



2-akselisen AC-servojärjestelmän liikkeenhallinta ja häiriökompensointi

Henrik Vainio

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2020

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Koneautomaatio

VAINIO, HENRIK:

2-akselisen AC-servojärjestelmän liikkeenhallinta ja häiriökompensointi

Opinnäytetyö 78 sivua, joista liitteitä 15 sivua
Joulukuu 2020

Opinnäytetyö toteutettiin prosessikehitysprojektina, joka keskittyi Tampereen ammattikorkeakoulun koneautomaation opintosuuntauksen opetuskäytössä olevaan servojärjestelmään. Kehitysprojektin oli määrä parantaa laitteiston käytettävyyttä säätö- ja servotekniikan opetuksessa.

Laitteisto koostuu tiivistetysti ohjauslaitteesta, kahdesta servomoottori- ja servovahvistinparista sekä moottoreiden akseleille asennetuista kuularuuveista. Kuularuuvien avulla mahdollistetaan kuorman ajaminen kahden akselin suuntaisesti pysty- ja vaakasuunnassa. Laitteisto on rakennettu vaimentimien päälle sekä kiinnitetty jousilla tukirakenteeseen ylhäältä päin muodostuen osaksi jousimassa-vaimennin-systeemiä ja tarkemmin tämän systeemin massaksi. Laitteiston kuorman pystysuuntaisen liikkeen myötä syntyvästä kiihtyvyydestä aiheutuu jousimassa-vaimentimeen värähtelyä, mikä luokitellaan laitteiston pystysuuntaisen aseman häiriöksi. Tavoitteena oli monipuolistaa laitteiston toiminnallisuutta ja tutkia mainitun häiriön mittausta, servojärjestelmän ohjausta ja mahdollisuuksia häiriön kompensointiin säätimen avulla sekä laatia käyttöohjeet laitteiston käyttöön.

Prosessikehitysprojektin elinkaaren aikana järjestelmää ja laitteistoa viimeisteltiin ja laajennettiin. Aiheutuvan häiriön mittausta integroitiin osaksi järjestelmää ja järjestelmän ohjausta käyttöliittymän avulla monipuolistettiin. Liikkeenhallinta perustui pulssijonon lähettämiseen ohjauslaitteelta servovahvistimelle ja huomattiin, ettei häiriön kompensointiin kykenevän säätimen luominen onnistu ilman ohjauslaitteella generoitavan ohjaussignaalin tyyppin vaihtoa, mikä puolestaan vaatisi järjestelmän laajennusta entisestään.

Lopuksi työssä tutkittiin, mitä toimenpiteitä järjestelmän laajennus vaatisi, jotta häiriön kompensointiin kykenevä säädin kyettäisiin toteuttamaan. Jatkokehityksen suunnaksi esitettiin siirtymistä analogisella jännitesignaalilla generoitavan nopeussäädön käyttöön ja määriteltiin siihen tarvittavia komponentteja ja laitteita.

Asiasanat: servotekniikka, säätötekniikka, siirtofunktio, pid

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical engineering
Machine automation

VAINIO, HENRIK:
Motion Control and Disturbance Compensation of a 2-Axis AC Servo System

Bachelor's thesis 78 pages, appendices 15 pages
December 2020

The focus of the bachelor's thesis was an operational servo system designed to be used for educational purposes by the study program of Machine Automation in Tampere University of Applied Sciences. The nature of the thesis was a process research and development project aiming to expand and improve the existing system.

A subsystem consisted of two servo motor – servo amplifier pairs and a programmable logic controller, all of which were used to control a two-axis linear positioning system. The described system was built on top of four dampers and two springs were attached between the system and the rigid frame. This mechanical structure combined with the subsystem created a spring-mass-damper system. The spring-mass-damper caused disturbance to the system on the vertical axis in the form of a positioning error. The goals of the thesis focused on implementing a method to measure the error, improving the functionality of the system as well as researching and implementing a controller to compensate the error.

During the process research and development project the error measuring was successfully integrated into the system. The system was expanded in terms of functionality and motion control. A controller to compensate the vertical positioning error could not be implemented.

Further research revealed that the positioning control method of pulse train output from the programmable logic controller to servo amplifier used in this study was incompatible with the continuous positioning control loop containing the error signal. Further process development steps are suggested, including a further expansion of the system to allow analog voltage control of the servo amplifier by the programmable logic controller.

Key words: servo control, industrial control, transfer function, pid

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SÄÄTÖTEKNIikka	8
2.1	Johdatus säätötekniikkaan	8
2.2	Dynaaminen järjestelmä.....	9
2.3	Jousi-massa-vaimennin-analyysi	13
2.4	Säätöpiirin rakenne	17
2.5	PID-säädin	22
2.6	Servotekniikka.....	28
2.7	Dynaaminen etäisyyden mittaus	30
3	PROSESSIKEHITYKSEN LÄHTÖKOHDAT	34
3.1	Järjestelmän tila alussa	34
3.2	Toimenpiteet	35
3.3	Etäisyysanturin valinta	36
3.3.1	Vaatimusmäärittely	36
3.3.2	Anturityyppien vertailu	38
3.3.3	Yhteenveto	39
4	PROSESSIKEHITYKSEN VAIHEET.....	41
4.1	Alustus	41
4.2	Aseman häiriötiedon luku PLC:llä	42
4.3	Liikkeenhallinta.....	43
4.4	Käyttöliittymän suunnittelu	46
4.5	Säätöpiirin muodostus.....	46
4.6	Laitteiston käyttöohjeiden laatiminen	47
5	TULOKSET	48
5.1	Prosessikehitys	48
5.2	Häiriön kompensointi.....	51
6	POHDINTA	57
	LÄHTEET.....	62
	LIITTEET	64
	Liite 1. FX Analog Family -katalogi.....	64
	Liite 2. Omron ZX2-laseretäisyysanturin datalehti	66
	Liite 3. Temposonics EP2-magnetostriktiivisen anturin datalehti	68
	Liite 4. SICK UM12-ultraäänianturin datalehti	70
	Liite 5. Megatron MBH-lineaaripotentimetrin datalehti	72
	Liite 6. Havainnollistava ja pelkistetty kytkentäkaavio laitteiston tilasta prosessikehityksen alussa	73

Liite 7. Käyttöohjeet	74
Liite 8. DC-servomoottorin ja jousi-massa-vaimentimen muodostama järjestelmä MATLAB Simulink-mallina	78

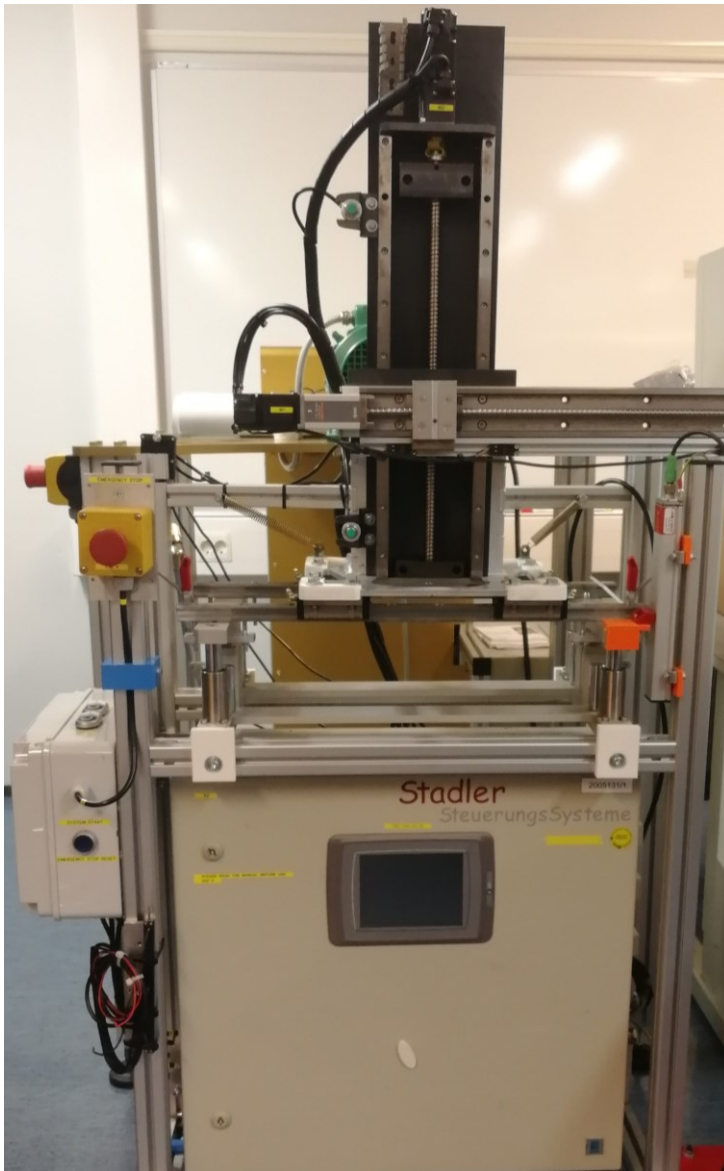
1 JOHDANTO

Opinnäytetyö toteutettiin prosessikehitysprojektina, jossa oli tarkoituksena kehittää ja monipuolistaa jo olemassa olevaa järjestelmää ja parantaa sen käyttömahdollisuuksia automaation ja säätötekniikan opetuksessa laboratorio-olosuhteissa. Opinnäytetyön tilaaja oli Tampereen ammattikorkeakoulun koneautomaation opintosuuntaus.

Kehitettävän järjestelmän voitiin katsoa koostuvan kahdesta osasta. Laitteistossa oli kaksi servomootoria, joiden akseleille oli kytketty kuularuuvit. Kuularuuvien avulla moottorien pyörimisliike muutettiin lineaariseksi liikkeeksi ja kuormaa voitiin ajaa kahden akselin suhteen pysty- ja vaakasuunnassa. Kuvailtu laitteisto oli liitetty osaksi jousi-massa-vaimennin-systeemiä ja tarkemmin ottaen sen massaksi. Jousi-massa-vaimennin koostui neljästä vaimentimesta, joiden päälle servomootoreiden ja akselien muodostama laitteisto oli asennettu. Lisäksi laitteisto oli kytketty jousien välityksellä järjestelmän jäykkään tukirakenteeseen yläpuolelta muodostaen jousi-massa-vaimentimen. Laitteistoon aiheutuva pystysuuntainen voima aiheuttaa pystysuunnan aseman siirtymää vaimenevana värähtelynä, mikä luokiteltiin pystysuunnan aseman häiriöksi. Käytännössä häiriön aiheuttava voima syntyy pystysuunnassa liikuteltavan kuorman kiihtyvyyden vaikutuksesta.

