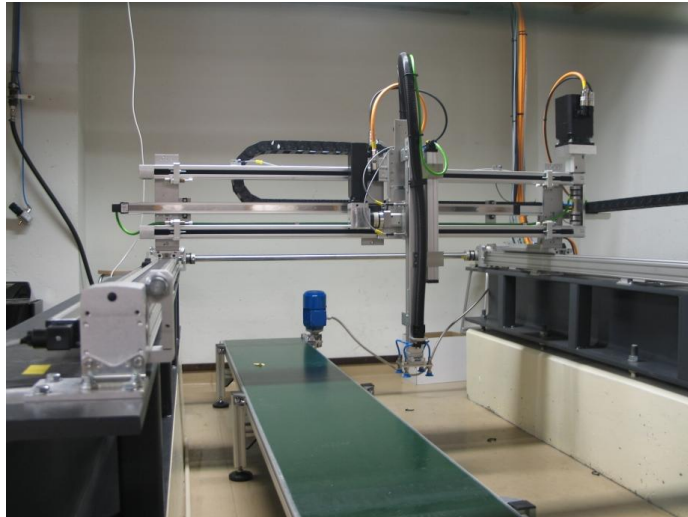
Laitteiston perusosat eli johteet ja niihin tarvittavat kiinnikkeet, ovat Festo Oy:n toimittamia. Festo Oy:n valikoimissa on useita eri kokoonpanovaihtoehtoja, mutta antamimme mitoitusarvojen perusteella päädyttiin nykyiseen ratkaisuun. Kuvassa 3.1 on esitetty laitteen rakenteen periaatepiirros.



Kuva 3.1 Koelaitteiston rakennekuva.

Laitteen runko on osin alumiinia ja osin terästä. Kuvan mukaisesti sekä x-, että y-suunnassa on kaksi johdetta, joiden välillä on teräksinen välitystanko. Välitystanko kiinnittyy johteisiin paljekylläytinien avulla. Kahden johteen käyttäminen on suoraa seurausta laitteen massoista. Mikäli laite olisi kaksiakselinen, yksi johde liikesuuntaa kohti olisi riittävä. Johteiden sisällä kulkevat hihnat ovat hammashihnoja, ja ne ovat valmistettu hiilikuituvahvisteisesta kumista. x-akselilla on käytetty leveämpää 24 mm hihnaa

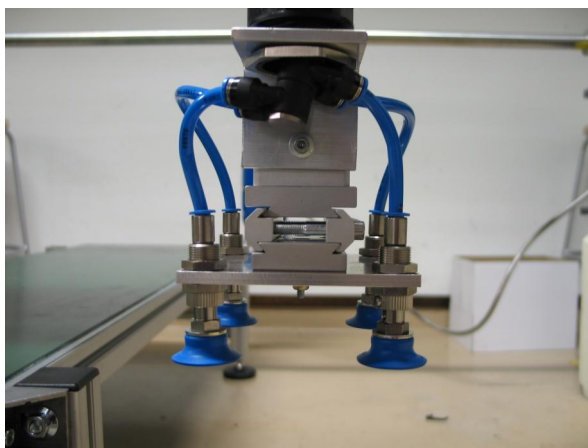
ja y-akselilla sekä z-akselilla 14 mm hihnaa. Leveämmän hihnan hammasvälipituus on 5 mm, kapeamman 3 mm. Laitekokonaisuus on sinänsä erittäin hyvin suunniteltu, sillä esimerkiksi kaapelointi on helppo toteuttaa siististi ja turvallisesti tähän tarkoitettujen ketjujen avulla. Laitekokonaisuutta täydentämään hankittiin 400 mm leveä hihnakuljettin, joka ylettyy laitteen koko pituudelle. Kuvassa 3.2 on esitetty koelaitteisto.



Kuva 3.2 Koelaitteisto

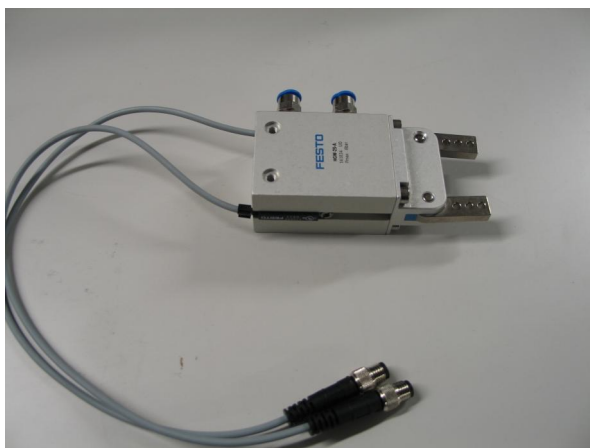
3.1.1 Pneumaattiset osat

Koelaitteeseen kuuluu myös ilmanpaineella toimiva työkalupää. Työkalupäitä on kaksi erilaista ja ne ovat Festo Oy:n toimittamia. Alipainetarttuja on imukuppinostin (kuvassa 3.3), jossa on neljä imukuppia. Nostimelle muodostetaan alipaine pienen paineilmaejektorin avulla. Paineilmaejektorilla oleva anturi ilmaisee, onko syntyneen alipaineen, eli onko tarttuja kiinni kappaleessa.



Kuva 3.3 Alipainetarttuja.

Toinen työkalupää on kulmatarttuja, joka perustuu täysin mekaaniseen mäntärakenteeseen. Tarttujalle johdetaan kahden venttiilin kautta paine vuorotellen, jolloin tarttujan leuat aukeavat ja sulkeutuvat. Kulmatarttuja on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva 3.4 Kulmatarttuja. Tarttujalla on kaksi mitta-anturia, joiden avulla voidaan tarkkailla anturin tilaa.

Molempia voidaan ohjata magneettiventtiilin avulla joko suoraan taajuudenmuuttajalla tai dSpace-laitteistolla. Magneettiventtiilin ohjausjännite on +24 VDC. Lisäksi kulmatarttujassa on omat mitta-anturit, joilla sen tilaa voidaan tarkkailla, ja joita voidaan hyödyntää ohjauslogiikan rakentamisessa.

3.2 Moottorit ja taajuudenmuuttajat

Vaikka laitteiston valmistajan pakettiin olisi kuulunut moottorit, koelaitteeseen päätettiin valita moottorit muualta. Moottoreiksi valittiin suoravetoiset kestopagneetti- moottorit. Suoravetoisuuteen päädyttiin, jotta laitteelle saatiin riittävän suuret nopeudet ja kiihtyvyydet. Vaihteiston pois jättäminen parantaa myös kokonaishyötysuhdetta sekä vaikuttaa hieman laitteen dimensioihin ja massaan. Suoravetoisen moottorin etuja vaihteelliseen moottorin verrattuna on esitetty taulukossa 3.1. Taulukossa on vertailtu x- akselin nykyisen moottorin ominaisuuksia kahden vaihteella varustetun koneen kanssa.

Taulukko 3.1 Suoravetoisen servomoottorin vertailu vaihteelliseen servomoottoriin.

	Nykyinen moottori MR 7454	MR 7442 + 1/3-vaihde	MR 7434 + 1/3-vaihde
Moottorin nopeus [rpm]	3000	3000	6000
Nopeus vaihteiston jälkeen [rpm] / [m/s]	3000 / 6,25	1000 / 2,08	2000 / 4,17
Teho [kW]	4,08	1,25	2,26
Vääntömomentti [Nm]	13	4,3 / 12,9	4,8 / 14,4
Hitausmassa [kgm ²]	0,00158	0,00028 / 0,00252	0,00016 / 0,00144

Taulukosta voidaan nähdä, että vaihteellisella koneella pystytään teho pitämään alhaisempana, eikä hitausmassasuhde pääse kasvamaan tarpeettoman suureksi. Suoravetoisuuden etuja ovat parempi hyötysuhde, suurempi saavutettava nopeus, sekä huollon tarpeen väheneminen. Lisäksi asennuksesta tulee kompaktimpi ja edullisempi, kun vaihde jätetään pois. Tässä tapauksessa suurin painoarvo oli riittävän nopeuden saavuttamisella.

Pystyakselille valittiin nopeampi moottori (6000 rpm) ja 1/3-vaihteisto, koska sen liikerata on maan vetovoiman suuntainen, ja akseli vaatii moottorilta jatkuvasti vääntömomenttia paikan ylläpitämiseksi. Samasta syystä pystyakselilla on sisäänrakennettu mekaaninen seisontajarru. x- ja y-akselien moottorit ovat kuusinapaisia pintamagneetti-moottoreita, joiden taajuus on 150 Hz ja nimellispyörimisnopeus 3000 rpm. z-akselin moottorilla napoja on myös kuusi ja moottorin taajuus on 300 Hz. Moottorit ovat teholtaan 4,08 kW (x), 1,25kW (y) ja 0,43 kW (z). Moottoreiden kilpiarvot löytyvät taulukosta 3.2. Konekoot on valittu vääntömomentin tuoton perusteella. Koska kyseessä on servokäyttö, kiinnitettiin huomio nimenomaan moottorin huippuvääntömomentin arvoon. Valitut moottorit pystyvät tuottamaan hetkellisesti nelinkertaisen vääntömomentin nimelliseen arvoonsa nähden.

Taulukko 3.2 Koelaitteiston moottoreiden kilpiarvot

		x	y	z
Vääntömomentti	T_n [Nm]	13,0	5,0	0,9
Induktiovakio	k_E [mV/rpm]	90,1	85,0	54,0
Nimelliskoosteus	n_N [rpm]	3000	3000	6000
Nimellisvirta	I_0 [A]	10,60	3,83	1,23
Nimellisjännite	U_N [V]	400	400	400
Nimellistaajuus	f_N [Hz]	150	150	300

Moottoreiden dynaamisia ominaisuuksia voidaan kappaleen 2.4 mukaan arvioida sähköisen ja mekaanisen aikavakion avulla. Taulukkoon 3.2 on laskettu moottoreiden aikavakiot yhtälöiden 2.8 ja 2.9 avulla. Sähköiset aikavakiot on laskettu käyttäen taajuudenmuuttajalla mitattuja moottoreiden parametreja. Taulukosta 3.3 voidaan nähdä, että mekaniikka määrää moottoreiden dynamiikan kaikissa tapauksissa.

Taulukko 3.3 Moottoreiden sähköiset ja mekaaniset aikavakiot

	x	y	z
τ_e [ms]	4,04	3,71	1,20
τ_{mec} [ms]	9,55	4,40	3,42

Laitteistoon tarvittiin lisäksi jarruvastuksen x- ja y-suunnan muuttajille. Jarruvastukset mitoitettiin taajuudenmuuttajien ohjeiden mukaisesti. x-akselille valittiin 26 Ω vastus ja y-akselille 150 Ω vastus. Jarruvastukset tarvittiin, koska liike-energiaa ei voi jarrutuksen aikana välipiirin kondensaattorin pienuuden vuoksi palauttaa sinne ilman ylijännitevaurioita.

Taajuudenmuuttajiksi valittiin ACS M1- sarjan muuttajat. Muuttajat valittiin siten, etteivät ne rajoita moottoreista saatavaa maksimivääntömomenttia. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että valinta tehtiin maksimivirtojen perusteella. x-akselille valittiin runkokokoa C (467 mm x 225 mm x 165 mm) oleva muuttaja, jonka jatkuvan kuormituksen nimellisvirta on 24 A. Muuttajan maksimivirta on 42 A ja moottorin 42,3 A. x-akselin

muuttaja on teholtaan 11 kW. y- ja z-akseleille valittiin runkokoon A (364 mm x 146 mm x 90 mm) muuttajat, tehoiltaan 2,2 ja 0,75 kilowattia.

3.3 Mittalaitteet

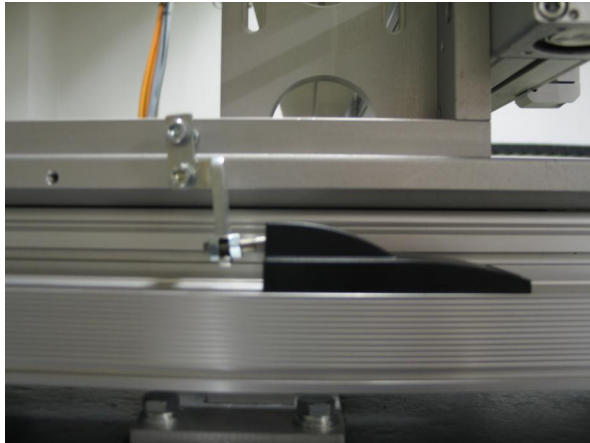
Laitteisto sisältää sekä analogisia, että digitaalisia integroituja mittalaitteita. Akselien mittausrjestelyt ovat keskenään identtisiä, joten tässä on tarkasteltu vain yhden akselin mittalaitteita.

Tärkein mitta-anturi on moottorin akselille sijoitettu absoluuttianturi. Absoluuttianturilta saadaan tietoa moottorin pyörimisnopeudesta ja roottorin asennosta. Näiden tietojen perusteella saadaan takaisinkytkentätietona kelkan paikka akselilla. Anturit ovat Heidenhainin valmistamia EQN- sarjan moottorille integroitavia absoluuttiantureita. EQN-tyypin absoluuttianturin tarkkuus on kulmasekunteina 60, joka vastaa esimerkiksi x-akselin tapauksessa johteelle redusoituna 0,0058 mm. Kuvassa 3.5 on esitetty EQN-1325 anturi, joka on käytössä x- ja y-moottoreilla.



Kuva 3.5 Heidenhain EQN-1325 absoluuttianturi (www.heidenhain.de, 07.01.2008)

Tämän lisäksi jokaisesta liikesuunnasta löytyy analogisia mitta-antureita, resistiivinen paikka-anturi, jonka tarkkuus on 0,01 mm (Festo), sekä molempiin päihin sijoitetut induktiiviset lähestymisanturit. Analogiset paikka-anturit ovat käytännössä potentiometreja, joita syötetään taajuudenmuuttajan apujännitelähdöllä. Paikka-anturit ovat mitoitettu hieman johteita pidemmiksi, jotteivät ne rajoita akselin liikerataa.



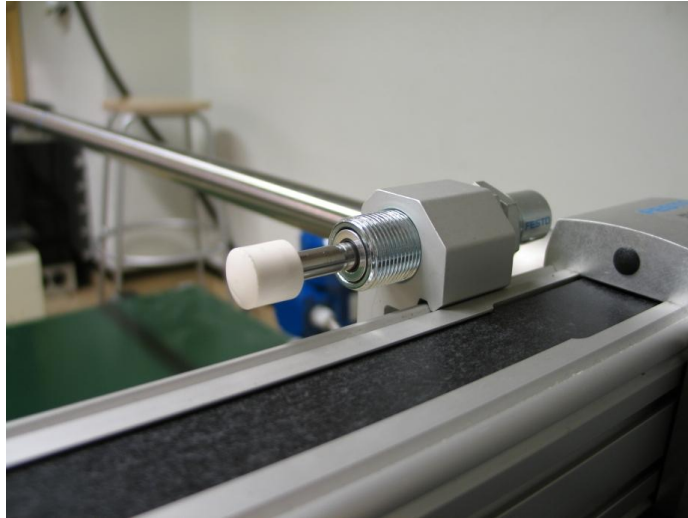
Kuva 3.6 Analoginen paikka-anturi. Anturin kelkka on kiinnitetty johteeseen.

Induktiivisia lähestymiskytkimiä (kuva 3.7) käytetään lähinnä vikatilanteiden suojaus-tarkoituksiin. Lähestymiskytkimille on rakennettu logiikka, jonka mukaan ne katkaisevat moduloinnin taajuudenmuuttajalta, jos laite on ajautunut pois turvallisel-ta toiminta-alueeltaan.



Kuva 3.7 Induktiivinen lähestymiskytkin. Anturin lisäksi johteella liikkuvaan kelkkaan on kiinnitetty so-piva magneettisesti johtava vastakappale.

Jokaisella johteella on myös molemmissa päissä vaatimattomat iskunvaimentimet tör-mäyksien varalta. Iskunvaimentimet (kuva 3.8) kiinnittyvät johteessa olevaan uriin, ja niiden asento on muuteltavissa.



Kuva 3.8 Iskunvaimennin x-akselilla.

3.4 Mitoituksen lähtökohdat

Koelaitteen mitoituksessa lähdettiin siitä, että laitteella pystyttäisiin liikuttamaan korkeintaan muutaman kilogramman painoista työkappaletta. Laitteen haluttiin pystyvän suuriin nopeuksiin ja kiihtyvyyksiin. Laitetoimittajien vertailun perusteella todettiin, että 50 m/s^2 on suurin kiihtyvyys, joka on mahdollinen hihnavetoiselle lineaarijohteelle, keskiarvon ollessa $20\text{-}35 \text{ m/s}^2$.

3.4.1 Laitteen massat

Koelaitteen massoja lähdettiin tarkastelemaan osa kerrallaan, koska vastaavanlaista laitteistoa ei ole aikaisemmin toimitettu mihinkään. Massat laskettiin valmistajalta saatujen datalehtien avulla. Tämän lisäksi kaapeleille ja energiansiirtohihnoille arvot etsittiin valmistajien internetsivuilta löytyvistä massataulukoista. Osa massoista jouduttiin silti selvittämään mittauksien avulla.

Koska ainoastaan y- ja z-akselien massoilla oli merkitystä laitteen kiihtyvyyksiin, on x-akselin massa tässä jätetty kokonaan tarkastelun ulkopuolelle. Taulukossa 3.3 on esitelty y- ja z-akseleille lasketut kokonaismassat, joissa on otettu huomioon yhden kilon painoinen työkappale. Taulukosta 3.4 nähdään, että liikkuvan kokonaismassan arvoksi saadaan $50,36 \text{ kg}$. Lisäksi on huomattava, että y-akselin massa on keskiarvo, sillä massa vaihtelee hieman paikan funktiona johtuen laitteen rakenteesta.

Taulukko 3.4. Koelaitteen y- ja z-akselien massat eriteltyinä. Kohtiin * ja ** on otettu huomioon myös ne osat x-akselissa kiinni olevista osista, joilla on vaikutusta liikkuvaan massaan. Nämä massat ovat arvioituja keskiarvoja, ja muuttuvat siten paikan suhteen.

y-akseli	lkm	massa [kg]		z-akseli	lkm	massa [kg]
johteet	2	12,42		johteet	1	3,86
akseli	1	0,10		jarru	1	1,10
kaapelin kannatusketju*	1	2,56		paikka-anturi	1	1,00
paikka anturi	1	2,50		kaapelit		0,20
kaapelit **		1,45		moottori+vaihde	1	3,00
moottori	1	4,80		kytkin	1	0,05
kytkin	1	0,14		moottorin kiin.	1	0,10
moottorin kiin.	1	0,50		nostin	1	1,00
kelkka	2	5,40		muut kiinnik.		1,62
muut kiinnik.		7,22		abs. anturi	1	0,10
abs. anturi	1	0,25		kuorma		1,00
yhteensä		37,34		yhteensä		13,03

Laitetoimittaja vahvisti tehtyjen ja taulukossa 3.4 ilmoitettujen laskelmien olevan oikeita. Tämän jälkeen siirryttiin tarkastelemaan kiihtyvyyksiä.

3.4.2 Kiihtyvyystarkastelu

Tarkastelu on tehty kahdelta kannalta. Aluksi on laskettu täysin suoraviivaisesti Newtonin II lain, eli dynamiikan lain, mukaisella tavalla massasta ja voimasta riippuva lineaarinen kiihtyvyys.

$$F = m \cdot a \quad (3.1)$$

Yhtälössä 3.1 F on kiihtyvän liikkeen vaatima voima, m on liikkuvan kappaleen massa ja a kappaleen kiihtyvyys. Valmistaja ilmoitti hihnojen kestävyyksiksi 610 N (x-akseli), 260 N (y-akseli) ja 230 N (z-akseli). Tässä on syytä huomauttaa, että x- ja y-suunnissa on kaksi hihnaa kummassakin. Näin ollen yhtälön 3.1 avulla saadut maksimikiihtyvyydet on esitetty taulukossa 3.5.

Taulukko 3.5. Akselien kiihtyvyydet laskettuna Newtonin liikelain perusteella

	kiihtyvyys [m/s ²]
x	24,23
y	39,92
z	50,55

Koska kysymyksessä on kuitenkin pyörivä systeemi, täytyy laskuissa ottaa huomioon sekä moottoreiden, että akseleiden hitausmassat ja vääntömomentit. Vääntömomentti, jonka hihnat kestävät voidaan ratkaista, kun tiedetään lineaarinen voima F ja hihnapyörän säde r .

$$T = F \cdot r \quad (3.2)$$

Yhtälöstä 3.2 saadaan x-akselin vääntömomentiksi 24,3 Nm. Tähän arvoon on vielä liittävä valmistajan ilmoittama tyhjäkäyntivääntömomentti, joka on 1 Nm hihnaa kohden. x-akselin tapauksessa moottorilta johteelle voidaan siis tuoda 26,3 Nm vääntömomenttia. Valmistaja ilmoittaa vastaavaksi arvoksi 30,92 Nm. Lisäksi on selvitettävä systeemin hitausmassat, sillä laitteiston toimittajan laskelmissa on käytetty hieman erilaisia moottoreita.

$$J_A = J_0 + J_H \cdot l + J_L \cdot m \quad (3.3)$$

Yhtälö 3.3 on kiskoston valmistajan ilmoittama yhtälö kiskojen hitausmassoille. Tässä l on kiskon työpituus ja m on liikkuva massa. Kertoimista J_0 on rakenteellinen hitausmassa, J_H hitausmassa pituusyksikkö kohden ja J_L hitausmassa massayksikköä kohden. Hitausmassakertoimet on ilmoitettu valmistajan antamissa taulukoissa 3.6 ja 3.7. Yhtälö 3.3 on voimassa x- ja y-akseleille, sillä se on suoravetoisen systeemin yhtälö. z-akselilla on käytetty 1/3-vaihteistoa, ja sille pätee

$$J_A = J_G + \frac{J_0 + J_H \cdot l + J_L \cdot m}{i^2} \quad (3.4).$$

Yhtälössä 3.4, i on vaihteiston välityssuhde ja J_G vaihteiston rakenteellinen hitausmassa.

Taulukko 3.6. x- ja y-akselien hitausmassakertoimet. x-akseli on tyyppiä GV-40 ja y-akseli GK-25 (Festo)

Koko	25		40	
Johteen tyyppi	GK	GV	GK	GV
J_O [kg cm ²]	1,75	2,75	9,89	15,37
J_H [kg cm ² /m]	0,188		0,933	
J_L [kg cm ² /kg]	2,052		3,958	

Taulukko 3.7. z-akselin hitausmassakertoimet. z-akseli on tyyppiä 1. (Festo)

Koko	18	
Ajopäiden lukumäärä	1	2
J_O [kg cm ²]	2,87	4,08
J_H [kg cm ² /m]	0,6	
J_L [kg cm ² /kg]	1,66	
J_G [kg cm ² /m] vaihteisto	0,14	
i välityssuhde	3	

Lasketut akselien hitausmassat on kerätty taulukkoon 3.8. Samaan taulukkoon on koottu myös moottorien hitausmassat, kokonaishitaussmassat ja hitausmassasuhteet.

Taulukko 3.8. Laitteiston hitausmassat ja hitausmassasuhteet

	Hitausmassa akseli [kgm ²]	Hitausmassa moottori [kgm ²]	Kokonaishitaussmassa [kgm ²]	Hitausmassasuhte
x	0,02162	0,00158	0,02320	13,68
y	0,00287	0,00028	0,00315	10,25
z	0,000132	0,0000196	0,000152	6,73

Kun tarkastellaan hitausmassasuhteita, voidaan huomata niiden olevan hieman korkeat x- ja y-akselien tapauksessa. Hyvänä nyrkkisääntönä liikkeenohjaukseen voidaan pitää hitausmassasuhteen arvoa 10. Liian korkea hitausmassasuhte voi aiheuttaa systeemiin voimakkaitakin värähtelyjä. Keinoja hitausmassasuhteen pienentämiseksi olisi esimerkiksi vaihteiston lisääminen (vrt. z-akseli) tai moottorin vaihtaminen malliin, jossa on raskaampi roottori. Näistä ainoastaan moottorin vaihtaminen voisi tulla kyseeseen, sillä vaihteistoa käyttämällä menetettäisiin nopeutta liian paljon.

Hitausmassan ja vääntömomentin avulla pystytään nyt ratkaisemaan kiihtyvyydet akselleille.

$$T = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.5)$$

Yhtälössä 3.5 on esitetty vääntömomentin T ja hitausmassan J välinen yhteys. Vertailun helpottamiseksi kulmanopeuden muutos ajan suhteen, eli kulmakiihtyvyys, voidaan muuntaa lineaariseksi kiihtyvyydeksi, kun tiedetään kiihtyvyyssäde, joka tässä tapauksessa on hihnapyörän säde.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{l_{\text{kehä}}}{2\pi} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{2\pi} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = r \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.6)$$

Yhtälössä 3.6 on johdettu yhteys nopeudenmuutoksen ja kulmanopeudenmuutoksen välille. Nyt voidaan kirjoittaa

$$a = \frac{dv}{dt} = r \cdot \frac{T}{J} \quad (3.7)$$

Yhtälön 3.7 avulla ratkaistut kiihtyvyyksien arvot on esitetty taulukossa 3.9. Kuten voidaan huomata, arvot ovat pienemmät kuin aikaisemmin lasketut kiihtyvyydet (taulukko 3.5).

Taulukko 3.9. Johteiden sallimat kiihtyvyydet, kun hitausmassat ja vääntömomentit on otettu huomioon.

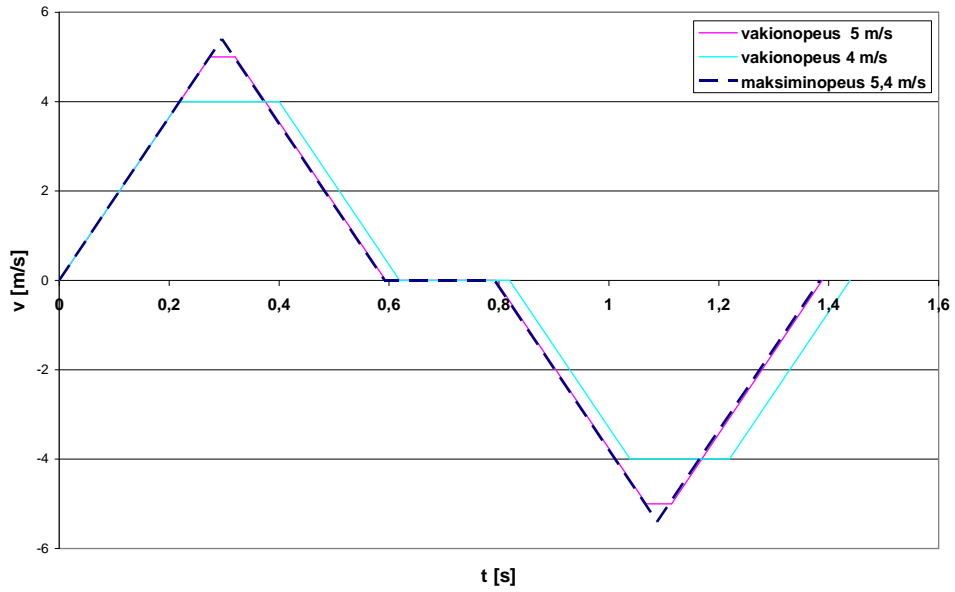
	kiihtyvyys [m/s ²]
x	22,55
y	29,10
z	73,50

Vertaamalla taulukon 3.9 arvoja taulukon 3.5 arvoihin, huomataan, että arvot eivät vastaa tavoiteltua suorituskykyä x- ja y-akselien kohdalla. Täytyy myös ottaa huomioon, ettei tämä tarkastelu ota huomioon laitteeseen vaikuttavia kitkavoimia, eikä z-akselin kohdalla vertikaalista liikesuuntaa.

Kuvassa 3.9 on esitetty kolme lineaarista ajoprofiilia lasketuilla maksimiarvoilla x-akselille. Kaikissa profiileissa suoritetaan kiihdytys, mahdollinen vakionopeusvaihe, jarrutus ja sen jälkeen 0,2 sekunnin lepo. Tämän jälkeen tapahtuu liike vastakkaiseen suuntaan. Suurin saavutettava nopeus saadaan yhtälöistä

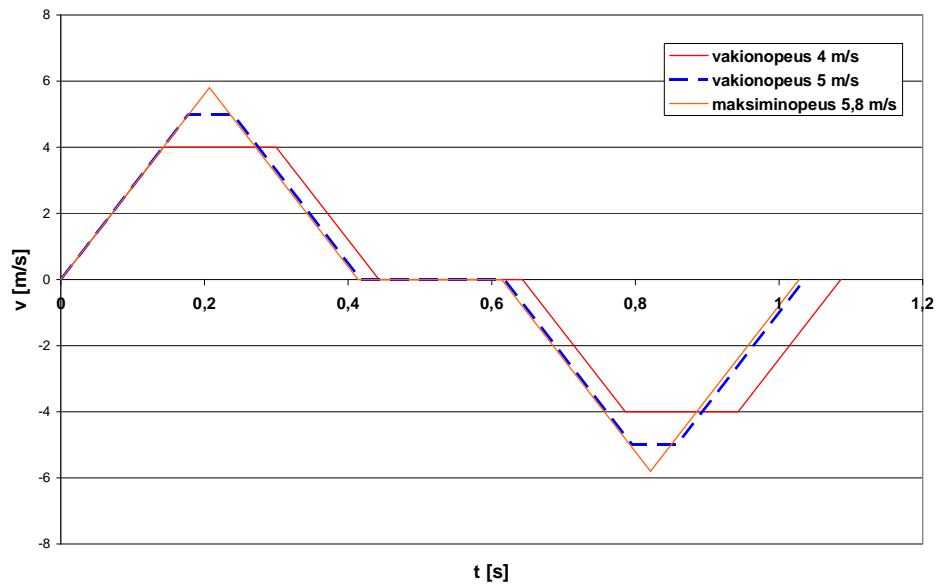
$$x = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2 \cdot x}{a}} \text{ ja } v = a \cdot t \quad (3.8),$$

jossa x on paikka, t aika, v nopeus ja a kiihtyvyys.



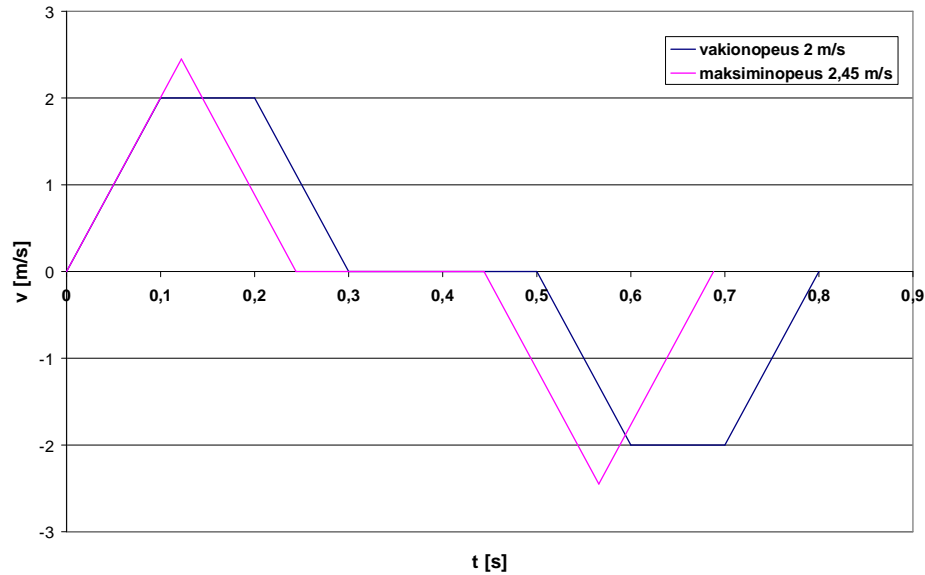
Kuva 3.9. x-akselin nopeusprofiileja. Akselin suurin nopeus, joka voidaan saavuttaa, saa arvon 5,4 m/s, joka vastaa moottorin pyörimisnopeutta 2592 rpm, kun ajetaan koko radan pituus. Kiihtyvyys $a=18,24 \text{ m/s}^2$.

Profiilien perusteella voidaan päätellä, ettei laitteella tavoite suunniteltua yhden sekunnin suoritusaikaa, mikäli liikeradan pituus on x-akselin työpituus.



Kuva 3.10. Nopeusprofiileja y-akselille. Akselin huippunopeus saa arvon 5,8 m/s, joka vastaa moottorin pyörimisnopeutta 3867 rpm, kun ajetaan koko radan pituus. Kiihtyvyys $a=28,02 \text{ m/s}^2$.

Kuten kuvasta 3.10 nähdään, myöskään y-akselilla ei päästä alle sekunnin suoritusajan koko radan pituudella, mutta y-akseli toimii kuitenkin x-akselia huomattavasti nopeammin.



Kuva 3.11. z-akselin ajoprofiileja. z-akselin kiihtyvyys on rajoitettu arvoon 20 m/s^2 , koska tätä suuremman kiihtyvyyden käytöllä ei saavuteta mitään etua. Akselin työpituus on vain 300 mm, jolloin teoreettinen maksiminopeus rajoittuu arvoon 3 m/s, joka vastaa pyörimisnopeutta 2222 rpm ja 1/3-vaihe huomiootettuna moottorilla 6667 rpm. Kiihtyvyydellä 20 m/s^2 maksiminopeus saavuttaa arvon 2,45 m/s (1815/ 5444 rpm).

z-akseli ei rajoita laitteen suorituskykyä, sillä sen lyhyt työpituus ja riittävä kiihtyvyys takaavat lyhyen suoritusajan. Edellä esitetyt ajoprofiilit ja laskut ovat suuntaa antavia. Valmistajan toimittamat uudet laskelmat on esitetty taulukossa 3.10. Voidaan olettaa, että nämä laskelmat ovat paikkaansa pitäviä, mutta johtuen puutteellisista laskentatapa-tiedoista, omat tuloksemme eivät ole suoraan vertailukelpoisia.

Taulukko 3.10. Laitteiston valmistajan toimittamat mitoitusarvot kiihtyvyydelle ja kokonaisvääntömomentille. Arvojen laskennassa on käytetty massana arvoa 50,36 kg.

parametri	x	y	z
kiihtyvyys [m/s^2]	21,6	32,1	20
kokonaisvääntömomentti [Nm]	30,92	9,92	1,04

Kun arvoja verrataan taulukossa 3.9 esitettyihin laskettuihin arvoihin, huomataan, että kiihtyvyydet x- ja y-akselille ovat hieman suurempia valmistajan mitoituksessa.