Laitteiston servomootoreita ohjattiin kumpaakin erillisellä servovahvistimella ja koko laitteistoa ohjauslogiikalla. Laitteiston operointia varten oli kosketusnäytöllinen HMI-paneeli.

Opinnäytetyön tavoitteina oli kehittää laitteiston liikkeenhallinnan mahdollisuuksia ja mahdollistaa operointi käyttöliittymällä. Lisäksi oli määrä mitata edellä mainittua häiriötä ja tutkia mahdollisuuksia sen kompensoimiseksi. Lopuksi laitteiston käyttöön laadittiin yksityiskohtaiset käyttöohjeet.



KUVA 1. Laitteisto kokonaisuudessaan

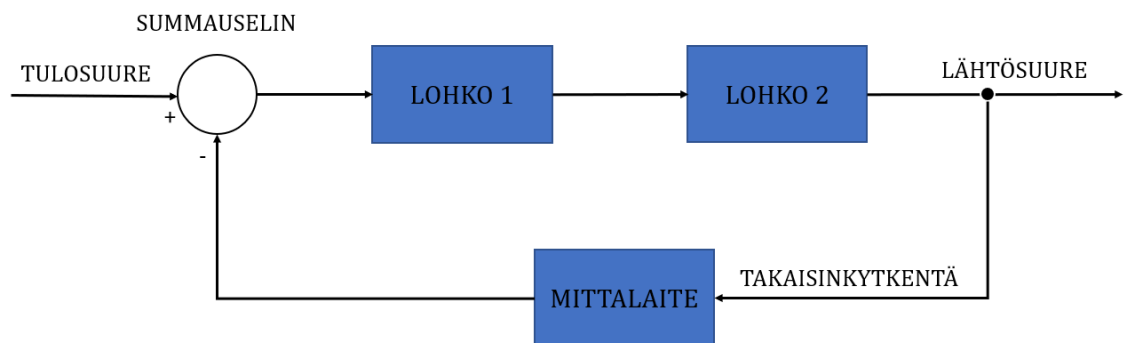
Raportissa käsitellään työn kannalta oleellisia säätö- ja servotekniikan teorioita ja käsitteitä sekä pohditaan lyhyesti anturin valintaa häiriön mittaukseen. Lisäksi raportissa käydään läpi prosessikehityksen eri vaiheet ja lähtökohdat, saavutetut tulokset ja lopuksi tulosten analysoinnista tehdyt johtopäätökset.

2 SÄÄTÖTEKNIikka

2.1 Johdatus säätötekniikkaan

Puhuttaessa säätöteoriasta tai säätötekniikasta teollisessa ympäristössä tarkoitetaan järjestelmän, prosessin tai laitteiston säätöä ja hallintaa kaikilla järkevillä menetelmillä (Virtanen, 11), nykyaikana tavallisesti elektronisella säätimellä mitausdataan perustuen pitäen järjestelmän lähtösuure halutussa arvossa tai ti-
lassa käyttäen ohjausjärjestelmää kuten ohjelmoitavaa logiikkaa.

Järjestelmän ja säätimen luomaa kokonaisuutta, säätöpiiriä, kuvataan tavallisesti lohkokaaavioesityksellä. Lohkokaavio voidaan esittää vapaamuotoisena ja havainnollistavana, niin kutsuttuna toimintalohkokaaaviona tai matemaattisiin sääntöihin perustuvana matemaattisena säätölohkokaaaviona. (Virtanen, 16–17)



KUVIO 1. Lohkokaavioesitys

Kuviosta 1 voidaan erotella säätöteoriaan liittyvät lohkokaaavion osat: lohko, signaaliviiva (tulo- ja lähtösuure), signaalilin suuntanuoli, summauselin ja haaroitus-piste.

Lohko kuvaa järjestelmän toimintaa tai toimilaitetta matemaattisella kaavalla esitettyinä. Lohkolla esitetään myös järjestelmässä oleva mittalaite. Lohkolla on yksi tulo ja yksi lähtö. Signaaliviivalla kuvataan lohkoon tai muuhun elimeen tulevaa viestiä ja nuolen suunnalla esitetään viestin suunta. Esimerkiksi lohkon tapauksessa puhutaan tulosuureesta ja lähtösuureesta. Summauselimellä suoritetaan elimeen tulevien tulosuureiden ennalta määritetty yhteen- tai vähennyslasku eli

summaus. Summauselimellä tulosuureita voi olla kaksi tai useampi ja lähtösuureita yksi. Summauselin voi olla esimerkiksi ohjearvon ja mittausarvon erosuureen määrittäminen tai häiriötekijän lisäys kaavioon. Haaroituspiste on piste, jossa signaaliviiva eli viesti haaroittuu, esimerkiksi mittauspiste. Tavallisesti mittauspisteestä piirretään takaisinkytkentähaara mittalaitteen kautta summauselimelle erosuureen määrittämiseksi. (Virtanen, 17–19)

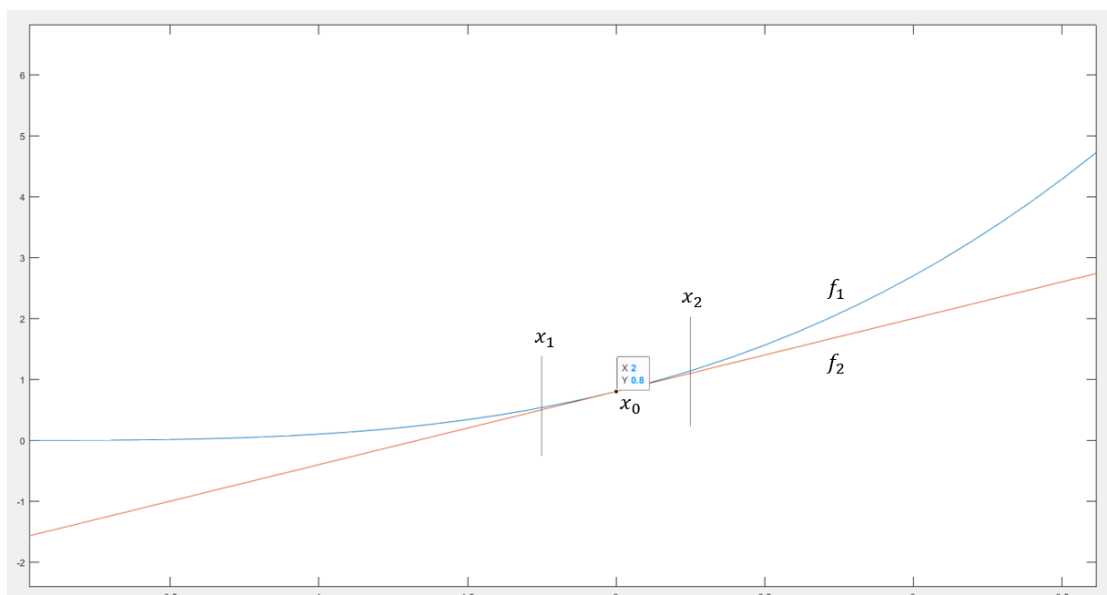
2.2 Dynaaminen järjestelmä

Säätötekniikkaan liittyen erilaiset järjestelmät ovat luonteeltaan dynaamisia staattisuuden sijaan. Staattisen järjestelmän lähtösuure riippuu sen tulosuureen arvosta ja voidaan yksinkertaistetusti ilmaista muodossa

$$y = f(x). \quad (1)$$

Dynaamisessa järjestelmässä lähtösuureen arvo riippuu lähtösuureen arvosta jollakin aikavälillä, mikä tarkoittaa, että järjestelmää kuvataan differentiaaliyhtälöllä. (Virtanen, 42, 45).

Differentiaaliyhtälöt ovat usein epälineaarisia ja hankalia ratkaista, mutta usein riittävän hyvään lopputulokseen päästään, kun differentiaaliyhtälö linearisoidaan tiettyyn haluttuun toimintapisteeseen ja yhtälö esitetään vakiokertoimisena differentiaaliyhtälönä. On kuitenkin huomattava, että järjestelmää kuvaava linearisoitu yhtälö kuvaa järjestelmän dynaamista käyttäytymistä riittävän tarkasti vain siinä pisteessä, mihin yhtälö on linearisoitu ja sen välittömässä läheisyydessä. (Fonselius & Rinkinen & Vilenius 1998, 13)



KUVIO 2. Yksinkertaistus linearisoinnista

Yllä olevassa linearisoinnin esimerkissä funktiolle f_1 toimintapisteeksi x_0 on määritetty 2. Funktio on derivoitu ja funktion pisteeseen x_0 on piirretty tangenttisuora f_2 , mikä kuvaa linearisoitua funktiota. Yksinkertaistettu funktio f_2 saa saman arvon kuin f_1 pisteessä x_0 ja riittävällä tarkkuudella toimintapisteen välittömässä ympäristössä. Toimintapisteen välitön ympäristö on havainnollistettu pystyviivoilla pisteissä x_1 ja x_2 .

Matemaattisena työkaluna lineaaristen differentiaaliyhtälöiden käsittelyyn ja ratkaisuun käytetään Laplace-muunnosta, jolla yhtälö muunnetaan aikatasosta taajuustasoon. Käytännössä tämä tarkoittaa aikamuuttujan t korvaamista imaginäärisellä muuttujalla $s + j\omega$ (Fonselius ym. 1998, 14).

Muunnettuja yhtälöitä käsitellään algebrallisesti (Fonselius ym. 1998, 14) ja taulukossa 1 on esitetty yleisiä Laplace-muunnokset.

TAULUKKO 1. Yleisiä Laplace-muunnoksia (Fonselius ym. 1998, 14–15)

1	$1/s$
$af(t)$	$aF(s)$
$f^n(t)$ (<i>n. derivaatta</i>)	$s^n F(s)$ (<i>yksinkertaistus</i>)
$\int f(t)dt$	$F(s)/s$

Laplace-muunnoksia voidaan yksinkertaistaa olettamalla alkuarvot nolliksi (Fonselius ym. 1998, 15), jolloin monimutkaisemmissa muunnoksissa päästään yksinkertaisempaan muotoon, kuten taulukossa 1 on esitetty.

Kun käsiteltävä differentiaaliyhtälö on Laplace-muunnettu, voidaan muodostaa järjestelmän dynaamista käyttäytymistä taajuustasossa kuvaava siirtofunktio. Siirtofunktio G määritellään prosessin lähtösuureen Y ja tulosuureen X suhteena (Fonselius ym. 1998, 15) eli

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}. \quad (2)$$

Eri laskentaohjelmistojen mahdollistamana järjestelmän dynaamista käyttäytymistä voidaan tutkia siirtofunktiota analysoimalla. Yleisiä analysointityökaluja ovat siirtofunktion aikavasteen, taajuusvasteen sekä stabiilisuuden tarkastelu.

Antamalla siirtofunktiolle aikavaste eli koefunktio saadaan selville järjestelmän dynaamisia ominaisuuksia. Koefunktioita on erilaisia, mistä tyypillisimpiä ovat yksikköaskel- ja yksikköimpulssifunktio. Yksikköaskelfunktiossa järjestelmälle annetaan yksikön suuruinen heräte eli tulosignaali tietyllä ajan hetkellä. Yksikköimpulssifunktiossa järjestelmälle annetaan tietyllä ajan hetkellä heräte, jonka arvo lähestyy ääretöntä, kesto lähestyy nollaa ja jonka pinta-ala on yksi. (Fonselius ym. 1998, 19–20)

Tavallisesti yksikköaskelvasteelle määritetään järjestelmän dynaamista suorituskykyä kuvaavia arvoja. Näitä ovat nousuaika, asettumisaika, ylitys ja virhe. Tavallisesti nousuaika määritellään ajaksi, mikä järjestelmällä menee lähtöarvon kasvattamiseen 10 prosentista 90 prosenttiin ohjearvosta. Järjestelmälle määritetään sallittu virhe, ja asettumisaika kertoo, kuinka nopeasti järjestelmä vakiinnuttaa arvonsa virherajan sisälle. Ylitys kertoo, kuinka paljon järjestelmä ylittää ohjearvon suurimmillaan ollessaan. (Fonselius ym. 1998, 28).

Järjestelmän siirtofunktion tarkastelulla taajuustasossa voidaan määrittää taajuusvaste ja se määritellään niin sanotussa jatkuvassa vaihtotilassa, jossa tulosignaali on sinimuotoinen (Fonselius ym. 1998, 23). Taajuusvaste kuvaa lähtö- ja

tulosignaalien amplitudien suhteen muutoksen sekä lähtö- ja tulosignaalin välisen vaihesiirtokulman muutoksen tulosignaalin kulmanopeuden eli taajuuden muuttuessa nolasta äärettömään (Fonselius ym. 1998, 24). Toisin sanoen taajuusvaste kertoo järjestelmän kyvyn seurata tulosignaalia eli ohjearvoa. Yleinen graafinen esitystapa taajuusvasteelle on Bode-diagrammi, jossa esitetään tulo- ja lähtösignaalien suhde eli vahvistus dB:nä logaritmisella asteikolla sekä signaalien vaihe-ero asteina (Fonselius ym. 1998, 24).

Tarkastellaan seuraavaa jousi-massa-vaimentimen siirtofunktiota

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k}, \quad (3)$$

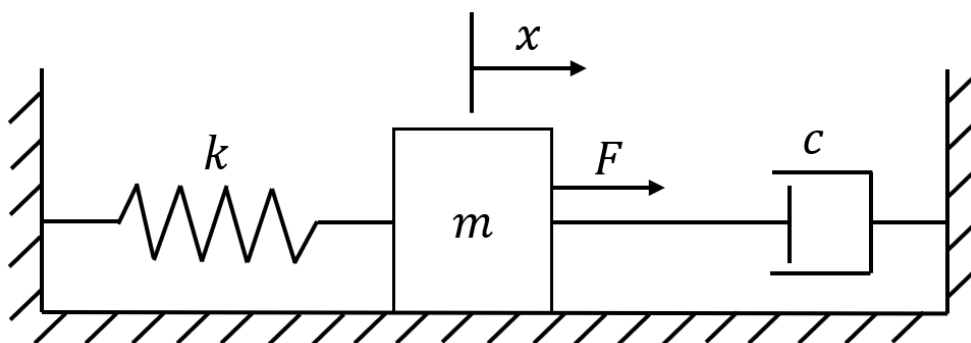
missä m on kappaleen massa, k jousen jousivakio ja c vaimennuskerroin. Siirtofunktion nimittäjäpolynomia kutsutaan siirtofunktion karakteriseksi yhtälöksi (Fonselius ym. 1998, 22), jonka ratkaisemalla saadaan selville karakterisen yhtälön juuret eli siirtofunktion navat. Karakterisen yhtälön kertaluku on yhtä kuin yhtälön juurien eli napojen määrä. Navat koostuvat sekä reaali- että imaginäärilukukomponentista ja asettamalla navat napa-nolla-diagrammiin voidaan tehdä päätelmiä järjestelmän dynaamisesta käyttäytymisestä ja stabiilisuudesta. Järjestelmän stabiilisuudella kuvataan järjestelmän kykyä vaimentaa lähtösignaalin värähtelyä sen reagoiessa ohjearvoon (Fonselius ym. 1998, 28). Voidaan siis tehdä jako stabiileihin ja epästabiileihin järjestelmiin, missä stabiilit järjestelmät vasteeseen reagoiessaan lopulta saavuttavat ohjearvonsa, ja epästabiilit järjestelmät erka-nevat siitä loputtomiin.

Päätelmä kumpaan kategoriaan järjestelmä kuuluu, voidaan tehdä napa-nolla-diagrammin perusteella. Diagrammissa vaaka-akselina on reaaliakseli (Re) ja pystyakselina imaginääriakseli (Im). Ensimmäisen kertaluvun siirtofunktiolla on kertalukunsa mukaisesti yksi juuri ja sen imaginäärikomponentti on nolla, minkä vuoksi napa on reaaliakselilla. Mikäli napa on negatiivinen, on järjestelmä stabiili, ja jos positiivinen, on järjestelmä epästabiili. Erikoistapauksena jos napa sijaitsee diagrammin origossa, on järjestelmä integroiva. (Fonselius ym. 1998, 22).

Toisen ja korkeamman kertaluvun siirtofunktioilla voi esiintyä kompleksisia juuria eli kompleksikonjugaatti pareja. Kompleksikonjugaattiparit sijaitsevat symmetrisesti reaaliakselin suhteen. Mitä lähempänä kompleksiosa on origoa, sitä pienempi värähtelyn amplitudi on. Vastaavasti reaaliakselista kauempana oleva kompleksiosa tarkoittaa suurempaa värähtelyn amplitudia. Kun kompleksiosan yhdistää reaaliosan kanssa, määrittää reaaliosa, kasvaako vai pienentyykö kompleksiosan määräämä värähtely. Edellä mainitussa erikoistapauksessa, missä napa sijaitsee origossa ja navalla on myös kompleksiosa, on järjestelmä marginaalisesti stabiili. Marginaalisesti stabiili järjestelmä värähtelee loputtomiin samalla taajuudella ja amplitudilla. (Fonselius ym. 1998, 22).

2.3 Jousi-massa-vaimennin-analyysi

Jos käsitellään kuvion 3 mukaista järjestelmää, huomataan kyseessä olevan jousi-massa-vaimennin, jossa kappaleella on massa m ja siihen kohdistuu voima F ajan hetkellä t . Kappale on kitkattoman pinnan päällä ja sen toinen pää on kiinnitetty jouseen, jolla on jousivakio k , ja toinen pää vaimentimeen, jolla on vaimennuskerroin c .



KUVIO 3. Jousi-massa-vaimennin

Kappaleen asemaa merkitään symbolilla x , nopeutta aseman ensimmäisellä derivaatalla x' ja kiihtyvyyttä aseman toisella derivaatalla x'' . Jousi-massa-vaimennin-järjestelmän differentiaaliyhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

$$mx''(t) = F(t) - kx(t) - cx'(t) \quad (4)$$

Taulukossa 1 käsitellyjen sääntöjen mukaisesti jousi-massa-vaimentimen differentiaaliyhtälö voidaan Laplace-muuntaa siirtofunktioksi seuraavalla tavalla:

$$F(t) = mx''(t) + cx'(t) + kx(t) \quad (5)$$

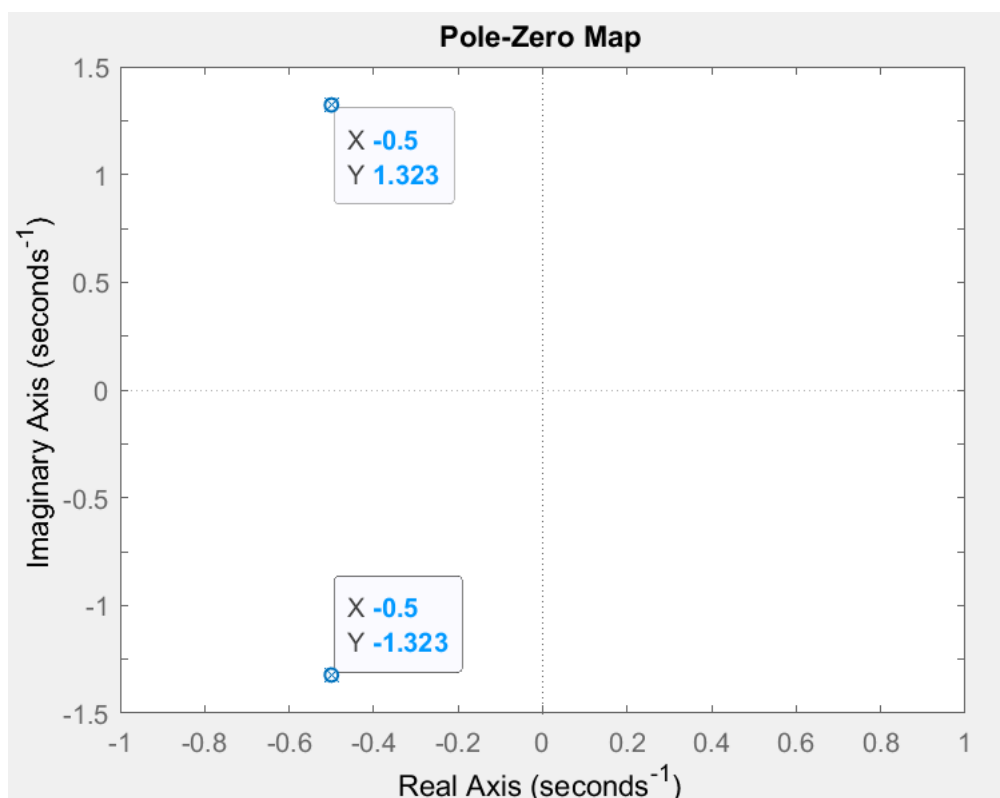
$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx(t) \quad (6)$$