3.4.3 Muuttuvan massakeskipisteen vaikutus

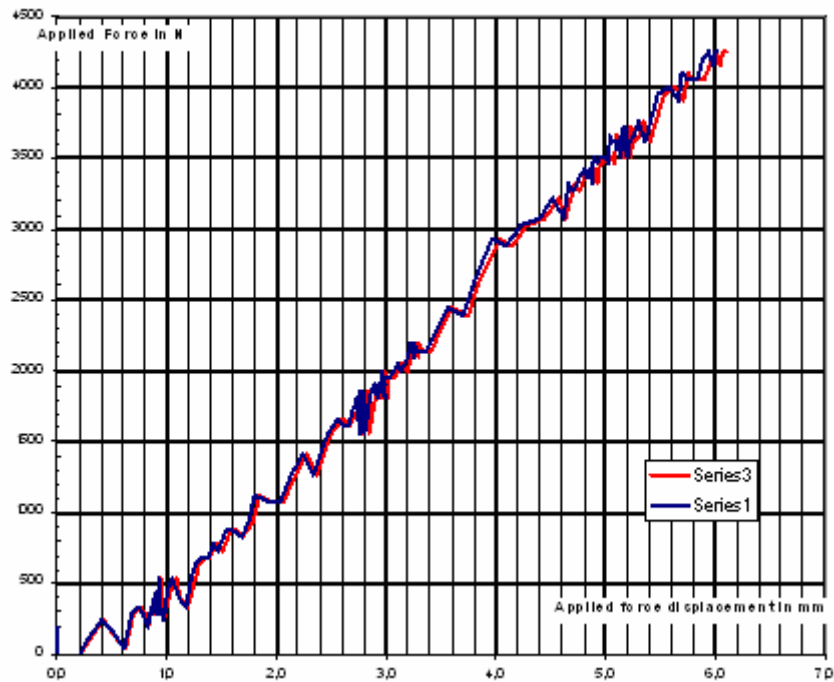
Kahden johteen käyttämisen x-suunnassa huomattiin aiheuttavan toiminnan kannalta hankalan tilanteen. x-akselin kuljettama massa ei jakaudu tasaisesti johteille, niin kuin alussa on oletettu. Massajakauma on keskellä vain silloin kun y-akselin kelkat ovat paikallaan massakeskipisteessä. Pahimmassa tapauksessa, kun z-akseli on ajettu aivan y-akselin moottorin puoleiseen päättyyn, massa on jakautunut siten, että moottorin puoleisella johteella on noin 70 % kokonaismassasta. Systemille pätee (Mohan, 2002)

$$T_e = J_M \frac{d\Omega_m}{dt} + r^2(m_1 + m_2) \frac{d\Omega_m}{dt} + r(F_{k1} + F_{k2}) \quad (3.9).$$

Yhtälössä T_e on moottorin sähköinen vääntömomentti, J_M moottorin hitausmassa, Ω_m moottorin kulmanopeus, r hihnapyörän säde, m hihnalla kulkeva massa ja F_k kitkavoima. Yhtälöstä nähdään, että vääntömomentti jakautuu suoraan kuorman hitausmassan mukaisesti. Jos tilannetta tarkastellaan samoin kuin mitoitusta edellä laskemalla hitausmassat saadaan x-suunnan johteille hitausmassoiksi $0,0155 \text{ kgm}^2$ ja $0,0076 \text{ kgm}^2$. Jos kiihtyvyys pidetään nyt vakiona laskemalla saadussa maksimiarvossaan $22,55 \text{ m/s}^2$, saadaan johteiden vääntömomenteille arvot $17,57 \text{ Nm}$ ja $8,61 \text{ Nm}$. Yhden johteen suurin sallittu vääntömomentti on $15,46 \text{ Nm}$. Vääntömomentin ylityksestä seuraa mahdollinen liian suuresta venymästä johtuva hampaan yli hyppääminen enemmän kuormitetulla hihnalla, joka johtaa y-akselin rakenteiden vääntymiseen. Ilmiö saatiin esille laitteistolle suoritetuissa koeajoissa.

3.4.4 Hihnojen suorituskyvyn tarkastelu

Kuten jo edellä on todettu, hihnojen kestävyys on todennäköisesti eniten suorituskykyä rajoittava tekijä koelaitteessa. Hihnojen vetolujuutta sekä venymää päätettiin tarkastella lähemmin, jotta saataisiin selville, mikä todella rajoittaa laitteen liikkuvuutta. y- ja z-akselissa käytettävälle kapeammalle 14 mm hihnalle tehtiin vetolujuus ja venymäkoesarjat LTY:n konetekniikan osastolla. Koesarjan mittaustulokset on esitetty kuvassa 3.12. Kuvasta voidaan huomata, että venymäkäyttäytyminen on täysin lineaarinen. Käyrän epätasaisuus johtuu lähinnä mittalaitteen kohinasta.



Kuva 3.12 Hiilikuituvahvisteisen hammashihnan kuormituskäyrä. Mittauksen alkupituus on 123,5 mm.

Vedettävän koekappaleen alkupituus oli 123,5 mm ja vetoja suoritettiin neljä kappaletta. Kokeessa paljastui, että hiilikuituvahvisteisen hihnan vetolujuus ei ole rajoittava tekijä tämän kaltaisessa laitteessa. Vetolujuudeksi saatiin 4248 N. Sen sijaan hihnan venymä osoittautui mahdolliseksi rajoitteeksi. Suhteellinen venymä, jonka valmistaja ilmoittaa on leveämmän hihnan tapauksessa 0,16 % ja kapeammalle hihnalle 0,11 % suurimmalla sallitulla voiman arvolla.

4 KOELAITTEEN KÄYTTÖÖNOTTO

Koelaitteisto on koottu useamman valmistajan osista. Näin ollen käyttöönotto ja kokoonpanoprosessi ovat monivaiheisia, kun osia sovitellaan yhteen. Käyttöönotto koostuu moottorien, mittalaitteiden, kommunikaatioyhteyksien ja säätötyökalujen kytkemisestä ja yhteen liittamisestä. Koska akselien käyttöönotot eivät juuri eroa toisistaan, lukuun ottamatta z-akselin jarrun huomioon ottamista, on tässä käsitelty yleisesti kaikkia akseleita.

4.1 Esivalmistelut

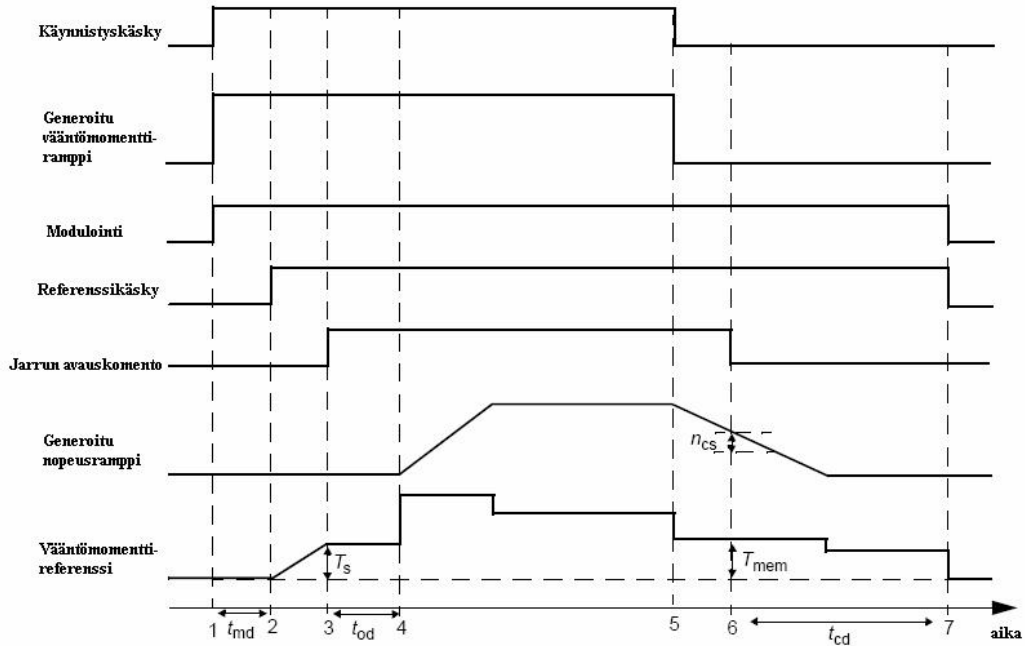
Varsinaisen mekaanisen kokoonpanoprosessin jälkeen aloitettiin laitteiston varsinainen käyttöönotto. Esivalmisteluna moottorit irrotettiin laipoista, jotta toimivuutta pystyttiin seuraamaan myös silmämääräisesti ja identifiointiajo suorittamaan turvallisesti. Z-akselille rakennettiin lisäksi mekaanisen jarrun jännitteensyöttö ulkoisella jännitelähteellä. ACSM1:stä löytyy mekaanisen jarrun logiikkaa varten 30 VDC relelähtö, mutta käyttöönotto tehtiin suoralla jarrun poiskytkennällä. Myös analogiset mitta-anturit tarvitsivat jännitteensyötön, joka hoidettiin suoraan taajuusmuuttajan digitaalilähdöstä. Ennen kuin laitteisto ensimmäisen kerran kytkettiin päälle, kaikki moottoreiden ja taajuusmuuttajien syöttökytkennät tehtiin valmiiksi.

4.2 Taajuudenmuuttajat ja moottorit

Ensimmäinen vaihe laitteiston kokoamisen jälkeen oli taajuusmuuttajien ottaminen käyttöön. Taajuusmuuttajat kytkettiin aluksi tietokoneen RS-232 väylään tai USB-väylään adapterin avulla. Kun muuttajaan kytkettiin jännitteet, päästiin sen toimintaa hallitsemaan ohjelmiston avulla. Ohjelmiston avulla kytkettiin päälle moottorin syöttö eli pulssimodulaatio, jonka jälkeen tilanne todettiin kääntämällä käsin moottorin akselia. Ennen moottorin identifiointiajon (ID-ajo) aloittamista, muuttajalle aseteltiin raja-arvoparametrit, takaisinkytkentäparametrit, sekä enkooderin valintaparametrit. Raja-arvoparametreja ovat nopeuden, vääntömomentin ja virran suurimmat sallitut arvot. Takaisinkytkentäparametreilla tarkoitetaan nopeustiedon lähteen valintaa. Nopeustieto voidaan valita myös estimoiduksi. Mikäli nopeustieto halutaan saada takaisinkytkennän kautta, on enkooderin parametrit valittava sopivasti.

Moottoreiden käyttöönottoon eli ID-ajo suoritettiin siis taajuudenmuuttajan ja Drive-Studio-ohjelman avulla. ACS M1 sisältää moottorimallin, jonka avulla laite määrittää moottorin sijaiskytkennän parametrit. Ohjelmalle syötetään moottorin tyyppi sekä kilpiarvot. ID-ajon voi suorittaa joko normaalitilassa, jolloin moottorin akselin on saatava vapaasti pyöriä, tai standstill-tilassa, jossa akseli pysyy paikallaan ja jota voidaan soveltaa paikoissa, joissa moottorin irrottaminen on hankalaa tai se voi aiheuttaa vaaratilanteen. Ensimmäinen ID-ajo suoritettiin normaalitilassa. Kun ID-ajo on suoritettu, moottori on valmis mekaanisesti kytkettäväksi järjestelmään. Moottorit kytkeytyvät hihnapyöriin ja hihnoin kytkimen avulla.

z- eli pystyakselille oli lisäksi sijoitettu mekaaninen jarru. Jarru on toteutettu kestmagneeteilla, joiden muodostaman magneettikentän avulla moottorin akseli pysyy paikallaan. Jarrun poiskytkemiseksi täytyy luoda vastakkaisuuntainen magneettikenttä, joka kumoaa kestmagneettien aiheuttaman kentän. ID-ajon ajaksi jarru avattiin suoraan ulkoisella jännitteensyötöllä. ACS M1 sisältää valmiin logiikan mekaaniselle jarrulle. Jarru ja sen jännitteensyöttö kytkettiin ACS M1:n relelähtöön. Jarrulogiikalle aseteltiin parametrit DriveStudio-ohjelman avulla. Ohjelmalla määriteltiin vääntömomenttiraja jarrun avaamiseksi, nopeusraja jarrun sulkemiseksi, sekä tarvittavat avaus- ja sulkuviiheet. Jarrulogiikan toiminta on esitetty ajoituskaaviona kuvassa 4.1. Kestomagneettijarrun kanssa ei ole tarpeen käyttää viivettä, sillä mekaniikka toimii erittäin nopeasti.



Kuva 4.1 ACS M1:n jarrulogiikan ajoituskaavio (ABB, www.abb.fi, 13.12.2007). Kuvassa t_{md} on modulaatioviive, t_{od} avausviive, t_{cd} sulkuviive, T_s aseteltu vääntömomentin avausraja, T_{mem} vääntömomentin sulkuraja, joka tallentuu automaattisesti ja n_{cs} nopeuden sulkuraja.

4.3 Toiminnan testausta ACSM1:n avulla

Seuraavassa vaiheessa aloitettiin kokonaislaitteiston toiminnan testaus ACSM1:n avulla. Lopullinen ohjaus- ja säätöjärjestelmä tulee koostumaan dSpace-laitteistosta ja kenttäväyläkortista. Toiminnallinen testaus suoritettiin, jotta voidaan todeta laitteiston toimivan halutulla tavalla ja, ettei vaaratilanteita pääse syntymään laitetta käytettäessä. Toiminnan testausta varten rakennettiin kytkinpöytä, jolla voitiin ohjata muuttajalta lähteviä pulsseja digitaaliväylien kautta.

Testauksessa jokaista akselia ajettiin aluksi hyvin hitailla nopeuksilla eripituisia matkoja ja tarkkailtiin vääntömomentin, nopeuden ja paikan avulla, kuinka hyvin laite toteuttaa annettua ohjetta. Testeissä havaittiin, että erityisesti x-akselin kohdalla suuremmilla nopeuksilla säätöä oli viritettävä, jotta laite pystyi toteuttamaan annettua ohjetta tyydyttävästi. Testeissä tarkkailtiin myös jännitevälipiirin käyttäytymistä. Havaittiin, että x- ja y-akseleiden muuttajille tarvitaan jarruvastukset. Toiminnallisen testauksen yhteydessä suoritettiin myös liikekitkamittaukset x- ja y-akseleille.

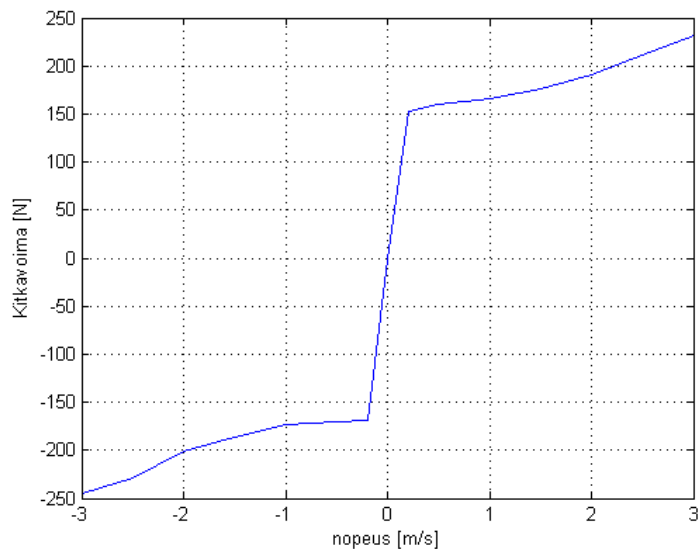
4.4 Kitkamittaukset

Laitteen x- ja y-akseleille suoritettiin liikkeellelähtökitkamittaukset vetovaa'an avulla. Kumpikin mittaussarja sisältää 22 toistoa, joista on laskettu keskiarvo. Taulukossa 4.1 on esitetty liikkeellelähtökitkamittauksen tulokset. Kuten huomataan, liikkeellelähtökitkat ovat erittäin merkittävät. x-akselin kohdalla liikkeellelähtökitka on noin 20 % liikkuvasta kokonaismassasta. Mittauksessa 1 on liikuttu moottorista pois päin ja mittauksessa 2 kohti moottoria.

Taulukko 4.1 x- ja y-akselien liikkeellelähtökitkat.

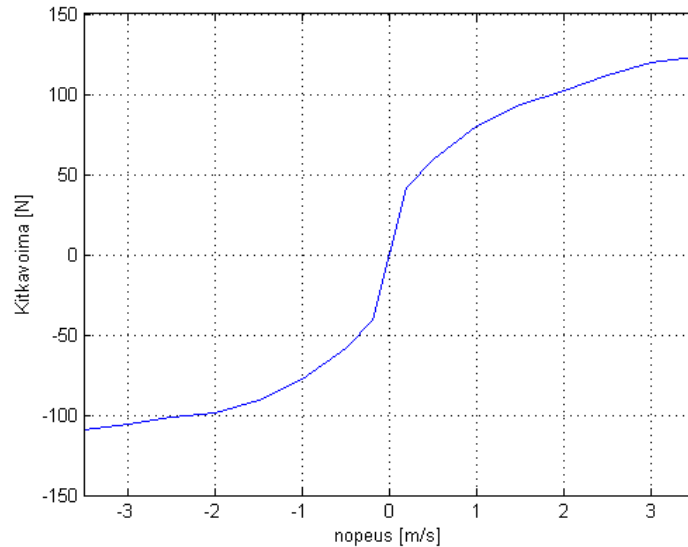
	x	y
Mittaus 1 [N]	95	28
Mittaus 2 [N]	98	32

Myös laitteiston liikekitkojen selvittämiseksi tehtiin sarja mittauksia. Mittaukset tehtiin x- ja y-akselille taajuudenmuuttajan avulla. Mittauspisteet rajoittuivat x-akselilla nopeuteen 3 m/s ja y-akselilla nopeuteen 3,5 m/s, koska tätä suuremmilla nopeuksilla vääntömomentilla ei ole selkeää vakioaluetta. Mittaustulokset on esitetty kuvissa 4.1 ja 4.2 nopeus-voimakuvajina.



Kuva 4.1 x-akselin liikekitkakuvaaja.

Kuvasta 4.1 nähdään, ettei x-akselin liikekitka ole täysin symmetrinen liikesuunnan suhteen. Positiivisella nopeudella liikutaan moottorin päädystä poispäin ja kitka on tällöin hieman pienempi. Sama ilmiö havaittiin myös liikkeellelähtökitkoissa.



Kuva 4.2 y-akselin liikekitkakuvaaja.

y-akselin kitkakäyttäytyminen on samankaltainen x-akselin kanssa. y-akselin moottorin asennosta johtuen, negatiivinen suunta on nyt moottorista poispäin.

4.5 Kenttäväylät

Kuten jo aiemmin todettiin, lopullinen kommunikaatioyhteys ohjauksen ja laitteiston välille muodostettiin Profibus-kenttäväylän avulla. Tätä varten tarvittiin ACS M1:n ja dSpace-laitteiston väliin erillinen kenttäväyläkortti sekä kenttäväylämoduuli. Lopullinen ohjaus- ja säätölaitteisto koostuu siis tietokoneesta, Profibus-dSpace-sovittimesta, dSpace-laitteistosta ja taajuudenmuuttajista kenttäväylämoduuleineen. Väylää varten oli teetettävä Profibus-yhteensopiva yhdyskaapeli, jossa oli sopivalla tavalla päätetyt liittimet.