$$F(s) = ms^2X(s) + csX(s) + kX(s) \quad (7)$$

$$F(s) = X(s) \cdot (ms^2 + cs + k) \quad (8)$$

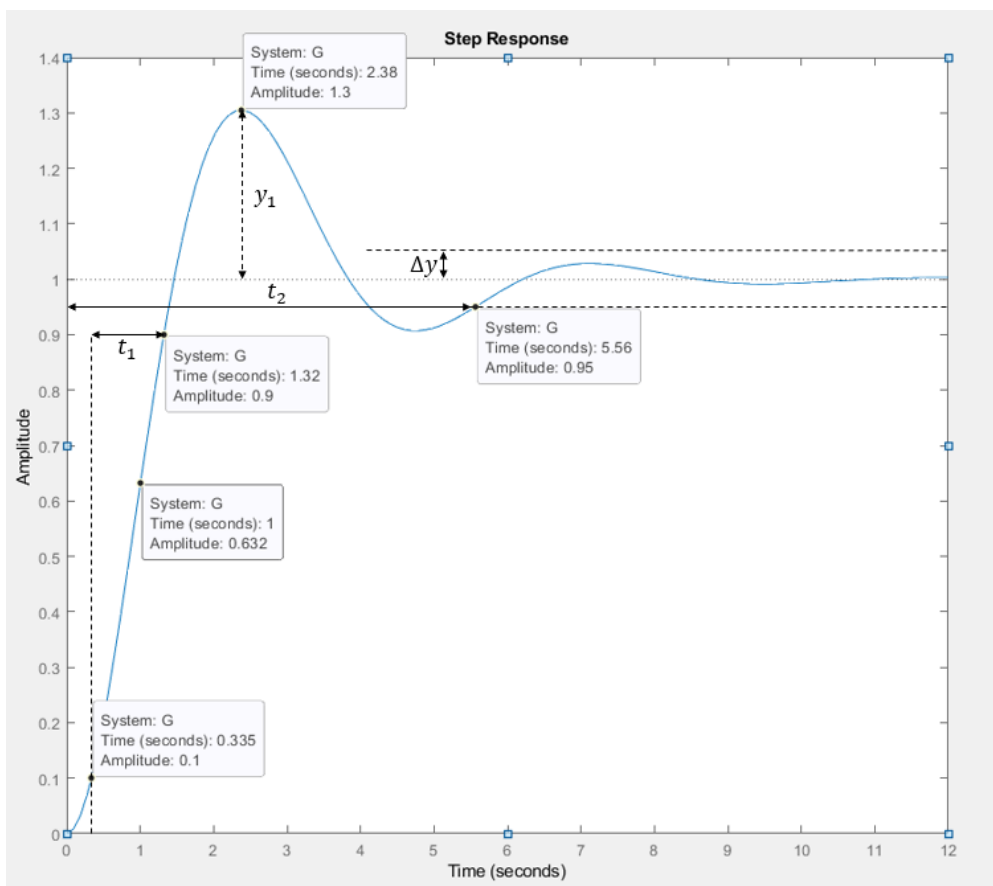
$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (9)$$

Nykyaikaiset laskentaohjelmistot, kuten MATLAB, tekevät siirtofunktioiden analysoinnista helppoa. Suorittamalla luvussa 2.2 esitellyjä analysointiin tarkoitettuja koefunktioita saadaan seuraavanlaisia graafisia esityksiä:

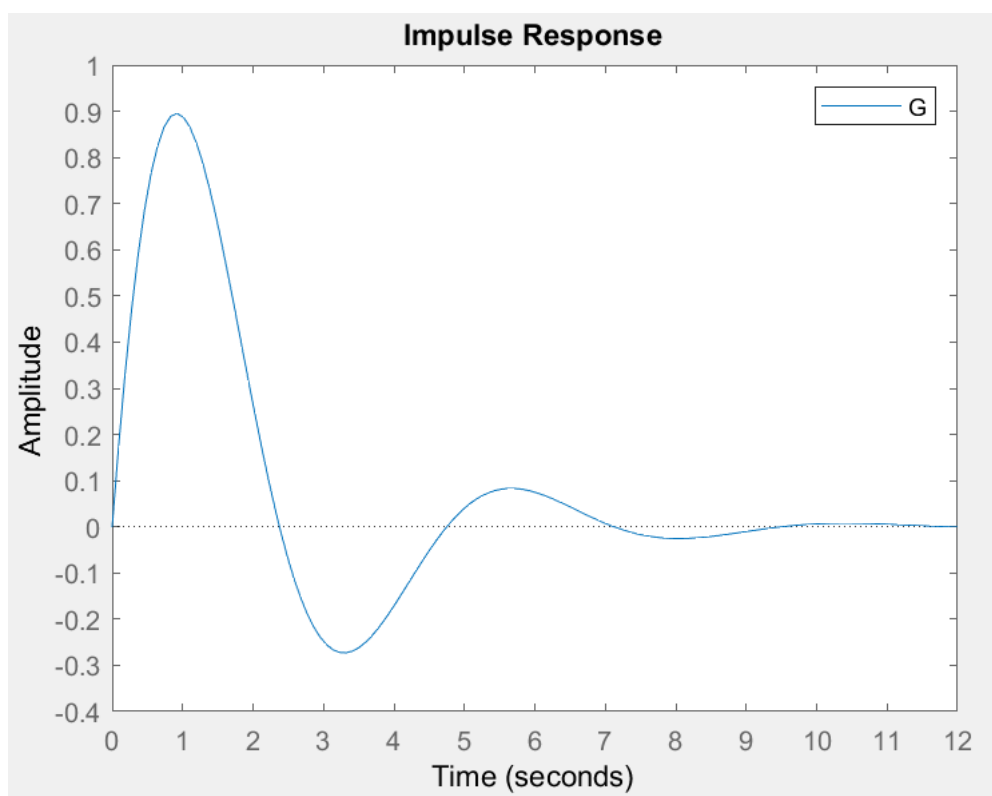


KUVIO 4. Napa-nolla-diagrammi

Napa-nolla-diagrammissa (eng. pole-zero map) esiintyy yksi kompleksikonjugaattipari ja se sijoittuu imaginääriakselin vasemmalle puolelle eli reaaliosa on negatiivinen. Tästä voidaan päätellä, että järjestelmä on stabiili ja konjugaattiparin myötä siinä esiintyy värähtelyä.



KUVIO 5. Yksikköaskelvaste

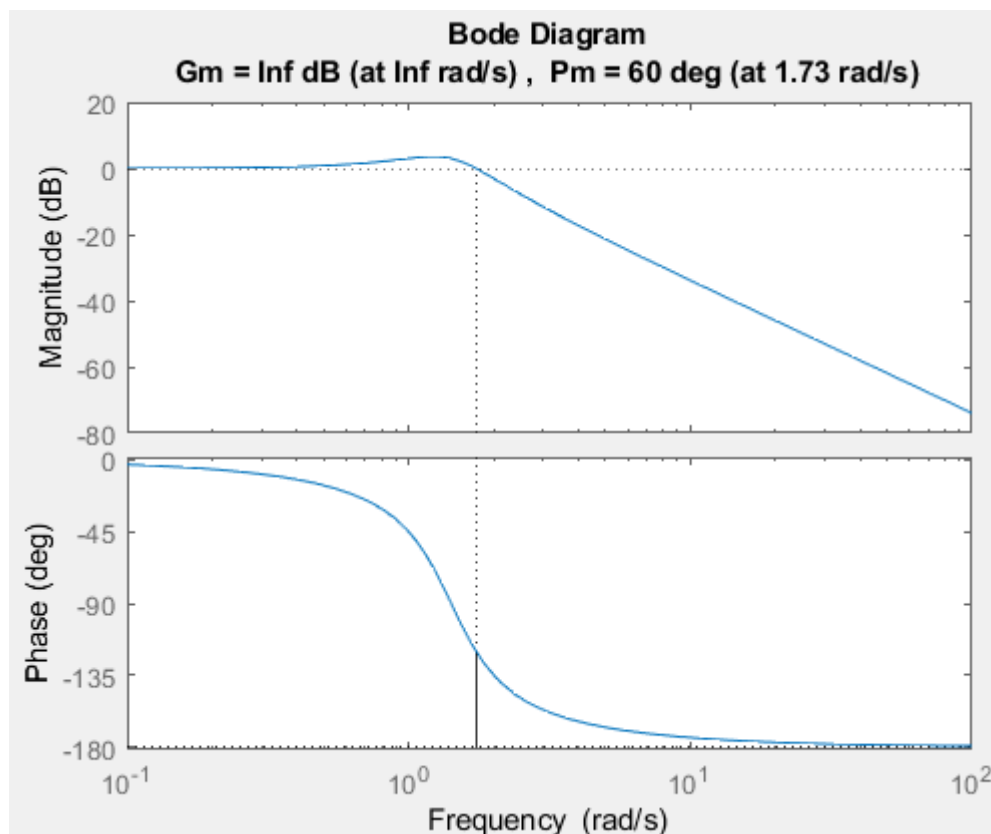


KUVIO 6. Impulssiaskelvaste

Yksikkö- ja impulssiaskelvasteiden tarkastelu vahvistaa napa-nolla-diagrammista tehdyn päätelmän: vasteessa esiintyy värähtelyä mutta se vaimenee lopulta saavuttaen tasapainotilan eli järjestelmä on stabiili. Yksikköaskelvasteen kuvaajaan on määritetty seuraavat edellä mainitut dynaamista suorituskykyä kuvaavat arvot:

TAULUKKO 2. Yksikköaskelvasteesta määritetyt arvot

Nousuaika t_1	0,985 s
Asettumisaika t_2	5,56 s
Virhe Δy	5 %
Ylitys y_1	30 %



KUVIO 7. Määritetty vaihevara

Avoimen järjestelmän Bode-diagrammista voidaan määrittää vaihevara sekä vahvistusvara, joista vaihevara saadaan kuvion 7 mukaisesti pisteessä, jossa tulo- ja lähtösignaalien amplitudien suhde on 1 eli vahvistus on 0 dB:ä. Vahvistusvara saadaan -180 astetta vastaavassa pisteessä.