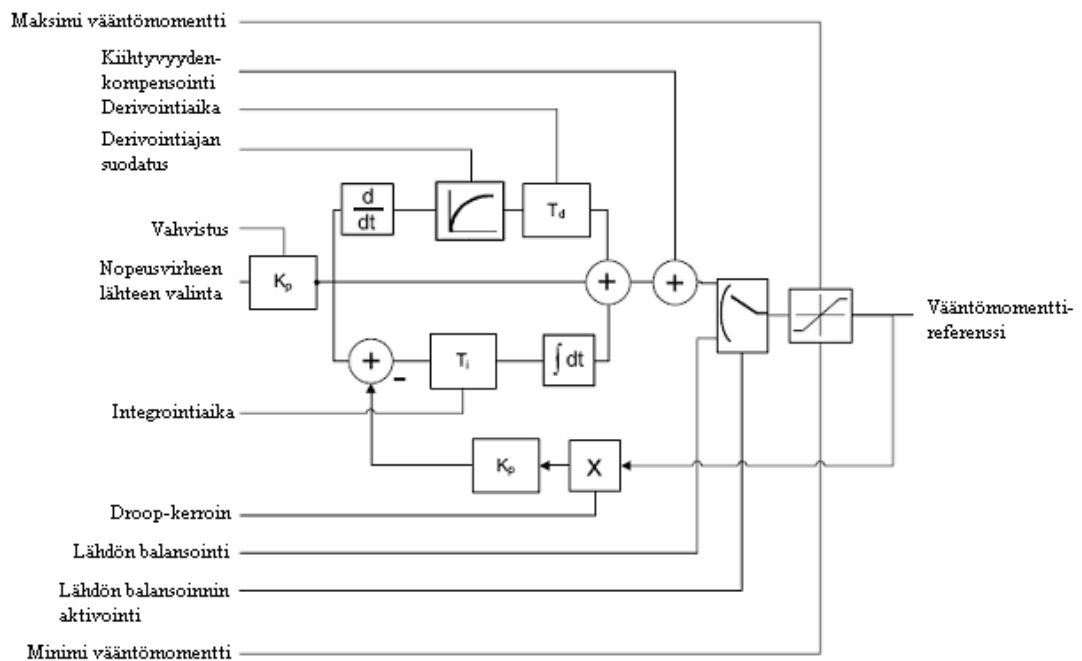
Profibus-dSpace-sovitin on Hilscherin valmistama DS4502-kortti. Väylän vaatimat määrittelyt tehtiin Hilscherin SyCon-ohjelmiston avulla. Määrittelyksiä varten tarvittiin myös erillinen diagnostiikkayhteys Profibus-sovittimen ja tietokoneen väliin. Sovittimella on erilliset lähdöt väylälle ja diagnostiikalle. Määrittelyvaiheessa kenttäväyläkortti määriteltiin isäntälaitteeksi ja muuttajat seuraajalaitteiksi. SyCon-ohjelmisto määrittelee

laitteiden osoitevaruudet valmiiksi. ACS M1:n kenttäväylämoduuleille on saatavilla valmiit asetusarvot ABB:n verkkosivuilta. Väylän määrittämisen jälkeen väyläprotokolla muokattiin koelaitteistolle sopivaksi. Protokollassa määritellään esimerkiksi lähetyksen ja vastaanoton osoitevaruudet, datapakettien koot sekä mahdollisesti myös signaali-skaalaukset. Tässä tapauksessa signaalien skaalaus toteutettiin kuitenkin dSpace-ympäristössä. Myös ACS M1:n kenttäväylämoduulille aseteltiin skaalauskerroimet ja valittiin lähetettävät signaalit.

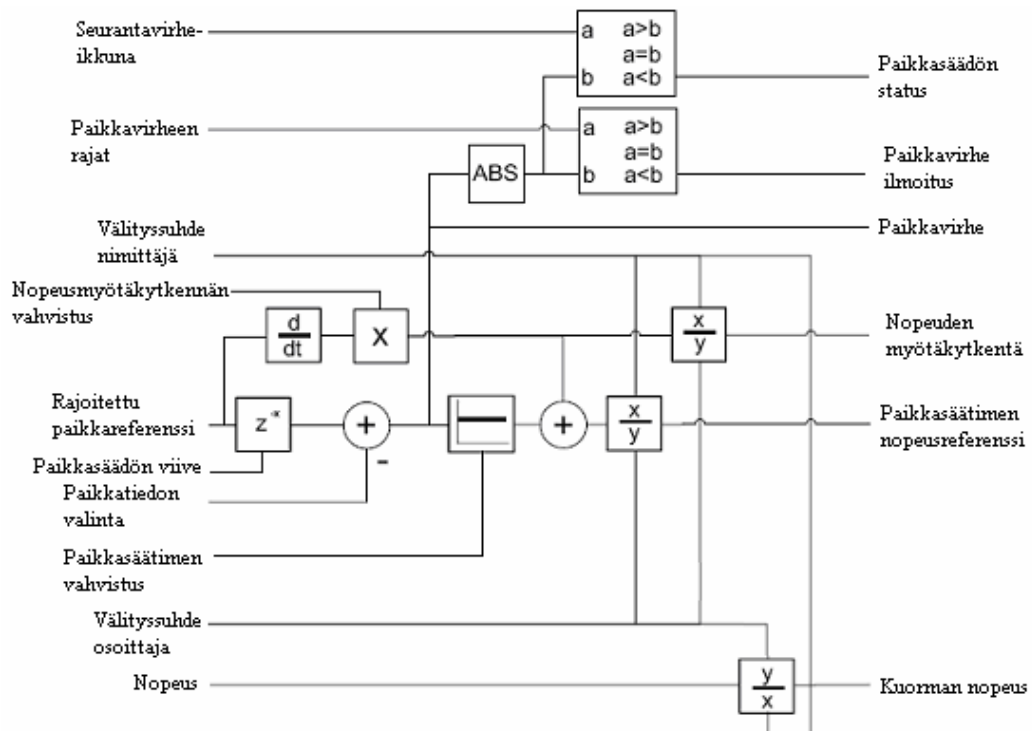
Väylän testausta aloitettiin siten, että yhden akselin moottoria ohjattiin taajuudenmuuttajalla ja tarkkailtiin väylän kykyä lukea dataa muuttajalta. Tämän jälkeen yksi moottori irrotettiin johteesta ja paikkaohjetta lähetettiin kenttäväylän kautta muuttajalle. Kun lähetyksen saatiin toimimaan luotettavasti, moottori kiinnitettiin takaisin johteelle. Testauksen yhteydessä havaittiin, että väylän vasteaika on tällä hetkellä 1,5 ms. Profibus-väylän pitäisi kuitenkin pystyä 250 μ s vasteaikaan. Kenttäväylän toimintaa tullaan käsittelemään tarkemmin tässä projektissa syntyvissä muissa julkaisuissa.

5 SUORITUSKYKYMITTAUKSET ACS M1:N AVULLA JA MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Kuten jo aiemmin todettiin, ACSM1 sisältää nopeus- ja paikkasäätimen, joiden avulla koelaitetta on mahdollista säätää. Säädön toimivuutta testattiin jokaisen akselin kohdalla erikseen. Mittauksissa tarkkailtiin, kuinka hyvin laitteisto toteuttaa annettuja nopeus- ja paikkareferenssejä. Tarkastelussa kiinnitettiin huomiota sekä dynaamisen, että staattisen tilan virheeseen. Mittauksia suoritettiin kullekin akselille kahdella eri perusteella. Säästöparametrien valinta suoritettiin kokeellisesti. Kuvassa 5.1 on esitetty nopeussäätäjän lohkokaavio ja kuvassa 5.2 paikkasäätimen lohkokaavio.

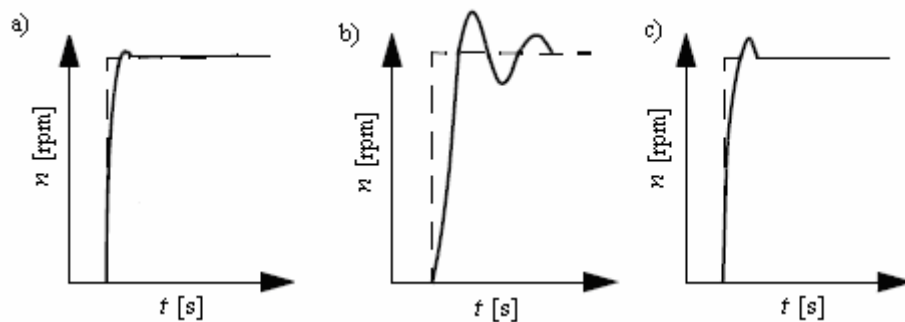


Kuva 5.1 ACS M1:n nopeussäätimen lohkokaavio (ABB, www.abb.com, 10.11.2007)



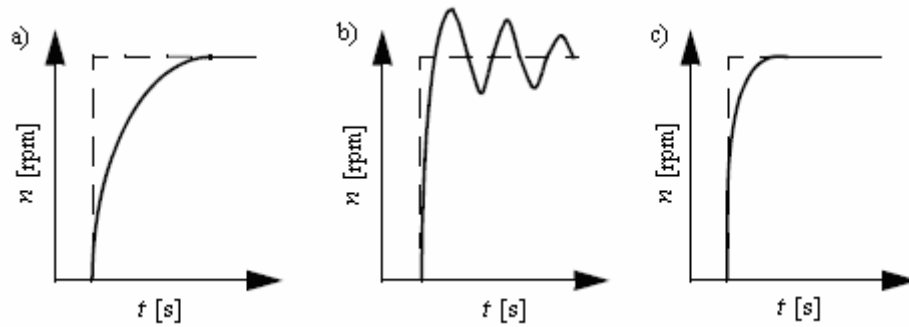
Kuva 5.2 ACS M1:n paikkasäätimen lohkokaavio (ABB, www.abb.com, 10.11.2007)

Säätöparametrien kokeellinen valinta perustui tunnettuihin ilmiöihin, jotka ilmenevät nopeus- ja paikkasäätimien parametreja muutettaessa. Tällaisia ilmiöitä ovat värähtelyt, asettuminen sekä ylitys. Kuvassa 5.3 on havainnollistettu liian suuren tai liian pienen integrointiajan aiheuttama ilmiö säädettävässä signaalissa.



Kuva 5.3 Integrointiajan vaikutus säätöön (ABB, www.abb.com, 19.11.2007). Kohdassa a) integrointiaika on liian pitkä, kohdassa b) liian lyhyt ja kohdassa c) optimaalinen.

Paitsi integrointiaika, myös vahvistus muokkaa signaalin käyttäytymistä. Kuvassa 5.4 on havainnollistettu vahvistuksen aiheuttamia ilmiöitä säädössä.



Kuva 5.4 Vahvistuksen vaikutus säädössä (ABB, www.abb.com, 19.11.2007). Kohdassa a) vahvistus on liian pieni, kohdassa b) liian suuri ja kohdassa c) optimaalinen.

Säädön derivoiva osa voidaan mitoittaa Ziegler-Nicholsin menetelmää apuna käyttäen. Taulukossa 5.1 on esitetty kyseisen menetelmän mukaiset PID-säätimen kertoimien valintakriteerit. Kartasta nähdään, että derivoivan osa on PID-säätimellä neljäsosa integrointiajasta. Integroivaa osaa on puolestaan hieman pienennetty verrattuna PI-säätimeen ja P-osaa on kasvatettu kartan mukaisesti. K_u (ultimate gain) ja P_u (ultimate period) arvot voidaan määrittää systeemin siirtofunktion taajuusvasteen avulla. Tällöin prosessin säätö on asetettu pelkäksi P-säädöksi ja vahvistusta kasvatetaan kunnes vaste lähtee värähtelemään. K_u on siis tämä vahvistus ja P_u on värähtelyn jaksonaika.

Taulukko 5.1. Ziegler-Nicholsin kartta

	K_c	τ_I	τ_D
P control	$K_u/2$		
PI control	$K_u/2.2$	$P_u/1.2$	
PID control	$K_u/1.7$	$P_u/2$	$P_u/8$

Kartasta voidaan nähdä, että integrointiaikavakio on nelinkertainen derivointiaikavakioon nähden. Tämä on derivoivan osan (D) tärkein mitoitusperuste. Lisäksi kartasta nähdään, että derivoivaa osaa käytettäessä voidaan integroivaa osaa (I) ja vahvistavaa osaa (P) hieman kasvattaa.

Mittaukset tehtiin pääsääntöisesti symmetrisillä nopeusrampeilla. Testien aikana kuitenkin havaittiin, että kitkojen ollessa suurina, jarrutuksessa voidaan käyttää huomattavasti suurempia kiihtyvyyden arvoja kiihdytykseen verrattuna. Näin ollen viimeisessä mittauspisteessä nopeusramppi on epäsymmetrinen johtuen suuresta hidastuvuuden ar-

vosta. Mittauksien tarkoituksena oli selvittää yksittäisen liikesuunnan suorituskyvyn maksimiarvot, sekä suorituskyvyn arvot tarkkuusvaatimukset huomioon ottaen. Mittauksissa on käytetty näytteistysaikaa 10 ms.

5.1 x-akseli

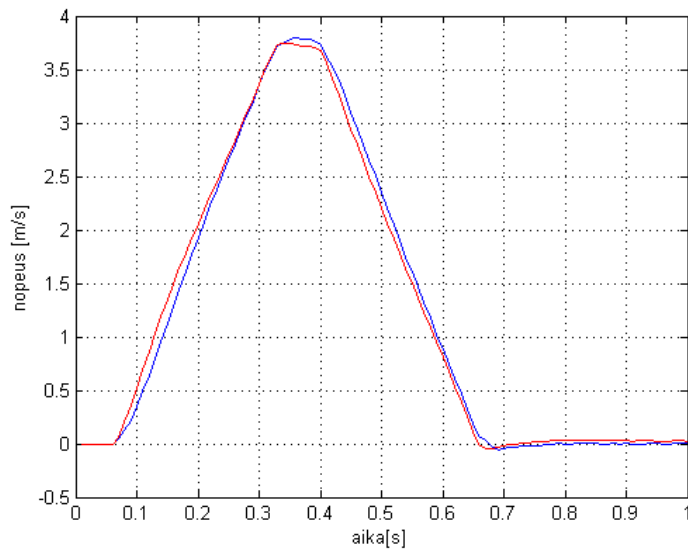
Säädön tarkastelu aloitettiin x-akselista. Parametrien asettelu aloitettiin vahvistuksien valinnalla. ACS M1:een on asetettu oletusparametrit säätimiin, mutta ainakaan x-akselin kohdalla näillä parametreilla laitteisto ei toiminut halutusti. Vahvistukset jouduttiin valitsemaan pieniksi, jotta säädöstä saatiin stabiili.

Integrointiaika valittiin aluksi mekaanisen aikavakion pohjalta. ACS M1:n suosituksen mukainen miniaika (10 % koko akselin mekaanisesta aikavakiosta, x-akselille 0,585 s) osoittautui kuitenkin liian lyhyeksi. Derivoivan osan mitoitus tehtiin Ziegler-Nicholsin kartan avulla. Koska systeemi on erittäin dynaaminen, pyrittiin suodatus minimoimaan. Kiihtyvyyden kompensoinnille eli kiihtyvyyssmyötäkytkennälle on myös esitetty käytettäväksi arvoa 10 - 30 % mekaanisesta aikavakiosta. Arvot kuitenkin vaikuttivat liian pieniltä, johtuen suuresta liikkeellelähökitkasta. Arvoksi valittiin lopulta lähes mekaanisen aikavakion suuruinen arvo. Taulukossa 5.2 on esitetty x-akselin säätöparametrit.

Taulukko 5.2 x-akselin säätöparametrit ACS M1:ssä

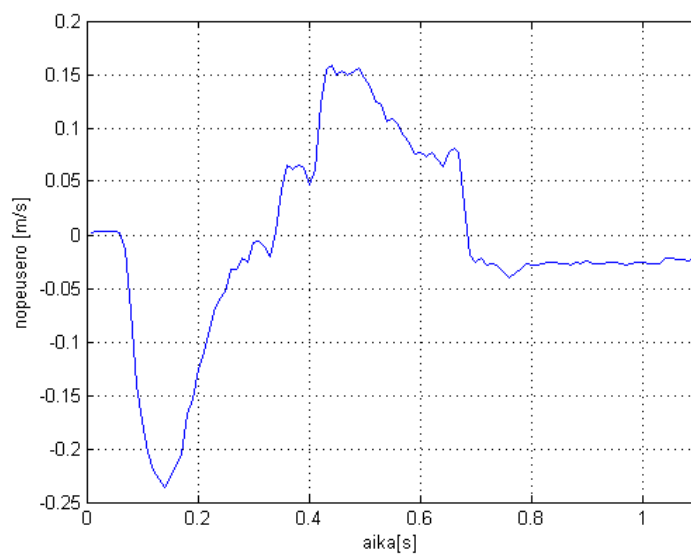
Parametri	Arvo
Nopeussäätäjän vahvistus P_{speed}	25
Paikkasäätäjän vahvistus P_{pos}	25
Integrointiaika T_i	0,16 s
Derivointiaika T_d	0,03 s
Kiihtyvyyden kompensointi T_{acc}	0,55 s
Nopeusmyötäkytkennän vahvistus P_{sFF}	0,9
Suodatus, D-osa T_{Fder}	5 ms
Suodatus, nopeusvirhe T_{Fserr}	2 ms
Suodatus, kiihtyvyyden kompensointi T_{Facc}	3 ms

Ensimmäisen mittauksen tarkoitus oli etsiä x-suunnan suoritusnopeuden maksimiarvot. Ratapituutena käytettiin 10 kierrosta eli 1,25 metriä. Valmistajan ilmoittamien vääntömomenttirajojen perusteella akselille oli mahdollista tuoda 250 % moottorin nimellises-tä vääntömomentistä. Tällä rajoituksella maksimikihtyvyydeksi saatiin mittauksilla 14,4 m/s² ja vakionopeudeksi 3,8 m/s. Kuvassa 5.5 on esitetty mitattu nopeus sekä nopeusreferenssi tästä tilanteesta. Suurin kiihtyvyyden arvo 14,4 m/s² vastaa 68 % valmistajan ilmoittamasta kiihtyvyyden maksimiarvosta ja 29 % suurimmasta sallitusta rakenteellisesta kiihtyvyydestä.