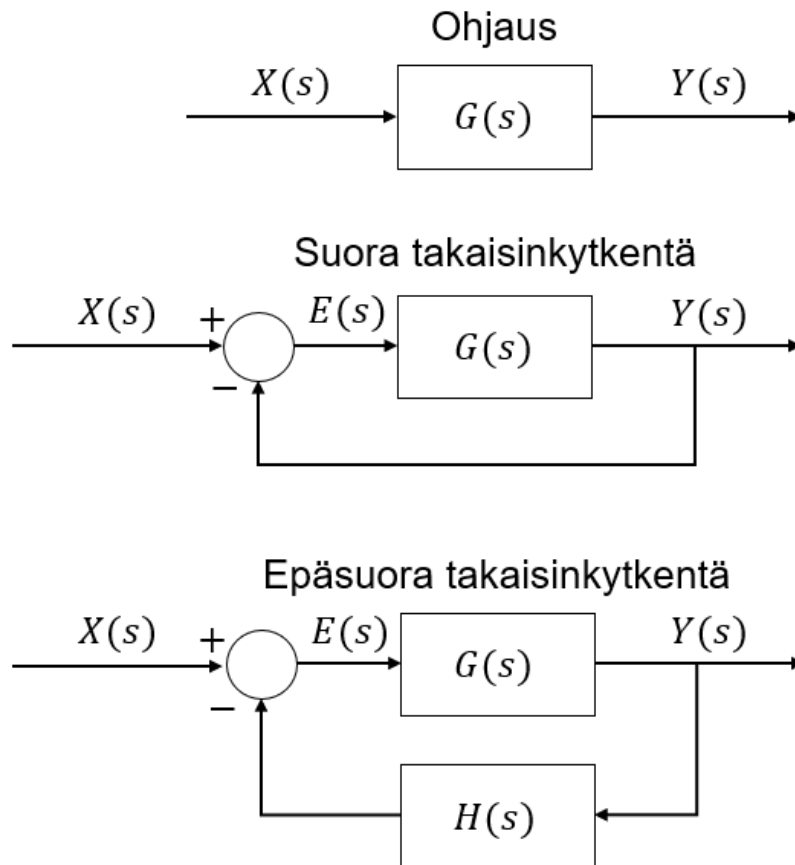
2.4 Säätopiirin rakenne

Säätötekniikasta puhuessa järjestelmän ohjauksella ja säädöllä on oleellinen ero. Säädetyssä järjestelmässä mitataan lähtösuuretta ja mittaustiedon perusteella säädetään järjestelmän lähtösuuretta tietyllä ohjaussuureella, kun taas ohjauksessa mittausta ja siten takaisin kytkentää ei ole (Fonselius ym. 1998, 27). Edellä mainituista voidaan puhua myös termeillä suljettu (eng. closed loop) ja avoin järjestelmä (eng. open loop), missä avointa järjestelmää edustaa ohjaus ja suljettua säätö.

Avoimen ja suljetun järjestelmän eroa voidaan yksinkertaisesti kuvata auton vakionopeudensäädin -esimerkillä. Jos auton kuljettaja painaa kaasupoljinta vakiovoimalla, voidaan olettaa auton nopeuden pysyvän vakiona ajo-olosuhteiden, kuten tien kaltevuuskulman, pysyen myös vakiona. Kun kuljettaja jatkaa kaasupoljimen painamista vakiovoimalla, ylämäkeen ajettaessa auton nopeus pienenee ja vastaavasti alamäkeen ajettaessa nopeus kasvaa. Ohjausarvo pysyy vakiona, mutta lähtösuure saattaa vaihdella olosuhteiden muuttuessa. Vakionopeudensäätimellä ja tasaisella tiellä ajettaessa säädin pitää kaasun niin ikään vakiona, mutta ylä- tai alamäessä säädin vähentää tai lisää kaasua pyrkien pitämään nopeus asetetussa ohjearvossa eli ohjausarvoa muutetaan, jotta lähtösuure pysyisi vakiona

Luultavasti kaikista yksinkertaisin säädintyyppi on niin sanottu "ON-OFF-säädin". ON-OFF-säätimessä on asetettu jokin asetusarvo, johon lähtösuureen arvoa verrataan. Säätimen tila vaihtuu sitä mukaan, ollaanko asetusarvon ylä- vai alapuolella. Tavallisesti ohjausarvo on maksimissaan ON-tilassa ja OFF-tilassa nolla. (Kiong & Putra, 116)

Edellä luvussa 2.3 analysoitu siirtofunktio esitti avointa järjestelmää eli ohjausta. Ohjauksen ja takaisinkytketyn järjestelmän lohkokaaviot on esitetty kuviossa 8.



KUVIO 8. Lohkokaavioesitys ohjaukselle sekä suoralle että epäsuoralle takaisinkytkennälle (Fonselius ym. 1998, 27)

Suoran takaisinkytkennän lohkokaaviosta määritetään, että

$$Y(s) = E(s) G(s) \quad (10)$$

ja

$$E(s) = X(s) - Y(s) \quad (11)$$

Epäsuoran takaisinkytkentähaaran mittalaitteen siirtofunktio on $H(s)$, ja jos mittauksen oletetaan olevan ideaali, saa $H(s)$ arvon 1 (Fonselius ym. 1998, 28). Takaisinkytketty siirtofunktio voidaan johtaa sijoittamalla yhtälö 11 yhtälöön 10:

$$Y(s) = G(s) [X(s) - Y(s)] \quad (12)$$

$$Y(s) = G(s) X(s) - G(s) Y(s) \quad (13)$$

$$Y(s) + G(s) Y(s) = G(s) X(s) \quad (14)$$

$$Y(s) \cdot [1 + G(s)] = G(s) X(s) \quad (15)$$

$$Y(s) = \frac{G(s) X(s)}{1 + G(s)} \quad (16)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = G_{CL}(s) \quad (17)$$

$$G_{CL}(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}. \quad (18)$$

Käyttäen johdettua jousi-massa-vaimentimen siirtofunktiota saadaan siirtofunktioksi:

$$G_{CL}(s) = \frac{1}{(ms^2 + cs + k + 1)}. \quad (19)$$

Lisäämällä siirtofunktiolle $G(s)$ vahvistuskerroin K_p saa takaisinkytketty siirtofunktio $G_{CL}(s)$ muodon

$$G_{CL}(s) = \frac{K_p}{(ms^2 + cs + k + K_p)}. \quad (20)$$

Siirtofunktion tulosignaalin vahvistus saadaan muodostamalla raja-arvolauseke, jossa imaginäärimuuttuja s lähestyy nollaa:

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{CL}(s) = \frac{K_p}{k + K_p}. \quad (21)$$

Vahvistuksen ollessa 1 saavutetaan ohjearvo. Vahvistuksen ollessa alle 1 funktio heikentää ohjesignaalia ja sen ollessa yli 1 tapahtuu tulosignaalin vahvistusta. Jos lähtösignaalille määritetään sallittu virhe, voidaan vaadittu vahvistuskerroin K_p laskea:

$$\frac{K_p}{k + K_p} \geq 1 - \Delta y. \quad (22)$$

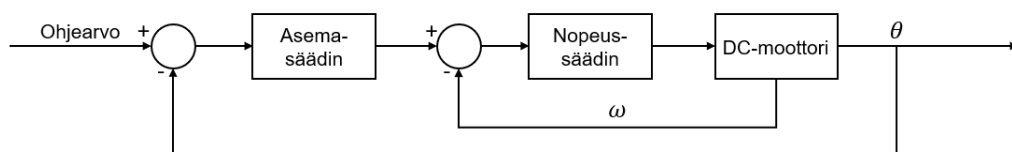
Sallitun virheen Δy ollessa 0,1 (10%) ja parametri k :n ollessa 1 saadaan vahvistuskertoimeksi K_p sijoittamalla:

$$K_p \geq 9$$

Nyt saadun siirtofunktion yksikköaskelvasteesta voisi selvittää, miten järjestelmä käyttäytyy takaisinkytkettynä.

Kuten todettiin, takaisinkytketyssä järjestelmässä mitataan järjestelmän jotakin lähtösuuretta. Moottorin tapauksessa suure voi olla esimerkiksi nopeus, asema (kiertokulma) tai momentti. Mitatun suureen arvoa verrataan ohjearvoon ja näiden erotuksesta kuvion 8 mukaisesti muodostetaan ohjaussignaali.

Järjestelmän dynaamisen suorituskyvyn parantamiseksi voidaan järjestelmästä mitata useampaa suuretta ja muodostaa sisäkkäisiä säätösilmukoita. Tätä kutsutaan kaskadisäädöksi. Esimerkkinä (kuvio 9) kaskadisäädöstä on moottorin asemasäädin, missä ulommassa säätösilmukassa mitataan asemaa (kiertokulmaa) ja sisemmässä säätösilmukassa kulmanopeutta.



KUVIO 9. Kaskadi-säätö (Kiong & Putra 2011, 128)

Järjestelmissä on usein ulkoisia tekijöitä, jotka aiheuttavat häiriöitä järjestelmän dynaamiseen käyttäytymiseen. Mikäli häiriön käyttäytyminen ja synty tunnetaan, voidaan niitä kompensoida heti syntyessään. Esimerkiksi jos järjestelmän mekaniikassa esiintyvä kitka tunnetaan nopeuden funktiona, voidaan nopeustiedon perusteella minimoida kitkan vaikutuksia, jotta nopeussäätimen kannalta järjestelmä olisi lähes kitkaton. Kompensaatio-säätimen käyttö edellyttää häiriöiden tuntemista tai niiden luotettavaa mittausta. (Kiong & Putra 2011, 109, 126)

Kuten luvussa 2.2 todettiin, dynaamiset järjestelmät ovat epälineaarisia ja niiden tarkka matemaattinen mallintaminen vaikeaa. Usein järjestelmiä yksinkertaistetaan matemaattisesti siten, että järjestelmää kuvaava matemaattinen malli kuvaa järjestelmää tarkasti vain tarkastelupisteessä ja sen välittömässä ympäristössä. Näin ollen myös luotu säätöpiiri toimii halutulla tavalla vain tarkastelupisteessä ja sen välittömässä ympäristössä. Säädintä ja siten järjestelmän suorituskykyä voidaan parantaa jakamalla toiminta-alue kahteen tai useampaan osaan. Jaottelukriteerinä voidaan käyttää erosuureta eli ohjearvon ja lähtösuureen erotusta ja määritellä, että pienillä erosuureen arvoilla on käytössä eri säätöparametrit kuin taas suurilla erosuureen arvolla (Kiong & Putra 2011, 126).

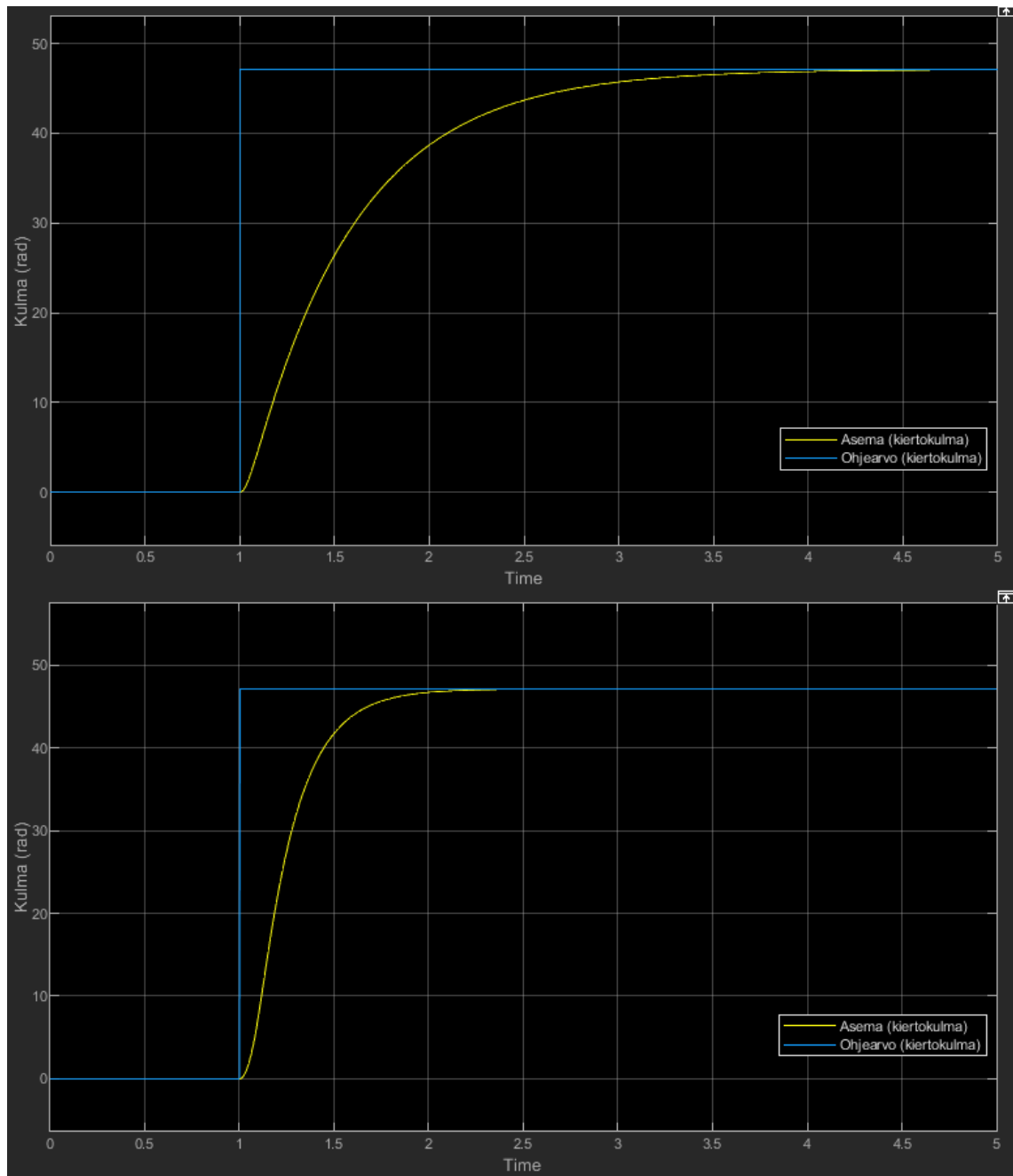
2.5 PID-säädin

Teollisuudessa säätötekniikasta puhuttaessa nousee usein esille PID-säädin, joka on vakiinnuttanut asemansa teollisissa prosesseissa ja järjestelmissä sen relatiivisen yksinkertaisuuden, helppokäyttöisyyden, luotettavuuden ja suorituskyvyn myötä. (Kiong & Putra 2011, 113–114)

PID-säädin koostuu kolmesta osasta, joihin sen nimitys perustuu: P eli proportional, I eli integral ja D eli derivative. PID-säädintä käytettäessä on käytännössä aina käytössä proportionaalikerroin ja haluttaessa joko I- tai D-osa, tai molemmat. Kukin osa tai termi vaikuttaa järjestelmän dynaamiseen käyttäytymiseen eri tavoin. Ohessa esitetyt kuvat 10–15 kuvaavat MATLAB:lla mallinnettua erästä DC-servomoottoria ja sen asemaa. Kuvioissa havainnollistetaan eri säätöparametrien vaikutusta vasteeseen.

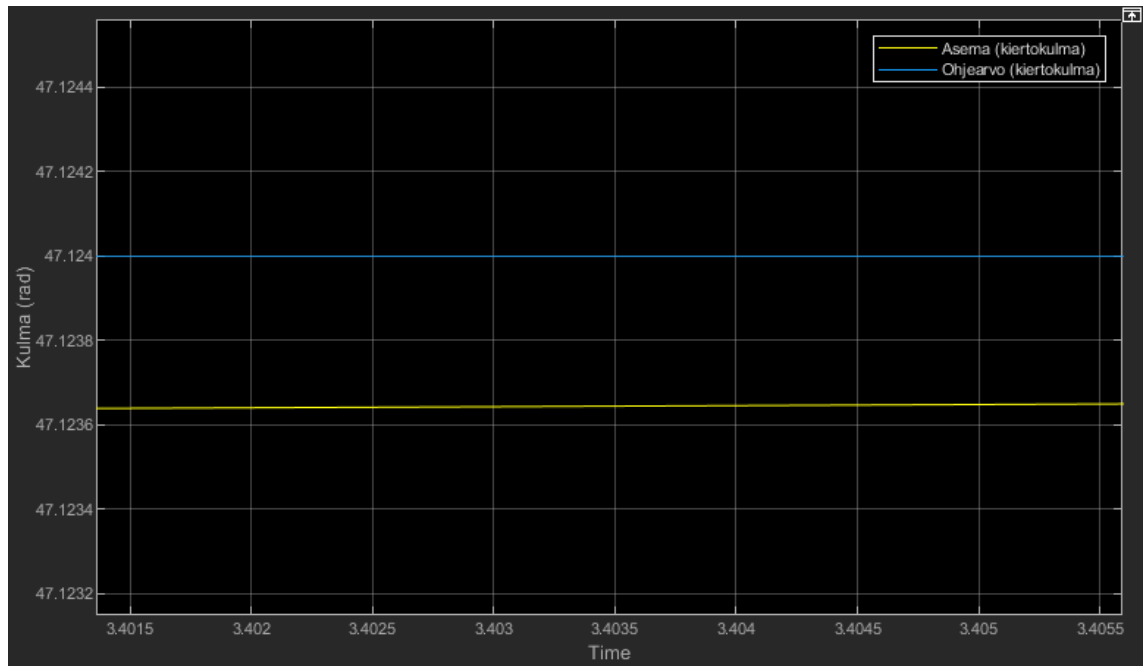
Kun mitataan erosuureta eli lähtöarvon ja ohjearvon erotusta, saadaan säätimelle annettava ohjausarvo tai ohjaussignaali. P-säädössä vahvistetaan tätä ohjaussignaalia vahvistuskertoimella K_p tarkoituksena parantaa järjestelmän vastetta. Tyypillisesti pelkällä P-säädöllä järjestelmän saavuttaessa ns. jatkuvuustilan (eng. steady state) ei saavuteta haluttua ohjearvoa vaan ohjearvon ja lähtöarvon välille jää virhettä. Kasvattamalla vahvistuskertoimen arvoa saadaan järjes-

telmästä nopeampi ja virheestä pienempi stabiilisuuden kustannuksella, ja sopivan vahvistuskertoimen määrittäminen on näiden kahden välillä tasapainottelua. (Kiong & Putra 2011, 117–118)



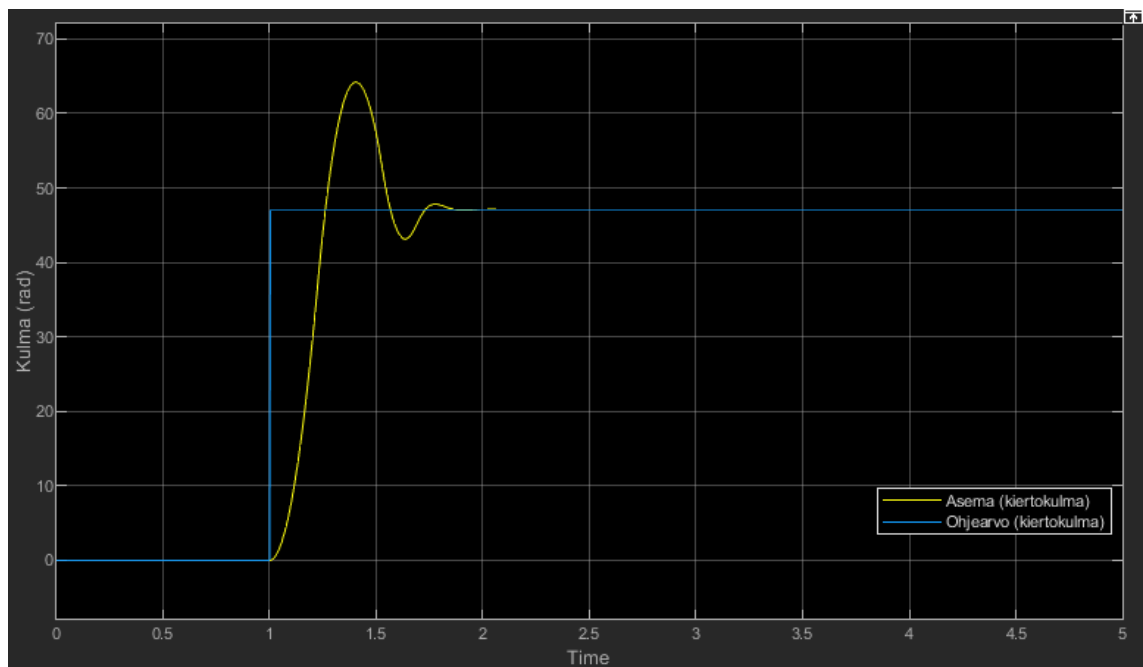
KUVIO 10. P-säädön vaikutus askelmaiseen vasteeseen

Yllä olevassa kuviossa on asemasäädössä käytössä P-säätö. Kuvion ylemmässä kuvaajassa vahvistuskerroin K_p on 1 ja alemmassa 2,5. Näin kasvattamalla vahvistuskerrointa pystyttiin nopeuttamaan järjestelmää. Kuvioissa esiintyy myös hyvin pientä jatkuvuustilan virhettä, jota esitetystä kuvioista ei näe. Tätä havainnollistetaan kuviossa 11.