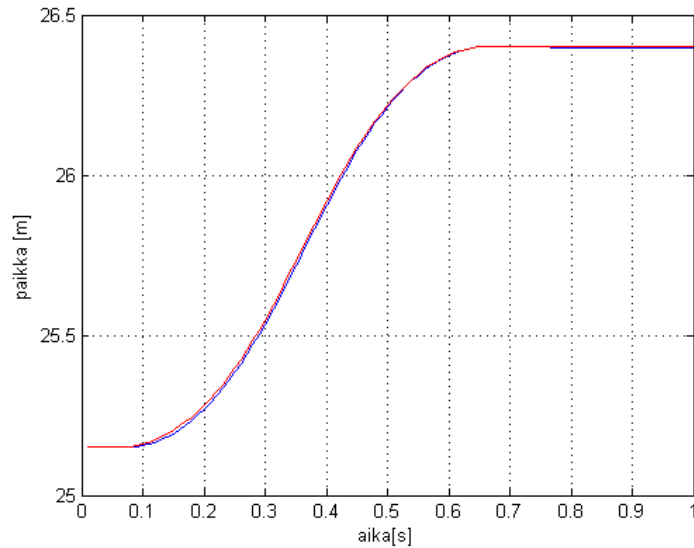
Kuva 5.5 x-akselin nopeuden kuvaaja suurimmalla sallitulla kiihtyvyyden arvolla. Nopeus on 3,8 m/s. Sininen käyrä vastaa mitattua nopeutta ja punainen referenssinopeutta

Nopeuden nousuaika on 0,27 s, joka on suurempi kuin valmistajan ilmoittama minimiaika 0,2 s. Vakionopeusalue jää kaikesta huolimatta hyvin lyhyeksi. Säädön käyttäytyminen saadaan esille huomattavasti paremmin, kun tarkastellaan nopeuden erosuuretta. Kuvassa 5.6 on esitetty nopeuserokuvaaja, joka on muodostettu mitatun nopeuden ja referenssin erotuksena. Virhe on suurimmillaan kiihdytysvaiheen lopussa, jolloin se saa arvon 0,24 m/s. Tämä vastaa 6,3 %. Jatkuvuustilan virhettä jää 0,02 m/s, joka vastaa 0,6 %.



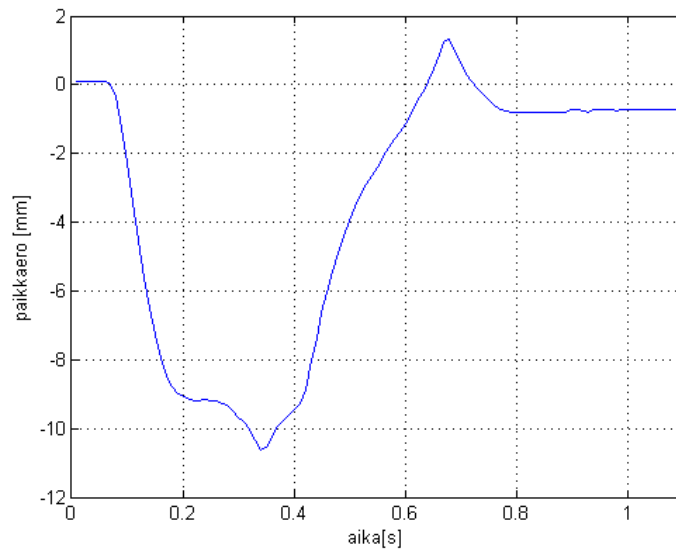
Kuva 5.6 x-akselin nopeuserokuvaaja.

Paikkakuvaajasta kuvassa 5.7 voidaan nähdä, että järjestelmään jää pysyvän tilan virhe myös paikkaan. Virhettä jää kaikkiaan 0,63 mm, joka vastaa 0,5 % kierrospituudesta.



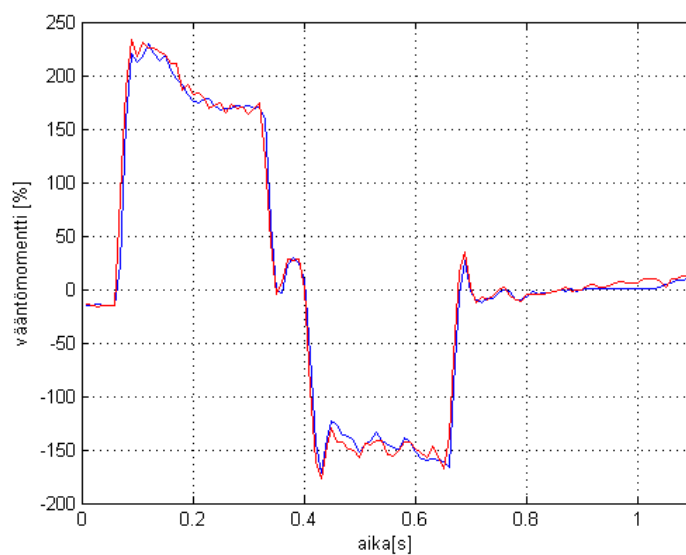
Kuva 5.7 x-akselin paikan kuvaaja suurimmalla sallitulla kiihtyvyyden arvolla. Sininen käyrä vastaa mitattua paikkaa ja punainen paikan referenssiä.

Paikkavirhekuvaaja kuvassa 5.8 on havainnollisempi paikkasäädön suorituskyvyn kannalta. Kuvan käyrä on muodostettu mitatun paikan ja referenssin erotuksesta, joka on havainnollisuuden vuoksi esitetty millimetreinä. Kuvasta 5.8 nähdään, että paikan virhe on varsin suuri dynaamisessa tilassa.



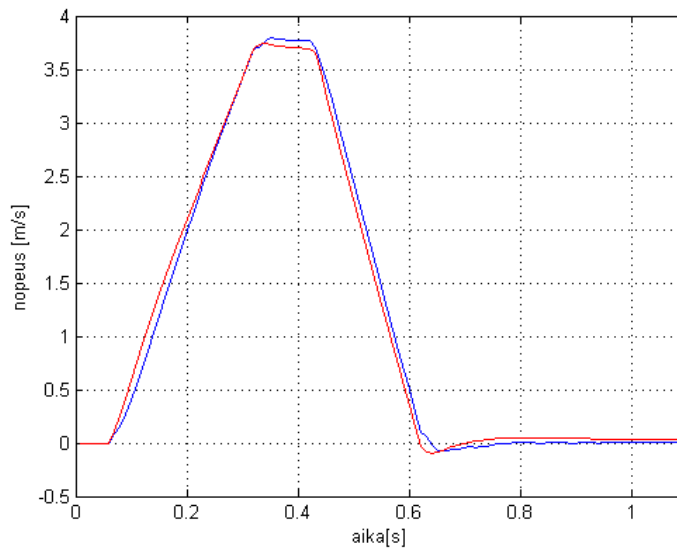
Kuva 5.8 x-akselin paikkavirheen kuvaaja suurimmalla sallitulla kiihtyvyyden arvolla.

Kuvan 5.8 käyrämuodosta havaitaan myös, että paikkasäätö on hieman ylikompensoiva. Tämä johtunee liian suuresta nopeudenmyötäkennän arvosta. Myötäkennän vahvistusta kokeiltiin pienentää hieman, mutta merkittävää parannusta ei saatu aikaan. Suurin paikan virhe dynaamisessa tilanteessa saa arvon 10,6 mm, joka vastaa 8,5 % kierrosmitusta. Ylitys, jota tässä kertyy 1,2 mm, on aina ei-toivottu ilmiö paikoituskäytössä. Kuvassa 5.9 on esitetty maksimiarvoilla saatu vääntömomentin kuvaaja. Vääntömomentin nousunopeus on nyt 30 ms.



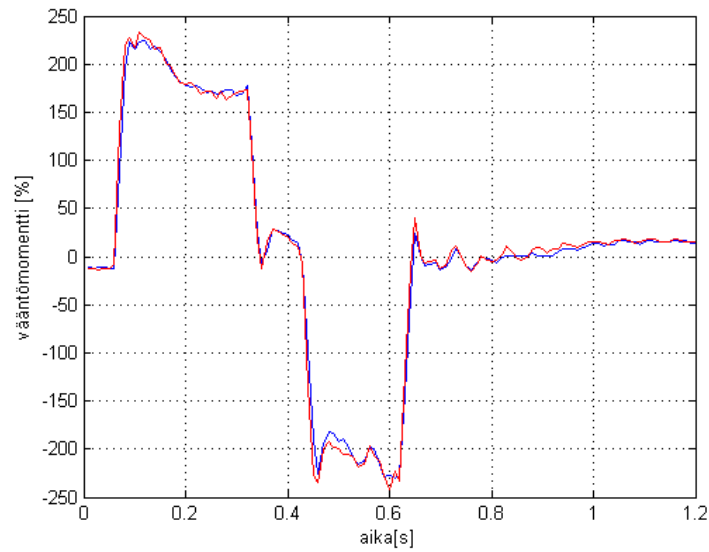
Kuva 5.9 x-akselin vääntömomentin kuvaaja suurimmalla sallitulla kiihtyvyyden arvolla.

Vääntömomenttikuvaajasta nähdään, että jarrutuksessa voidaan käyttää suurempaa kiihtyvyyden arvoa kuin kiihdytyksessä. Kokeellisesti löydetty suurin hidastuvuus on $19,4 \text{ m/s}^2$. Kuvassa 5.10 on esitetty nopeuskuvaaja suurimmalla sallitulla hidastuvuudella. Nopeuden muutos aika jarrutuksessa on $0,24 \text{ s}$, joka on edelleen hieman suurempi kuin valmistajan ilmoittama minimiaika $0,2 \text{ s}$.



Kuva 5.10 x-akselin nopeuskuvaaja kiihtyvyydellä $14,4 \text{ m/s}^2$ ja hidastuvuudella $19,4 \text{ m/s}^2$. Sininen käyrä edustaa mitattua nopeutta ja punainen nopeusreferenssiä.

Nopeuden kokonaissuoritus aika on nyt $0,70 \text{ s}$. Suurin hidastuvuuden arvo $19,4 \text{ m/s}^2$ vastaa 90% valmistajan ilmoittamasta maksimiarvosta ja 39% suurimmasta sallitusta rakenteellisesta kiihtyvyydestä 50 m/s^2 . x-akselin vääntömomentin kuvaaja suurimmalla hidastuvuudella on esitetty kuvassa 5.11. Vääntömomenttikuvaajasta nähdään, että säätö käyttäytyy stabiilisti. Vääntömomentin nousunopeus jarrutuksessa on 20 ms .



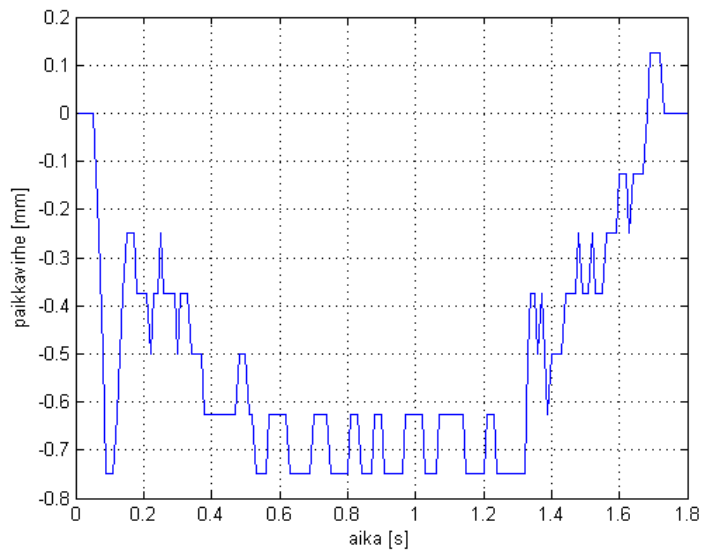
Kuva 5.11 x-akselin vääntömomentin kuvaaja maksimisuoritusarvoilla. Sininen käyrä edustaa mitattua vääntömomenttia ja punainen referenssiä.

Koska mittaukset osoittivat tarkkuuden huonoksi x-akselilla näillä säätimien parametreilla, säätöä tutkittiin uudelleen. Ryhmämme havaitsi, että nopeusvirheen sekä kiihtyvyyssmyötäkytkennän suodatusaikavakioilla on erittäin suuri merkitys säädön stabiiliuden kannalta. Säädön stabiloitumisen myötä vahvistuksia pystyttiin kasvattamaan ja integrointiaikaa pienentämään huomattavasti. Derivoiva osa jätettiin lopulta kokonaan pois. Uudet säätimien parametrit on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3 x-akselin säätimien uudet parametrit

Parametri	Arvo
Nopeussäätäjän vahvistus P_{speed}	50
Paikkasäätäjän vahvistus P_{pos}	70
Integrointiaika T_i	0,08 s
Kiihtyvyyden kompensointi T_{acc}	0,55 s
Nopeusmyötäkytkennän vahvistus P_{sFF}	0,95
Suodatus, nopeusvirhe T_{Fser}	1 ms
Suodatus, kiihtyvyyden kompensointi T_{Facc}	5 ms

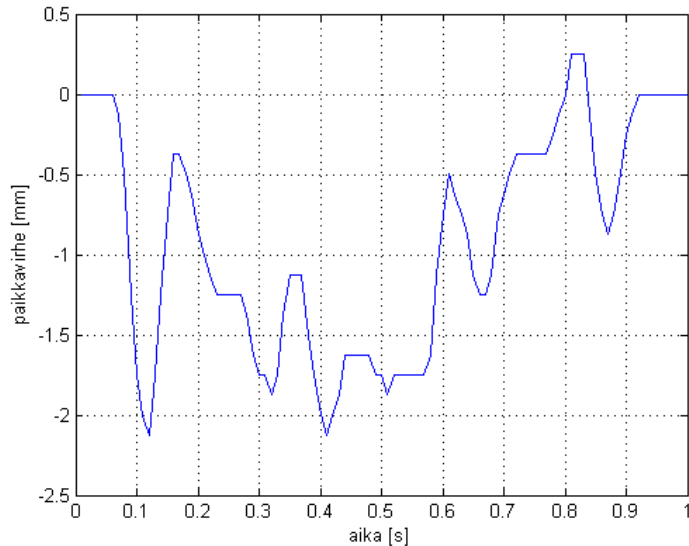
Nyt keskityttiin tarkastelemaan ainoastaan säädön vaikutusta tarkkuuteen. Kuvassa 5.12 on ensimmäisen mittauspisteen ratavirheen kuvaaja. Mittauksessa käytettiin nopeusramppia, jonka vakionopeutena käytettiin arvoa 1 m/s ja kiihtyvyytenä 2,5 m/s².



Kuva 5.12 x-akselin paikan virhe uusilla säätimien parametreilla, kun nopeus on 1 m/s ja kiihtyvyyys 2,5 m/s².

Kuvasta 5.12 nähdään, että nyt päästään alle 1 mm ratavirheeseen. Dynaamisen tilan virhe on suurimmillaan 0,75 mm, joka vastaa 0,6 % kierrospituudesta. Jarrutuksessa tapahtuu 0,12 mm ylitys, mutta pysyvän tilan virhettä ei jää lainkaan. Suoritus aika on nyt

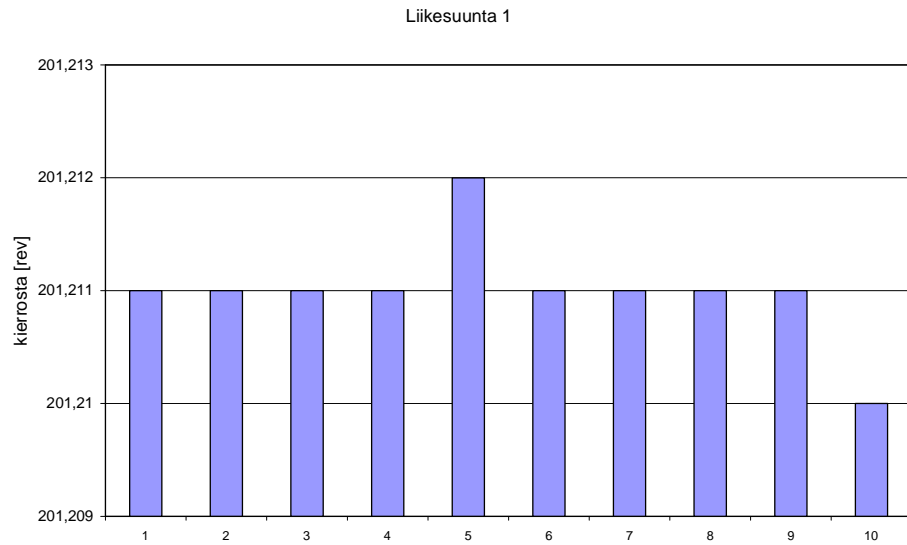
1,7 s. Uusia parametreja testattiin myös nopeammalla rampilla. Kuvassa 5.13 on esitetty ratavirheen kuvaaja nopeusrampilla, jossa vakionopeus on 2,5 m/s ja kiihtyvyys 10 m/s².



Kuva 5.13 x-akselin paikan virhe, kun nopeus on 2,5 m/s ja kiihtyvyys 10 m/s².

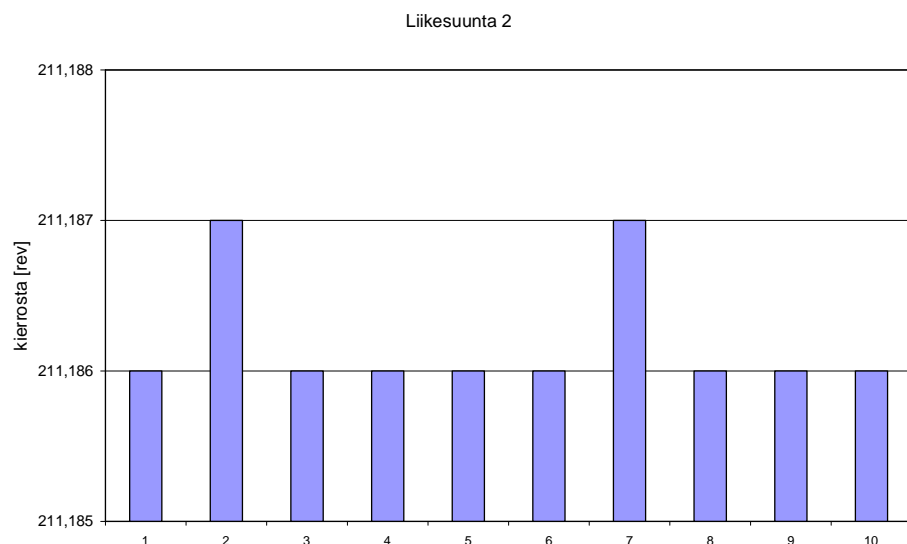
Nyt päästään myös suuremmilla kiihtyvyyden ja nopeuden arvoilla kohtuullisen hyviin tarkkuuksiin. Kuvasta 5.13 saadaan suurimmaksi virheeksi radalla 2,15 mm, joka vastaa 1,7 % kierrospituudesta. Ylitystä tapahtuu 0,25 mm eli 0,2 %. Suoritusajaksi saadaan 0,85 s, kun radan pituus on 1,25 m.

Paikoitustarkkuus on aluksi määritelty toistettavuutena. Mittauksia suoritettiin ensin toistokokeina maksiminopeudella 3,8 m/s kymmenen toiston sarjoina kumpaankin liikesuuntaan. Kuvassa 5.14 nähdään mittauksien tulokset liikuttaessa moottoria kohti.



Kuva 5.14 Toistotarkkuus, kun liikutaan moottoria kohti nopeudella 3,8 m/s. Tavoiteltu paikka on 201,200 moottorin akselin kierrosta.

Kuvasta 5.14 havaitaan, että vaikka paikka ylittyy, hakeutuu akseli aina samansuuruisen ylitykseen. Poikkeavat arvot sarjassa johtuvat todennäköisesti taajuudenmuuttajan pyöristystarkkuudesta. Jos poikkeamat kuitenkin otetaan huomioon, toistotarkkuudeksi saadaan 0,125 mm, mikä on hyvä tulos suurilla nopeuksilla. Tarkastellaan seuraavaksi vielä liikesuuntaa moottorista poispäin.



Kuva 5.15 Toistotarkkuus, kun liikutaan moottorista poispäin nopeudella 3,8 m/s. Tavoiteltu paikka on 211,200 moottorin akselin kierrosta.

Kuvasta 5.15 nähdään, että sama toistotarkkuus pätee myös toiseen suuntaan liikuttaessa. Moottorista pois päin liikuttaessa poikkeama referenssiarvosta on kuitenkin suurempi.

5.2 y-akseli

Y-akselin mittaukset aloitettiin myös nopeustarkastelulla. Parametrien asetteleminen oli helpompaa, kuin x-akselille y-akselin ollessa hieman symmetrisempi kitkojen suhteen. Myös y-akselin säätö mitoitettiin PID-säädöksi samoin periaattein kuin x-akselille. y-akselin säätöparametrit on esitetty taulukossa 5.4. Lisäksi mittausten kannalta oleellinen tieto on käytetty radan pituus $l = 10$ kierrosta, joka vastaa 0,9 metriä.

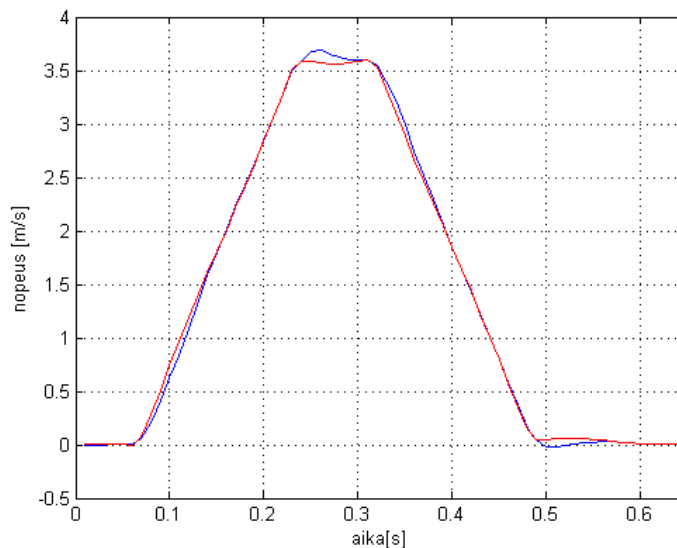
Taulukko 5.4 y-akselin säätöparametrit ACS M1:ssä

Parametri	Arvo
Nopeussäätäjän vahvistus P_{speed}	30
Paikkasäätäjän vahvistus P_{pos}	35
Integrointiaika T_i	0,03 s
Derivointiaika T_d	0,008 s
Kiihtyvyyden kompensointi T_{acc}	0,16 s
Nopeusmyötäkynnän vahvistus P_{sFF}	0,85
Suodatus, D-osa T_{Fder}	4 ms
Suodatus, nopeusvirhe T_{Fserr}	1 ms
Suodatus, kiihtyvyyden kompensointi T_{Facc}	3 ms

Ensimmäisessä mittauspisteessä haettiin y-akselin maksimiarvoja kiihtyvyydelle ja nopeudelle. Kuten jo aiemmin on todettu kiihtyvyyttä rajoittaa suurin sallittu vääntömomentti. Valmistajan antamien arvojen mukaisesti suurin sallittu vääntömomentti y-akselille on 250 % nimellisestä arvosta. Nopeuden raja sen sijaan aiheutuu kiihtyvyyden rajoituksista siten, että akseli ehtii kiihtyä annettuun vakionopeuteen. Suositeltavaa on

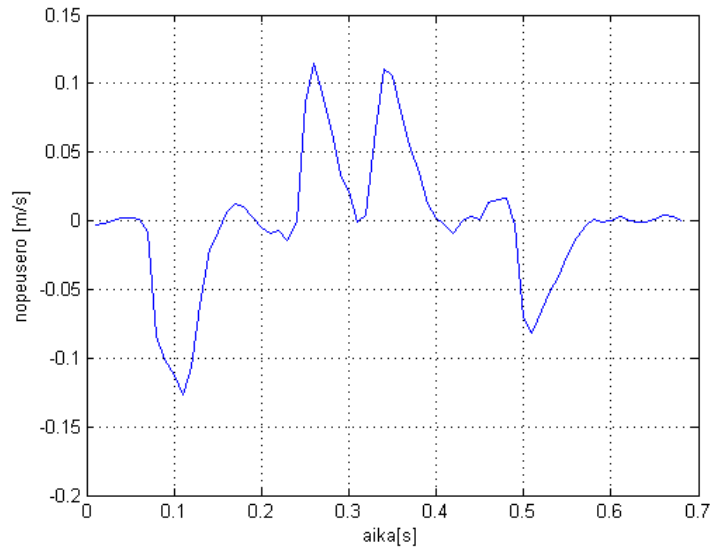
myös, että kiihdytyksen ja jarrutuksen väliin jää pieni vakionopeusalue. Tästä johtuen nopeuden suhteen ei voida välttämättä puhua suurimmasta mahdollisesta arvosta.

y-akselin kohdalla suurin kiihtyvyys saavutti arvon $21,6 \text{ m/s}^2$, jolloin vakionopeudeksi saatiin $3,6 \text{ m/s}$. Saavutettu kiihtyvyys on noin 43 % suurimmasta mahdollisesta kiihtyvyydestä ja noin 67 % valmistajan mitoittamasta arvosta sekä nopeus $3,6 \text{ m/s}$ noin 72 % alun perin mitoitettusta arvosta. Kuvassa 5.16 on esitetty nopeusohje ja mitattu nopeus samassa kuvaajassa.



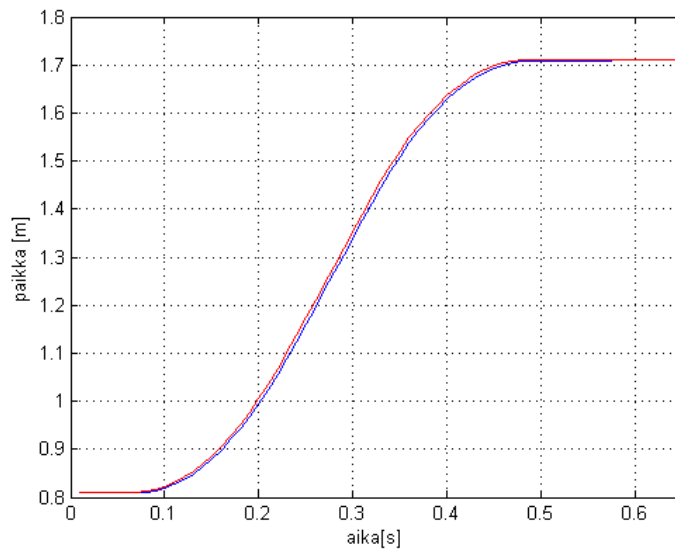
Kuva 5.16 y-akselin nopeuskuvaaja, kun nopeus johteella on $3,6 \text{ m/s}$. Kiihtyvyys on $21,6 \text{ m/s}^2$. Sininen käyrä vastaa mitattua nopeutta ja punainen nopeusohjetta.

Kuvasta 5.16 nähdään, että nopeus ei ehdi asettua vakionopeusalueella kunnolla. Nopeuden nousuaika on tässä tapauksessa $0,19 \text{ s}$, joka on suurempi kuin valmistajan ilmoittama minimaiaika $0,14 \text{ s}$. Lisäksi voidaan jo silmämääräisesti huomata, että kiihdytys- ja jarrutusvaiheessa todellisella nopeudella on vaikeuksia seurata referenssiä. Samat asiat nähdään helpommin kuvasta 5.17, johon on piirretty todellisen nopeuden ja nopeusreferenssin erotus.



Kuva 5.17 y-akselin nopeuseron kuvaaja nopeudella 3,6 m/s.

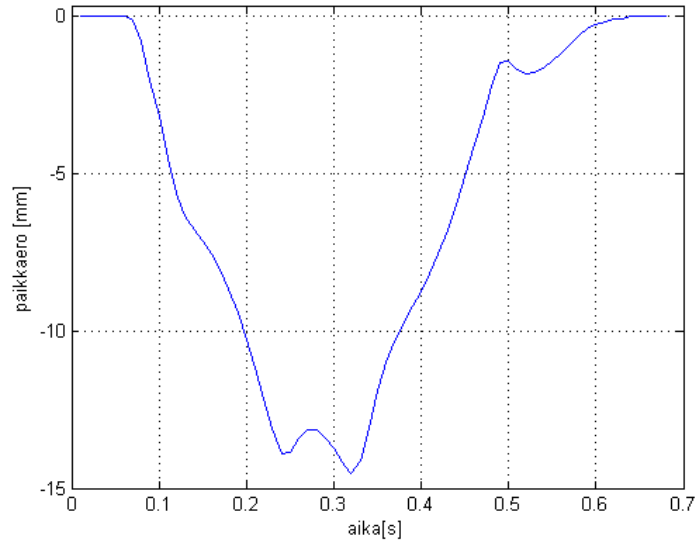
Virheen suurin arvo on 0,129 m/s, joka on noin 3,5 % saavutetusta 3,6 m/s nopeudesta. Lisäksi kiihdytyksen jälkeinen ylitys on 0,045 m/s, joka vastaa 1,23 % ja jarrutuksen jälkeinen ylitys on 0,023 m/s, joka puolestaan vastaa 0,63 %. Pienempi ylitys jarrutusvaiheessa johtuu kitkan vaikutuksesta. Nopeusrampin kokonaissuoritus-aika on 0,44 s.



Kuva 5.18 y-akselin paikkakuvaaja edellä mainituilla nopeuden ja kiihtyvyyden arvoilla. Sininen käyrä edustaa mitattua paikkaa ja punainen paikkareferenssiä.

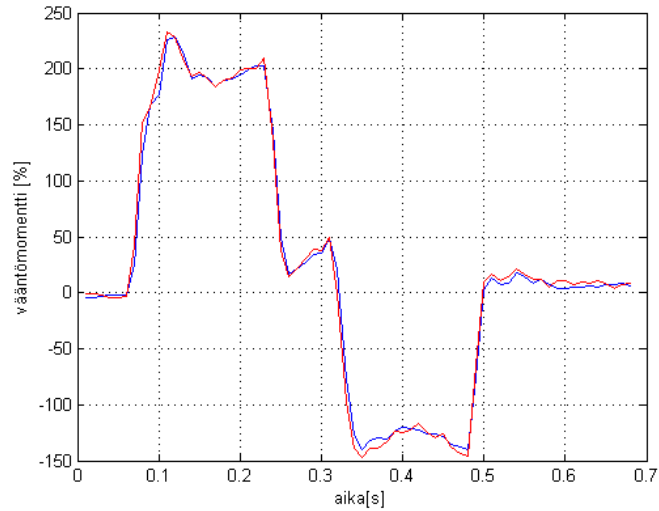
Kuvassa 5.18 on esitetty toteutunut rata, sekä paikkareferenssi. Mitatussa paikassa ei tapahdu ylitys lainkaan. Sen sijaan dynaamista virhettä syntyy koko radan matkalle ku-

van 5.19 mukaisesti. Virhe on laskettu vähentämällä mitatusta paikasta referenssi arvo ja tulos on kerrottu hihnapyörän kierroksen pituudella, joka tässä tapauksessa 90 mm.



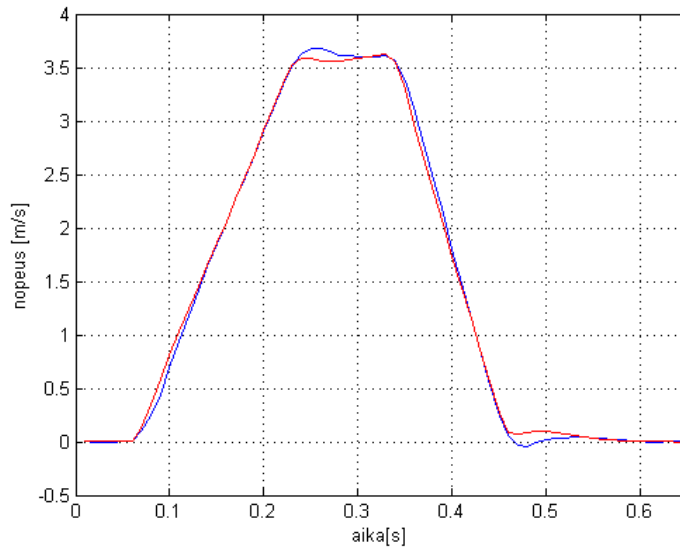
Kuva 5.19 y-akselin paikkavirheen kuvaaja.

Paikan virhekäyrä on esitetty millimetreinä havainnollisuuden vuoksi. Suurin dynaaminen virhe radalla on 14,55 mm, joka on 16,2 % kierrospituudesta. Pysyvän tilan virhettä paikkaan ei jää, eikä ylitystä tapahdu.



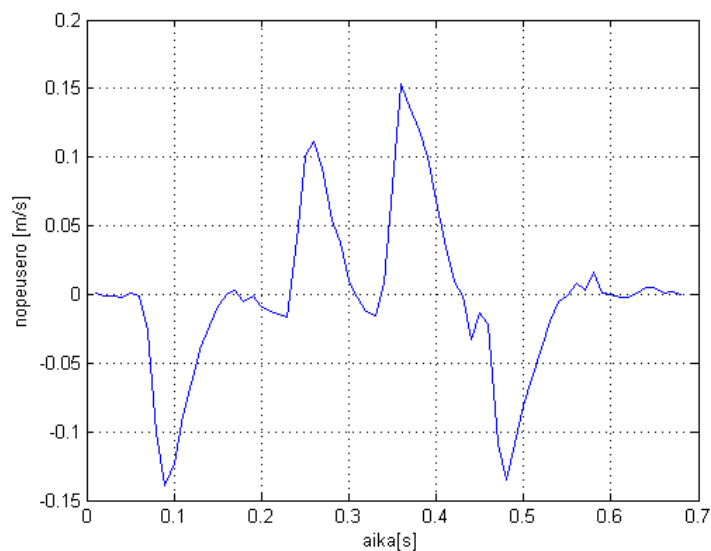
Kuva 5.20 y-akselin vääntömomentin kuvaaja. Sininen käyrä edustaa mitattua vääntömomenttiä ja punainen vääntömomenttireferenssiä.

Kuvassa 5.20 on esitetty vääntömomenttikuvaaja. Vääntömomentin käyrämuoto on odotetun kaltainen. Voidaan huomata, että vääntömomentti seuraa annettua referenssiä hyvin. Kuvasta nähdään myös, että jarrutuksessa saavutetaan vääntömomentin arvo 148 %, mikä antaa mahdollisuuden suuremman hidastuvuuden käyttämiseen. Kiihdytyksessä vääntömomentti nousee erittäin lähellä maksimiarvoaan 248 %. Näin ollen suoritettiin mittaukset epäsymmetrisellä nopeusrampilla käyttäen hidastuvuuden arvona kokeellisesti löydettyä maksimiarvoa $30,6 \text{ m/s}^2$, joka vastaa 61 % alun perin mitoitettusta maksimikiihtyvyydestä. Vääntömomentin nousuaika on 50 ms.



Kuva 5.21 y-akselin nopeuskuvaaja maksimisuoritusarvoilla 3,6 m/s, 21,6 m/s² ja 30,6 m/s². Sininen käyrä edustaa mitattua nopeutta, punainen referenssiä.

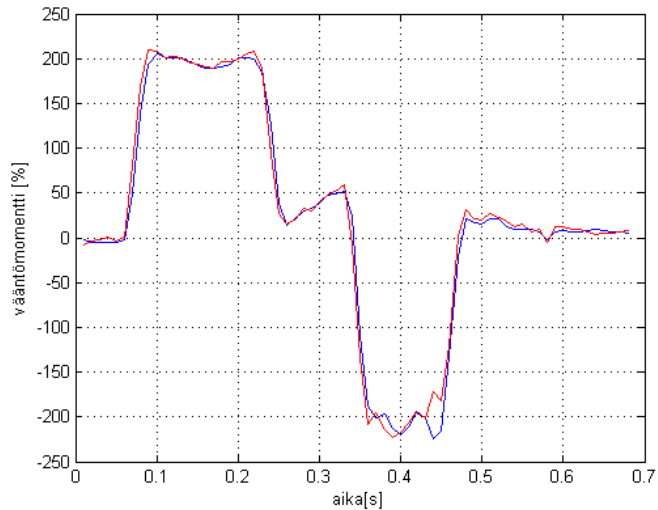
Nyt jarrutusramppi on nopeusramppia huomattavasti jyrkempi. Kiihdytysrampin ylitys pysyy lähellä samaa arvoa kuin aiemminkin, mutta jarrutuksessa ylitys on nyt 0,046 m/s, joka vastaa 1,25 %. Laitevalmistaja on ilmoittanut pienimmäksi sallituksi nopeuden nousuajaksi 140 ms, joka hieman tässä jo alittuu. Nopeuden nousuajaksi kuvaajasta 5.21 saadaan 132 ms. Myös suoritus aika lyhenee hiukan ollen nyt 0,406 s.