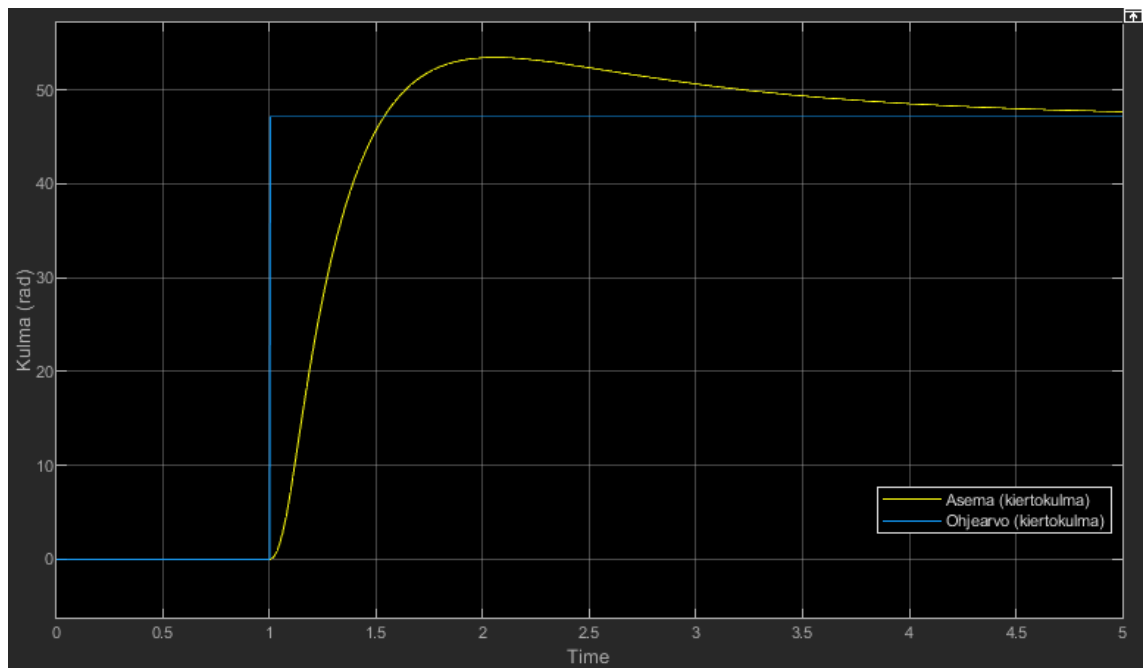
KUVIO 11. Jatkuvuustilan virhe P-säädöllä vahvistuskertoimen K_p arvolla 2,5

Vahvistuskerrointa yhä kasvattamalla saadaan järjestelmän nousuaikaa vieläkin lyhennettyä, mutta haittavaikutuksena syntyy järjestelmään kuvion 12 mukaisesti ylitystä ja värähtelyä.



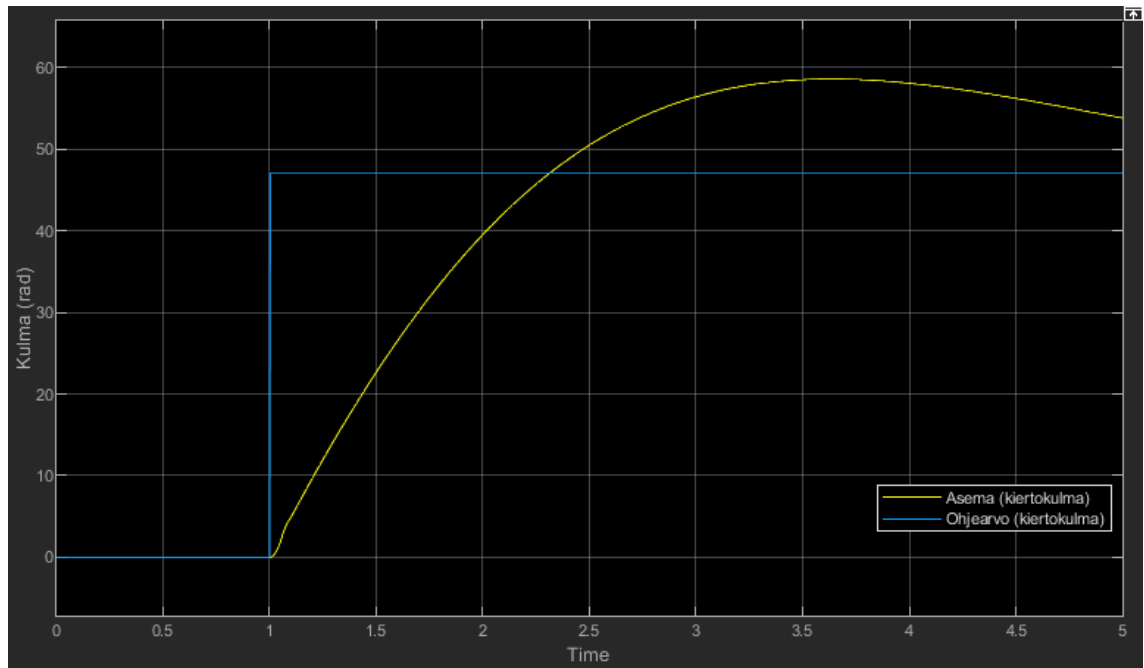
KUVIO 12. Vahvistuskertoimen liiallisesta kasvattamisesta johtuva ylitys ja värähtely

Edellä mainittiin, että pelkällä P-säädöllä on tyypillistä, ettei lähtösuure saavuta ohjearvoa, vaan järjestelmän tasoittuessa jatkuvuustilaan jää virhettä ohjearvon ja lähtösuureen välille. Integraali-osalle määritetään termi integrointi-aika T_i ja pienentämällä integrointi-aikaa kasvaa I-osan lähtösuure ja vastaavasti kasvattamalla lähtösuure pienenee. I-osan lähtösuureta kasvattamalla voidaan kurota virhettä umpeen ja ratkaista pelkällä P-säädöllä syntyvä ongelma. Loputtomiin tätä ei kuitenkaan voida kasvattaa, sillä I-osan liika kasvatus voi johtaa lähtösuureen ”yliampumiseen” ja värähtelyyn siten kasvattaen asettumisaikaa, tai saattaa järjestelmän jopa epästabiiliksi. (Kiong & Putra, 118–119)



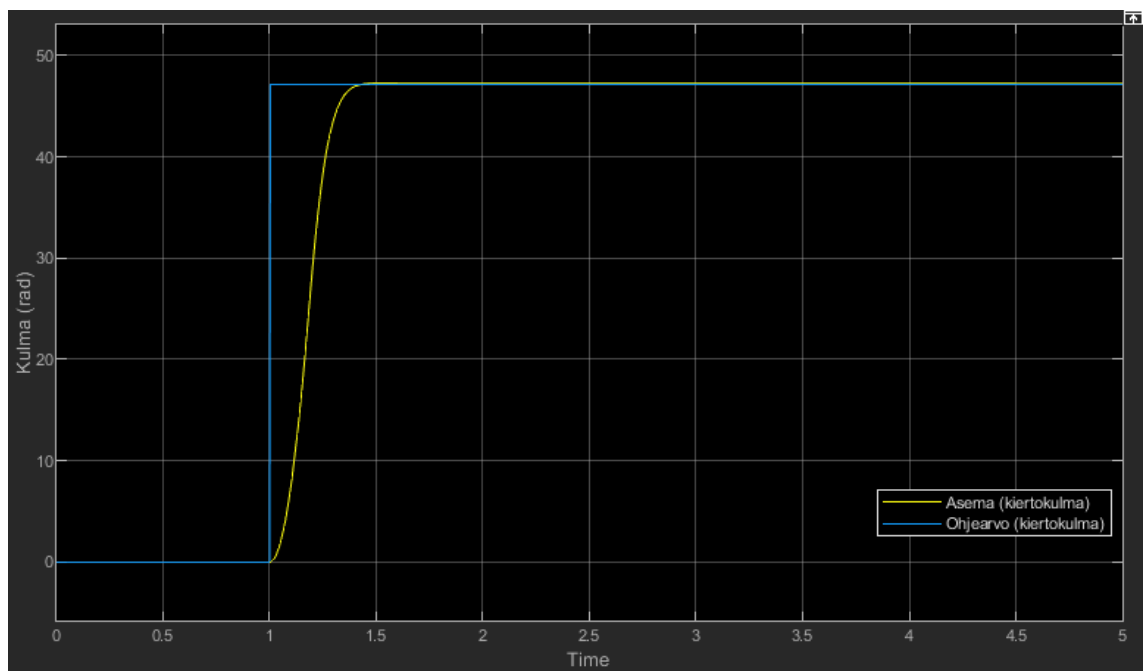
KUVIO 13. I-termin lisäys pienentää nousuaikaa, mutta saattaa aiheuttaa ylitystä

P- ja I-osat reagoivat erosuureeseen sitä mukaan, kun se muuttuu mutta eivät kykene reagoimaan erosuureen tuleviin muutoksiin, mikä on D-osan tehtävä, ja I-osan tapaan D-osalle määritetään termi derivointiaika T_d . Erosuureen tai prosessisuureen muutosnopeuden eli derivaatan perusteella D-osa ennakoii erosuureen tulevaa arvoa: erosuureen muuttuessa nopeasti D-osa pienentää lähtöarvoaan ohjearvon ylityksen estämiseksi ja vastaavasti hitaassa muutoksessa D-osa kasvattaa lähtöarvoaan, jotta ohjearvo saavutettaisiin nopeammin. (Kiong & Putra 2011, 119–120)