Kuva 5.22 y-akselin nopeusvirhe maksimiarvoilla.

Vertaamalla kuvia 5.22 ja 5.17 huomataan, että dynaaminen virhe kasvaa hieman. Nyt suurin dynaaminen virhe saa arvon 0,153 m/s, joka vastaa 4,21 %. Kuvassa 5.23 esite-

tystä vääntökäyrästä voidaan todeta, että nyt jarrutusvaiheessakin ollaan maksimiarvos-
sa.



Kuva 5.23 y-akselin vääntömomenttikuvaaja maksimiarvoilla.

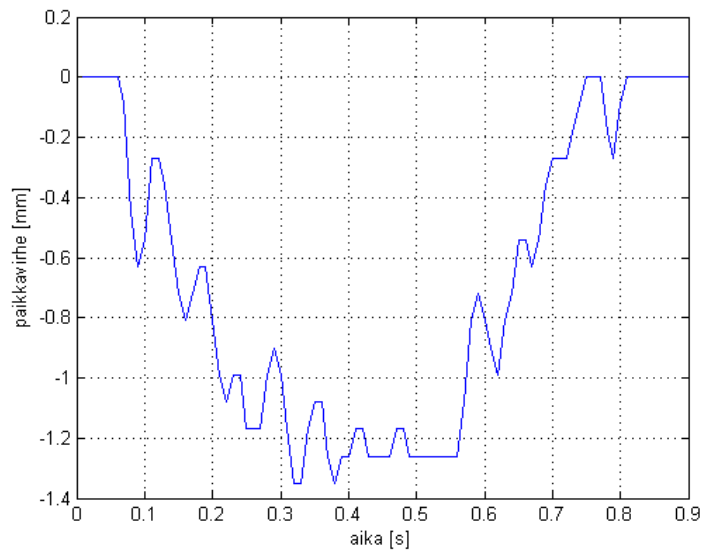
Vääntömomentin muutos aika jarrutuksessa on nyt 30 ms. Kuvaajassa ei juuri ole havaittavissa värähtelyjä, joten säätö käyttäytyy stabiilisti.

Tarkkuusmittauksia varten myös y-akselille viritettiin uudet säätimien parametrit. Virityksessä käytettiin samaa periaatetta kuin x-akselilla. Derivoiva osa jätettiin kokonaan pois ja vahvistuksia kasvatettiin huomattavasti. y-akselin uudet parametrit on esitetty taulukossa 5.5.

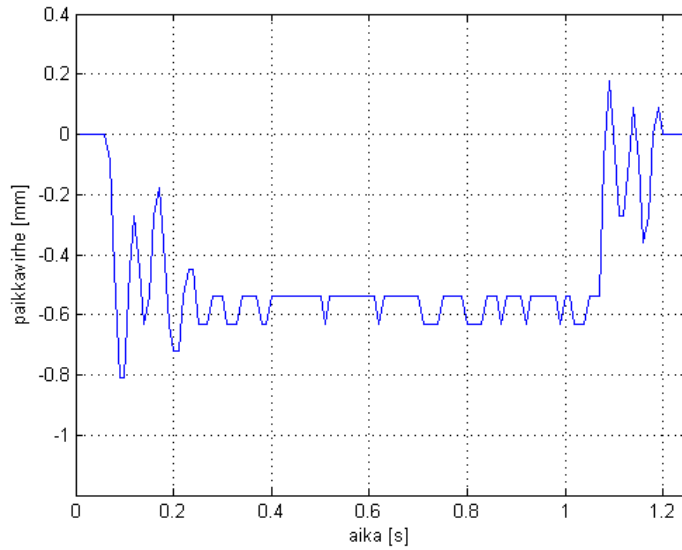
Taulukko 5.5 y-akselin uudet säätimien parametrit

Parametri	Arvo
Nopeussäätäjän vahvistus P_{speed}	55
Paikkasäätäjän vahvistus P_{pos}	75
Integrointiaika T_i	0,02 s
Kiihtyvyyden kompensointi T_{acc}	0,16 s
Nopeusmyötäkennän vahvistus P_{sFF}	0,85
Suodatus, nopeusvirhe T_{Fser}	1 ms
Suodatus, kiihtyvyyden kompensointi T_{Facc}	5 ms

Uusilla parametreilla kokeiltiin ensin ajaa mahdollisimman suurilla nopeuden ja kiihtyvyyden arvoilla. Kuvassa 5.24 on esitetty paikkavirheen kuvaaja nopeudella 1,8 m/s ja kiihtyvyydellä 9 m/s².

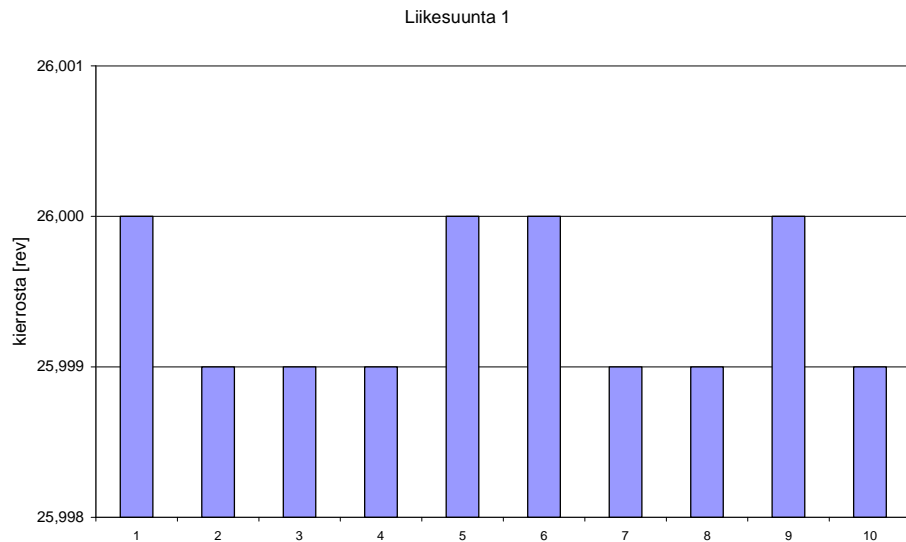
Kuva 5.24 y-akselin paikkavirheen kuvaaja, kun nopeus on 1,8 m/s ja kiihtyvyys 9 m/s².

Kuvasta 5.24 nähdään ratavirheen olevan nyt suurimmillaan 1,35 mm, joka vastaa 1,5 % kierrospituudesta. Nopeutta ja kiihtyvyyttä pienennettiin edelleen. Kuvassa 5.25 on esitetty ratavirheen kuvaaja arvoilla 0,9 m/s ja 12,5 m/s².

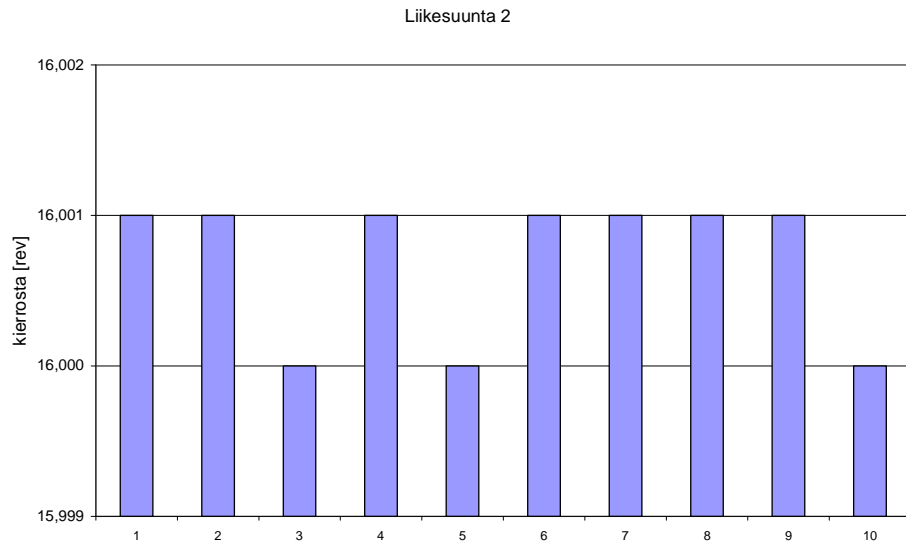


Kuva 5.25 y-akselin paikkavirheen kuvaaja, kun nopeus on 0,9 m/s ja kiihtyvyys 12,5 m/s²

Kuvien 5.24 ja 5.25 voidaan havaita, että kiihtyvyyden arvo on lähes merkityksetön dynaamisen tarkkuuden kannalta. Tämän lisäksi tutkittiin vielä toistotarkkuutta sekä pienellä, että suurella nopeudella. Toistomittauksia tehtiin 10 kummassakin tapauksessa ja paikan arvo valittiin aina samalta ajanhetkeltä. Kuvassa 5.26 on esitetty toistotarkkuusmittauksen tulokset kun liikutaan moottoria kohti ja kuvassa 5.27 tilanne, jossa liikutaan pois päin moottorista. Mittaukset ovat tehty suurimmilla sallituilla kiihtyvyyden, hidastuvuuden ja nopeuden arvoilla.



Kuva 5.26 y-akselin toistotarkkuusmittaus, kun liikesuunta on kohti moottoria. Tavoiteltu paikka on 26,000 moottorin akselin kierrosta.



Kuva 5.27 y-akselin tarkkuusmittaus, kun liikutaan moottorista pois päin. Tavoiteltu paikka on 16,000 moottorin akselin kierrosta

Tilanne on y-akselin kohdalla täsmälleen sama kuin x-akselilla. Toistotarkkuudeksi saadaan 0,001 kierrosta, joka voi mahdollisesti johtua pyöristysvirheestä. On huomattava, että y-akselilla tämä 0,001 kierrosta vastaa vain 0,09 mm. Työn alussa on mainittu, että lineaarisen hihnavetoisen johteen tarkkuus on 0,1 mm, joten voidaan todeta, ettei tämän parempaan tarkkuuteen ole mahdollista päästä hammashihnavetoisilla johteilla.

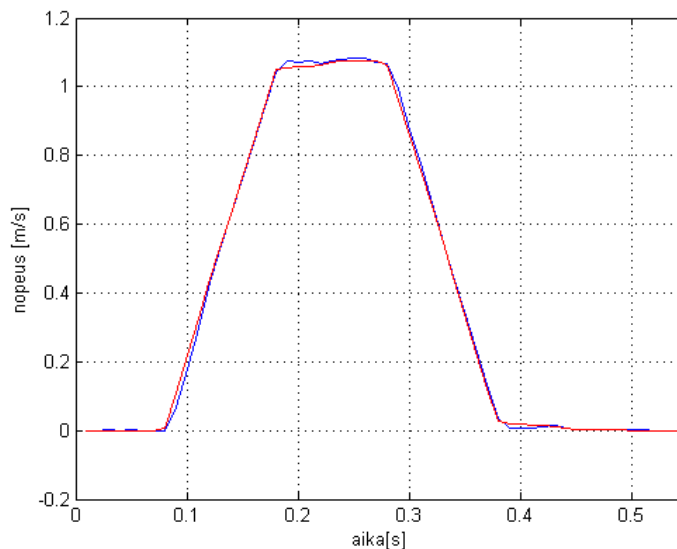
5.3 z-akseli

z-akselin kohdalla mittauksia tehtiin x- ja y-akselia vähemmän. Tämä johtuu siitä, että z-akselin tapauksessa ratatarkkuudella ei ole merkitystä. z-akselin pääasiallinen tehtävä on vain tarttua kappaleeseen ja päästää siitä irti sopivassa vaiheessa. Paikoitus- ja toistotarkkuudella sen sijaan on suuri merkitys, jotteivät kuljetettavat kappaleet vaurioitu niihin tartuttaessa. z-akselin pitäisi pystyä toteuttamaan määritetty nopeus 2 m/s ja kiihtyvyys 20 m/s^2 . Mittaukset aloitettiin nopeus- ja kiihtyvyyssominaisuuksien tarkastelulla, kuten muillakin akseleilla. z-akselin säätimien parametrit on esitetty taulukossa 5.6.

Taulukko 5.6 z-akselin säätimien parametrit

Parametri	Arvo
Nopeussäätäjän vahvistus P_{speed}	25
Paikkasäätäjän vahvistus P_{pos}	35
Integrointiaika T_i	0,02 s
Kiihtyvyyden kompensointi T_{acc}	0,03 s
Nopeusmyötäkynnän vahvistus P_{sFF}	0,85
Suodatus, nopeusvirhe T_{Fserr}	0.5 ms
Suodatus, kiihtyvyyden kompensointi T_{Facc}	3 ms

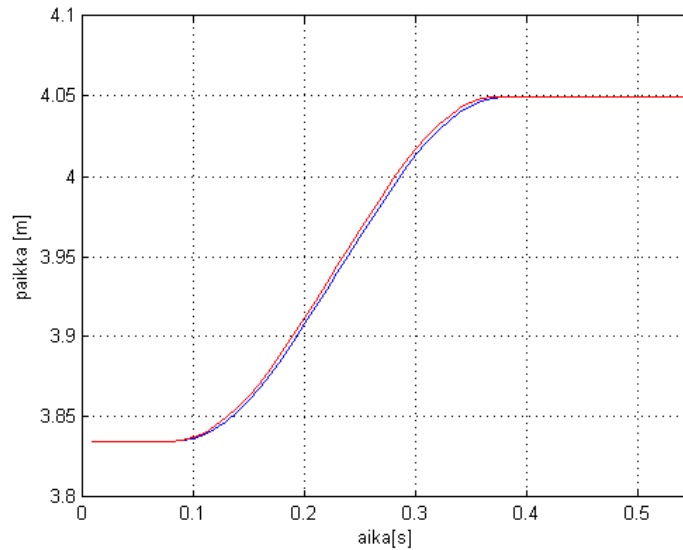
Koska z-akselin liike on maan vetovoimakentän suuntainen, sen käyttäytyminen poikkeaa riippuen ajosuunnasta. Ensimmäiseksi on tarkasteltu liikettä alaspäin. Kuvassa 5.28 on esitetty nopeuskuvaaja, kun lineaarinen nopeus johteella on 1,1 m/s ja kiihtyvyys 10 m/s². Kuvan käyrä esittää moottorin akselin nopeutta, eikä siis nopeutta vaihteiston jälkeen.



Kuva 5.28 z-akselin nopeuskuvaaja, kun liikutaan alaspäin.

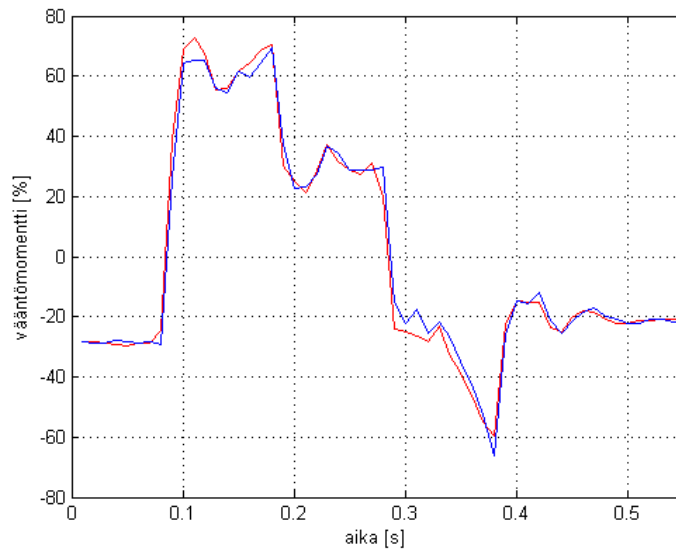
Tässä on syytä huomata, että positiivinen liikesuunta on nyt alaspäin. Nopeus seuraa kuvan perusteella referenssiä hyvin, eikä värähtelyä ole juurikaan havaittavissa. Nopeu-

den muutos aika on tässä tapauksessa 0,11 s. Kuvassa 5.29 on esitetty paikkakuvaaja samasta tilanteesta. Kuvaajasta nähdään, ettei ylitystä synny, ja että pysyvän tilan virhe integroituu pois varsin lyhyessä ajassa.



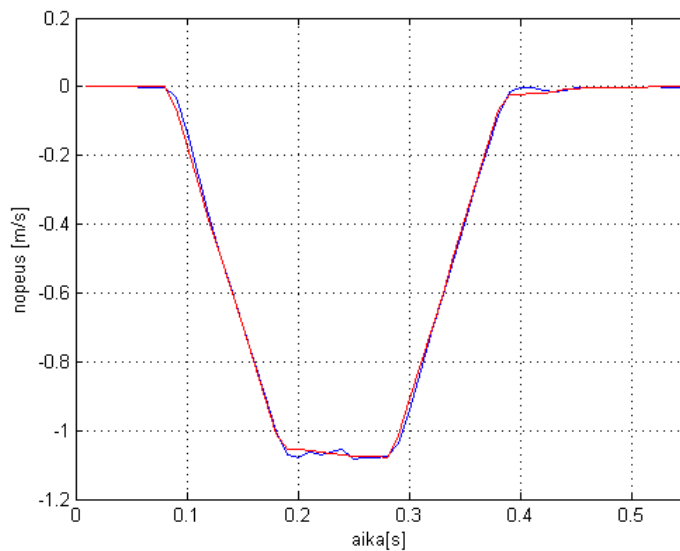
Kuva 5.29 z-akselin paikkakuvaaja liikuttaessa alaspäin.

Oikea paikka saavutetaan kuvan 5.29 perusteella 0,52 sekunnissa. Vääntömomenttikuvaaja on esitetty kuvassa 5.30. Kuvasta nähdään, että johteen paikallaan pitämiseen tarvitaan noin 25 % moottorilta saatavasta vääntömomentista, mikä vastaa vaihteiston jälkeen 0,53 Nm eli 41 N. Tulos oli odotettu sillä, jos otetaan huomioon z-akselilla liikkuva massa sekä maan vetovoimakiihtyvyyden, saadaan, että z-akselin kuorma levossa on noin 45 N.



Kuva 5.30 z-akselin vääntömomentin kuvaaja kun liikutaan alaspäin.

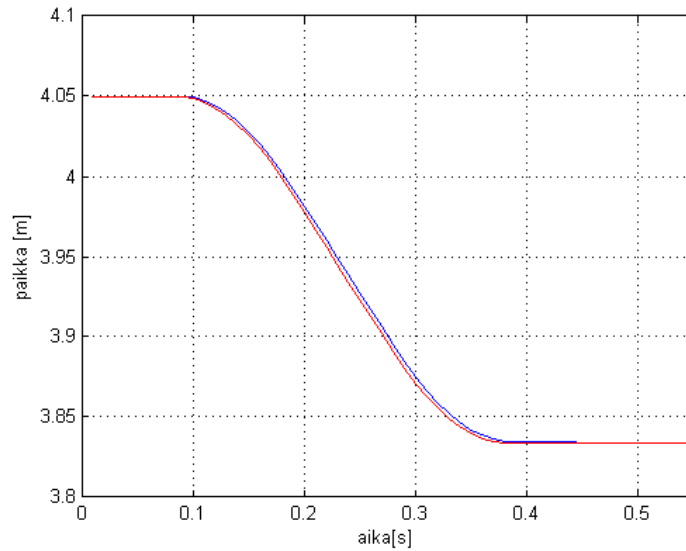
Vääntömomenttikuvaajasta nähdään myös poikkeava käyrämuoto verrattuna vaakatasossa liikkuviin x- ja y-akseleihin. Sama mittaus toistettiin myös ajettaessa akselia ylöspäin. Kuvassa 5.31 on esitetty nopeuskuvaaja.



Kuva 5.31 z-akselin nopeuskuvaaja, kun liikutaan alhaalta ylös.

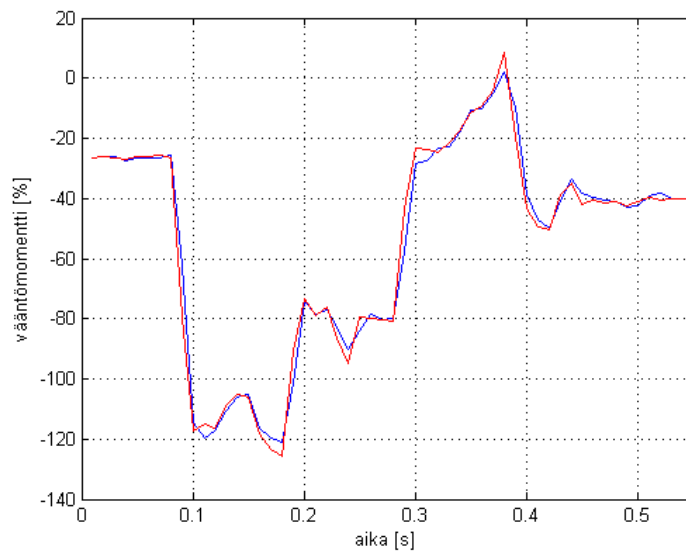
Kuvasta 5.31 nähdään, että nopeuteen syntyy nyt hieman värähtelyjä. Mitattu nopeus seuraa kuitenkin hyvin annettua referenssiä. Kuvassa 5.32 esitetystä paikan kuvaajasta nähdään kuitenkin, ettei paikka toteudu aivan yhtä hyvin kuin nopeus. Paikkaan jää pie-

ni pysyvän tilan virhe, joka kuitenkin ajautuu pois noin 0,1 sekunnissa. z-akselin suoritusaika paikan suhteen on suurimmillaan 0,41 sekuntia.



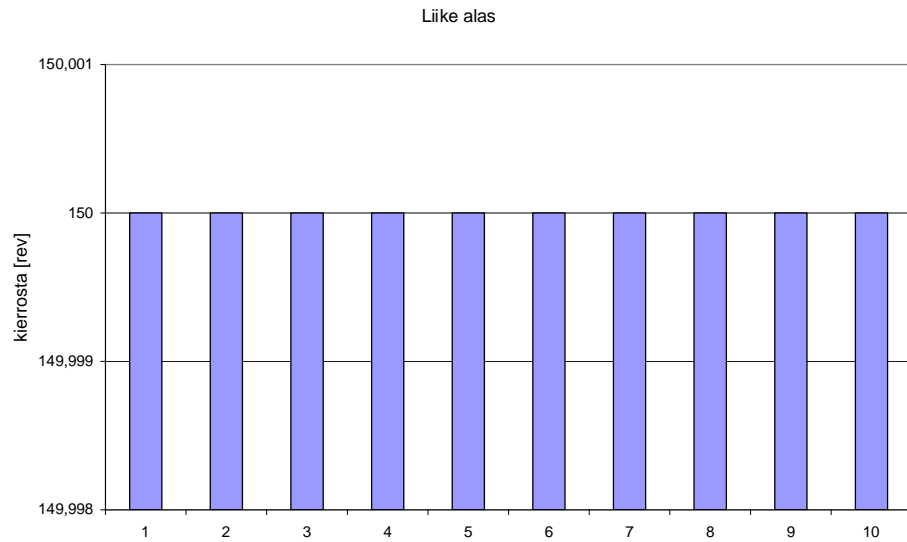
Kuva 5.32 z-akselin paikan kuvaaja, kun liikutaan ylöspäin.

Vääntömomentin kuvaaja ylöspäin liikuttaessa (kuva 5.33) on hyvin samankaltainen kuin kuvan 5.30 alaspäin suuntautuneessa liikkeessä. Nyt kiihdytysvaiheessa kuluu enemmän vääntömomenttia, kun liikutaan maan vetovoimakenttää vastaan.

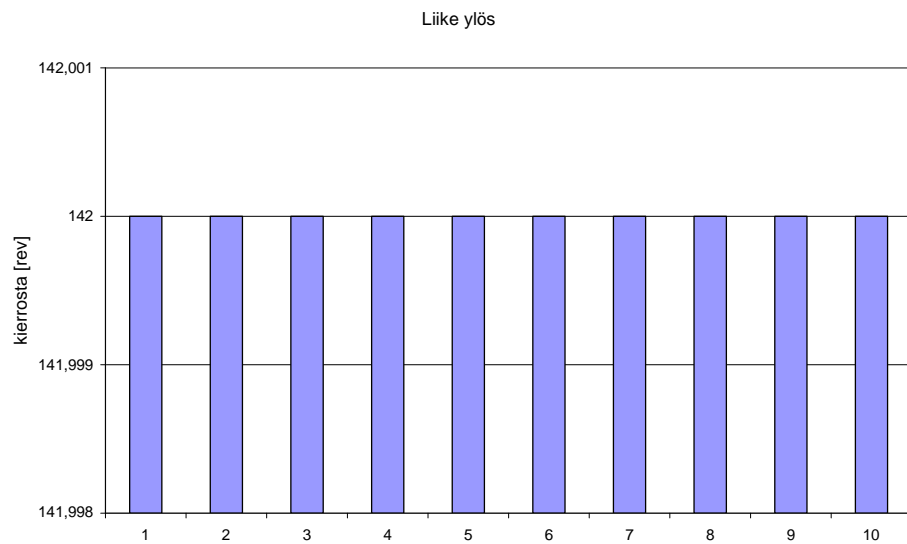


Kuva 5.33 z-akselin vääntömomentin kuvaaja kun liikutaan ylöspäin.

Myös z-akselille suoritettiin toistotarkkuusmittaukset. Kummassakaan mittaussarjassa ei saatu yhtään poikkeavaa arvoa käytetyllä tarkkuudella. Tästä tuloksesta voidaan siis päätellä, että z-akselilla on erinomainen paikoitustarkkuus.



Kuva 5.34 z-akselin paikoitustarkkuus alaspäin liikuttaessa. Tavoiteltu paikka on 150,000 moottorin akselin kierrosta.



Kuva 5.35 z-akselin paikoitustarkkuus ylöspäin liikuttaessa. Tavoiteltu paikka on 142,000 moottorin akselin kierrosta.

5.4 Johtopäätökset ja koelaitteen soveltuvuus pakkauslinjalle

Mittausten perusteella päädytään samaan tulokseen kokonaissuoritusajkaan vaikuttavista tekijöistä, kuin aiemmin mitoitusta käsiteltäessä. x-akseli on selkeästi hitain sen yhden liikesuunnan suoritusajan ollessa 0,7 s. Jos tilannetta arvioidaan samoin kuin kuvassa 3.9, jossa on otettu huomioon 0,2 s lepoaika, saadaan x-akselin edestakaisen liikkeen suoritusajaksi 1,6 s. y- ja z-akseleille vastaava aika on 1,02 s. Kaikilla akseleilla jäätiin hieman teoreettisista maksiminopeuksista ja – kiihtyvyyksistä.

Tarkkuustarkastelu osoitti kaikkien akselien pystyvän hyvään paikoitustarkkuuteen suurillakin nopeuksilla. Ratatarkkuudessa sen sijaan ei päästä suurilla nopeuksilla tyydyttäviin tuloksiin. Ratatarkkuutta saatiin parannettua merkittävästi uusilla säätimien parametreilla. Tästä huolimatta 1 mm ratatarkkuudella jäähdään noin 1 m/s nopeuksiin ja alle 10 m/s² kiihtyvyyksiin. Tästä seuraa, että x-akselin tapauksessa kiihtyvyyden jäädessä 2,5 m/s², suoritusajaksi yhteen suuntaan liikuttaessa pitenee noin yhdellä sekunnilla, mikäli liike tapahtuu koko johteen pituudella. Ratapituus on kuitenkin monissa sovelluksissa lyhyempi, joten esimerkiksi 0,6 m pitkällä radalla suoritusajaksi yhden suuntaisella liikkeellä pienenesi 0,8 sekuntiin.

Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että massakeskipiste on kunkin akselin tapauksessa pyritty tasapainottamaan ja pitämään paikallaan. Kappaleessa 3.4.3 käsitelty muuttuvan massakeskipisteen aiheuttamaa ilmiötä ei saatu mittauksissa esiin johtuen antureiden tarkkuuksista sekä näytteistyksestä. On myös huomattava, että mitausten arvot ovat moottorin akselilta saatuja arvoja, ei siis absoluuttisia paikan tai nopeuden arvoja johteella. Analogisia paikka-antureita ei mittauksissa pystytty hyödyntämään ACS M1:ssä ilmenneen skaalausongelman vuoksi.

Työn yhtenä päämääränä oli selvittää koelaitteiston soveltuvuutta pakkauslinjan osaksi. Kappaleessa 2.6 käsiteltiin pakkauslinjojen liikkeenohjausta yleisellä tasolla. Koelaitteen kaltaiselle järjestelmälle löytyy teoriassa useitakin sovellusvaihtoehtoja esimerkiksi kartonkipakkausteollisuudesta. Mittaustulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, ettei koelaitteisto nykyisellään sovellu esimerkiksi suurta tarkkuutta vaativaan aihoiden leikkaukseen. Vaikka tarkkuusvaatimukseen pystyttäisiin vastaamaan, ei laitteen tuotantonopeus ole kilpailukykyinen. Kilpailukykyisen sovelluksen toteuttaminen vaatii vielä

jatkotutkimuksia. Sen sijaan kappaleen käsittelytehtäviin, joita pakkauslinjan tapauksessa on havainnollistettu kuvassa 2.10, laite soveltuisi hyvin paikoitustarkkuuden ollessa hyvä kaikissa liikesuunnissa.

6 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin rakennetun koelaitteiston mitoitusta, kokoonpanoprosessia ja käyttöönottoa sekä laitteen suorituskykyä paikoitus- ja liikkeenohjauskäytössä. Myös kappaleenkäsittelyn tarvetta pakkauslinjoilla käsiteltiin lyhyesti. Mitoituksen tarkastelu osoitti, että tällä laitteistolla ei tulla yltämään johteiden rakenteelliseen maksimikiihtyvyyteen 50 m/s^2 . Laitteiston massat paljastuivat suuremmiksi, kuin oli odotettu, ja näin ollen johteiden hammashihnat osoittautuivat rajoittaviksi tekijöiksi. Hihnoille tehtyjen kokeiden perusteella saatiin selville, ettei ylikuormituksesta kuitenkaan aiheudu välitöntä hihnojen katkeamisvaaraa. Toisaalta hihnojen venymisen havaittiin olevan tätäkin suurempi rajoite.

Laitteen kiihtyvyyttä voitaisiin parantaa vaihtamalla kokoluokkaa suuremmat johteet x-akselille. Suurempi johdekoko vaatisi kuitenkin moottorilta lähes 100 Nm vääntömomenttia. Näin massiivisen laitteiston käyttäminen pienten kappaleiden liikutteluun ei kuitenkaan ole järkevää. Vaihteiston käyttäminen ei tule kysymykseen, mikäli nopeus ja kiihtyvyys halutaan pitää mahdollisimman suurina. Yhtenä vaihtoehtona voidaan pitää yhden lisäjohteen käyttämistä nykyisessä kokoonpanossa siten, että x-akselin moottorin puoleiselle sivulle asennettaisiin kaksi johdetta yhden sijaan. Tällaisella ratkaisulla muuttuvan massakeskipisteen vaikutus saataisiin myös melko hyvin eliminoitua. Jättämällä pysty akseli kokonaan pois, pystyttäisiin laitteiston rakennetta keventämään huomattavasti. Tällöin y-suunnassa tarvittaisiin ainoastaan yksi johde, ja kokonaisuudessa pienenesi jopa 15 kg . Näin ollen ainakin y-akselilla olisi mahdollista yltää jopa 50 m/s^2 kiihtyvyyteen ja x-akselillakin kiihtyvyyttä pystyttäisi lisäämään $15\text{-}20 \text{ m/s}^2$. Tällainen rakenne voisi tulla kysymykseen esimerkiksi leikkaussovelluksissa.

Mittauksilla pystyttiin osoittamaan, että koelaitteiston kitkat ovat hyvin suuret, sekä paikan suhteen epälineaariset. Tämä tuo huomattavia haastetta säädön virittämiseen. Kitkoja ei otettu huomioon massatarkastelujen pohjalta tehdyissä kiihtyvyytlaskelmissa, mistä johtuen mitatut kiihtyvyydet jäivät teoreettisia arvoja hieman pienemmiksi. Liikekitkamittausten pohjalta tehdyn kitkamallin sisällyttäminen säätöön todennäköisesti parantaisi laitteen suorituskykyä. Kitkamallin toteuttamista ACS M1-taajuudenmuuttajalla ja mallin vaikutusta laitteen suorituskykyyn on tarkoitus selvittää lisää.

Mittaustulosten perusteella voidaan päätellä, että laitteen säätöä ja ohjausta on tarpeen vielä kehittää. Tulosten pohjalta on voitu todeta, että koelaitte soveltuu yksinkertaisiin paikoitustehtäviin taajuudenmuuttajien hoitaessa laitteen säädön, mutta vaativampaa liikkeenohjausta ajatellen ylemmän hierarkiatason säätö- ja ohjaus on tarpeen. Lisäksi on voitu todeta, että Profibusia nopeamman kenttäväylän käyttö voi olla tarpeen tarkan rataohjauksen kannalta. On myös otettava huomioon, ettei laitetta pystytty tämän työn puitteissa testaamaan vielä kokonaisuutena, vaan kaikki testit on tehty osa kerrallaan. ACS M1-taajuudenmuuttajan kehityksen myötä laitteistoa on mahdollista testata kokonaisuutena myös ilman kenttäväylää. Kenttäväylän kautta tapahtuvaa dSpace-pohjaista säätöä sekä kenttäväylän toimintaa käsitellään muissa tämän projektin myötä julkaistavissa töissä.

LÄHDELUETTELO

- Aaltonen, K.Torvinen, S. Konepaja-automaatio.Porvoo. 1997. WSOY. 309 s. ISBN 951-0-21439-6
- ABB, 2007. ABB Data sheets www.abb.com [viitattu 7/2007]
- Andersson S. Optimization of a Servo Motor for an Industrial Robot Application, Licentiate thesis. 2000. Lund: Uneversitetstryckeriet, Lund University. 102 s. ISBN 91-88934-15-2.
- Esbecon, 2007. Esbecon cable data sheets www.esbecon.fi [viitattu 7/2007]
- Esr Pollmeier, 2007. Esr motors data sheets www.esr-pollmeier.de [viitattu7/2007]
- Festo, 2007. Festo Data sheets www.festo.com [viitattu 6/2007]
- Heikkilä T. Permanent Magnet Synchoronous Motor for Industrial Inverter Applications – Analysis and Design. 2002. Lappeenranta: Acta Universitatis Lappeenrantaensis 134. 109 s. ISBN 951-764-699-2.
- Igus, 2007. Igus installation dimensions www.igus.de [viitattu 9/2007]
- Karjalainen, L. Pakkaus: pakkausteknologian perustietoutta. Rauma. 1982. Oy Länsi-Suomi. 325 s. ISBN 951-99408-1-2

- Lin, S., Ho, C., Tzou Y. Distributed Motion Control Using Real-Time Network Communication Techniques. 2000. Power electronics and motion control conference, volume 2. pages 843-847.
- Luukko, J. Direct torque control of permanent magnet synchronous machines – analysis and implementation. 2000. Lappeenranta: Acta Universitatis Lappeenrantaensis 97. 172 s. ISBN 951-764-438-8
- Mohan, N. Electric Drives. Minneapolis. 2003. MNPERE. ISBN 0-9715292-5-6
- Naumanen, V. Servokäyttöön tarkoitetut kestmagneettitahtimoottorit ja niiden sijaiskytkennän parametrien määrittäminen. Lappeenranta. 2006. Digipaino.
- Niiranen, J. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki. 2000. Otatieto. 381 s. ISBN 951-672-300-4
- Puranen, J. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study. 2006. Lappeenranta: Acta Universitatis Lappeenrantaensis 249. 147 s. ISBN 952-214-296-4
- Pyrhönen, J. Sähkökäytöt, opetusmoniste. Lappeenranta. 2005. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Digipaino.
- Pyrhönen, J. Pyörivän sähkökoneen suunnitleminen, opetusmoniste. Lappeenranta. 2005. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Digipaino.
- Sercos Interface, 2008. Sercos www.sercos.com [viitattu 2.1.2008, 5.2.2008]