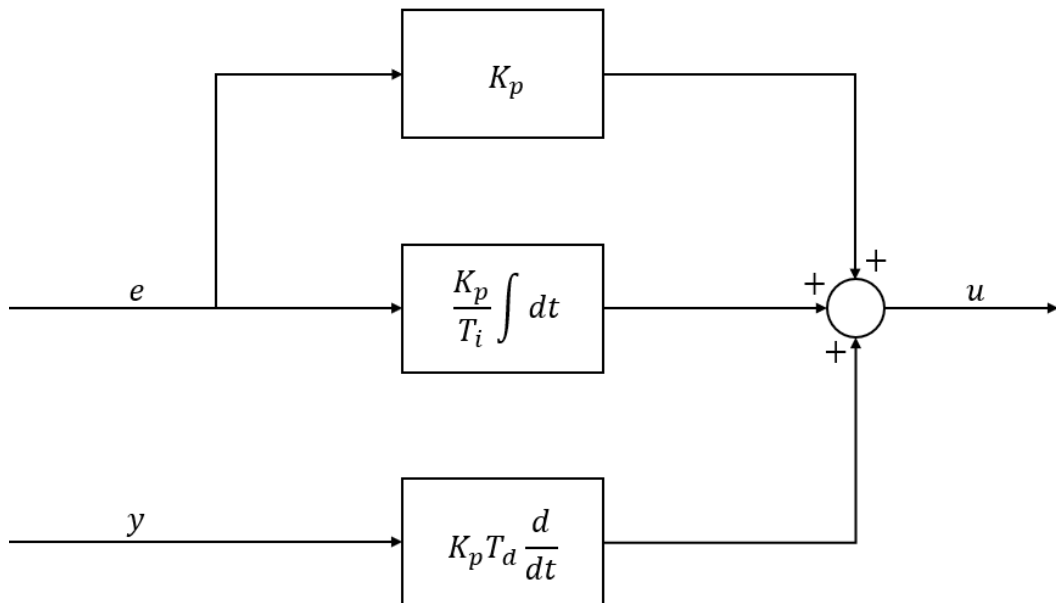
KUVIO 14. D-termin lisäys pehmentää vastetta isoon ohjearvon muutokseen

Lisäämällä säätimeen PID-säätimen termejä ei automaattisesti tarkoita, että säätimen ja siten järjestelmän suorituskyky paranisi. Uuden termin vaikutus tulee aina sovittaa yhteen muiden termien kanssa ja esimerkiksi hyväksi todettu PI-säätö ei välttämättä enää PID-säätönä suoriudu tehtävästään yhtä hyvin samoilla P- ja I-osan termeillä huolimatta D-osan termistä, vaan PID-säädin tulee virittää uudelleen.



KUVIO 15. Eräs PID-säätimen viritys

Kuviossa 15 on esitetty mainitun asemasäädetyt DC-servomoottorin vaste ohjearvon muutokseen viritetyllä PID-säätimellä. Myös PID-säädin voidaan esittää lohkokaavioesityksenä.



KUVIO 16. PID-säätimen lohkokaavioesitys, jossa D-osan derivointi suoritetaan lähtösuureesta erosuureen sijaan (Kiong & Putra 2011, 121)

Esitetystä PID-säätimen lohkokaaviosta käy ilmi kunkin osan matemaattinen ilmaisu, jossa e on erosuure, y lähtösuure ja u ohjearvo. Kaaviossa P-, I- ja D-osassa käytetään samaa vahvistuskerrointa K_p , mutta todellisuudessa on mahdollista käyttää erillisiä vahvistuskertoimia.

PID-säätimen termien vaikutus järjestelmän nopeuteen sekä stabiilisuuteen voidaan summata oheisen taulukon 3 mukaisesti.

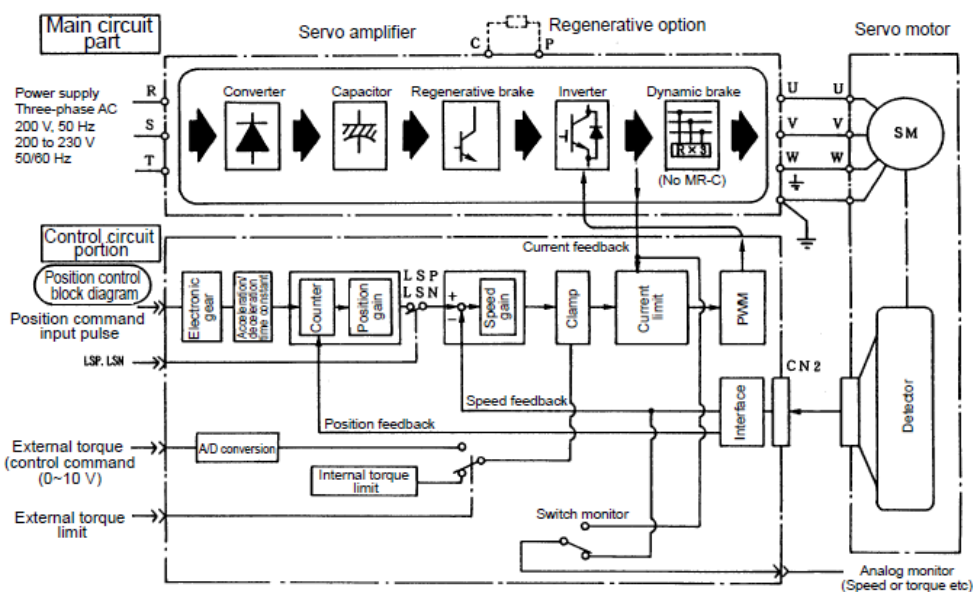
TAULUKKO 3. PID-säätimen eri termien vaikutus järjestelmään (Kiong & Putra 2011, 122)

Kasvatettu termi	Nopeus	Stabiilisuus
Vahvistuskerroin	Kasvaa	Heikkenee
Integrointiaika	Hidastuu	Kasvaa
Derivointiaika	Kasvaa	Kasvaa

2.6 Servotekniikka

Servojärjestelmä voi olla hydraulinen, pneumaattinen tai sähköinen, ja tässä oppinnäytetyössä servotekniikan käsittely on rajattu sähköisiin servojärjestelmiin, missä kaikki komponentit ovat sähköisiä ja toimilaitte tyypillisesti AC- tai DC-servomoottori (Fonselius ym. 1998, 123).

Servojärjestelmän tarkoitus lyhyesti sanottuna on tuottaa lähtösuuretta, joka seuraa haluttua asetusarvoa (Kiong & Putra 2011, 1), käytännössä esimerkiksi servomoottorin kiertokulman ja kulmanopeuden haluttuja arvoja. Servojärjestelmä koostuu eri osakokonaisuuksista, pääasiassa toimilaitteesta, vahvistimesta, ohjauslaitteesta sekä mittalaitteesta, mitkä yhdessä muodostavat servojärjestelmän (Kiong & Putra 2011, 5–6).



KUVIO 17. Lohkokaavioesitys Mitsubishi Electricin eräästä AC-servojärjestelmästä pulssijono-ohjauksella (Mitsubishi Electric 2015, 16)

Järjestelmä tuottaa jotakin lähtösuuretta, jota halutaan ohjata tietyllä ohjausarvolla. Jotta kyseessä ei olisi vain avoin ohjaus, ja että päästäisiin mahdollisimman tarkkaan lopputulokseen, mitataan lähtösuuretta takaisinkytkennällä mittalaitteen avulla. Servomoottorissa tavallisia mitattavia suureita ovat asema ja nopeus, joista asemaa voidaan mitata esimerkiksi pulssianturilla ja vastaavasti nopeutta takogeneraattorilla (Fonselius ym. 1998, 8). Myös kiihtyvyyttä ja vääntömomenttia voidaan mitata (Kiong & Putra 2011, 81–82).

Haluttu asetusarvo tuotetaan tavallisimmin ohjauslogiikalla servovahvistimelle, joka edelleen tuottaa ohjaussignaalin servomoottorille. Asetusarvoa verrataan takaisinkytkennän avulla saatuun mittaustietoon ja arvojen erotus muodostaa ohjausarvon. Erotuksen ollessa nolla on haluttu asetusarvo saavutettu eikä ohjaussignaalia synny. (Fonselius ym. 1998, 8)

Vahvistimen tarkoitus on muuntaa ohjauslaitteelta saatava ohjausarvo toimilaitteelle sopivaksi ohjaussignaaliksi (Kiong & Putra 2011, 5–6). Vahvistimen ohjausjännitteenä on tavallisesti käytetty ± 10 V:n DC jännitettä (Fonselius ym. 1998, 131). Tarkasteltaessa uudemman tekniikan ja työssä käytössä ollutta Mitsubishi Electricin servovahvistinta huomataan, että analogista jänniteohjetta käytetään nopeussäädössä (eng. speed control mode) ja vääntömomenttisäädössä (eng. torque control mode), mutta asemasäädössä (eng. position control mode) käytetään pulssijono-ohjausta (Mitsubishi Electric 2018, 123).

Servovahvistimilla on useita erilaisia asetettavia parametrejä, joilla saadaan optimoituja toimilaitteen suorituskykyä ko. sovellukseen. Taulukossa 4 on havainnollistamiseksi esitetty osa erään Mitsubishi Electricin servovahvistimen parametreistä.

No.	Symbol	Name	Initial value	Unit	Operation mode				Control mode		
					Standard	Full.	Lin.	D.D.	P	S	T
PA01	*STY	Operation mode	1000h		○	○	○	○	○	○	○
PA02	*REG	Regenerative option	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA03	*ABS	Absolute position detection system	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA04	*AOP1	Function selection A-1	2000h		○	○	○	○	○	○	○
PA05	*FBP	Number of command input pulses per revolution	10000		○	○	○	○	○	○	○
PA06	CMX	Electronic gear numerator (command pulse multiplication numerator)	1		○	○	○	○	○	○	○
PA07	CDV	Electronic gear denominator (command pulse multiplication denominator)	1		○	○	○	○	○	○	○
PA08	ATU	Auto tuning mode	0001h		○	○	○	○	○	○	○
PA09	RSP	Auto tuning response	16		○	○	○	○	○	○	○
PA10	INP	In-position range	100	[pulse]	○	○	○	○	○	○	○
PA11	TLP	Forward rotation torque limit/positive direction thrust limit	100.0	[%]	○	○	○	○	○	○	○
PA12	TLN	Reverse rotation torque limit/negative direction thrust limit	100.0	[%]	○	○	○	○	○	○	○
PA13	*PLSS	Command pulse input form	0100h		○	○	○	○	○	○	○
PA14	*POL	Rotation direction selection/travel direction selection	0		○	○	○	○	○	○	○
PA15	*ENR	Encoder output pulses	4000	[pulse/rev]	○	○	○	○	○	○	○
PA16	*ENR2	Encoder output pulses 2	1		○	○	○	○	○	○	○
PA17	*MSR	Servo motor series setting	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA18	*MTY	Servo motor type setting	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA19	*BLK	Parameter writing inhibit	00AAh		○	○	○	○	○	○	○
PA20	*TDS	Tough drive setting	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA21	*AOP3	Function selection A-3	0001h		○	○	○	○	○	○	○
PA22		For manufacturer setting	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA23	DRAT	Drive recorder arbitrary alarm trigger setting	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA24	AOP4	Function selection A-4	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA25	OTHOV	One-touch tuning - Overshoot permissible level	0	[%]	○	○	○	○	○	○	○
PA26	*AOP5	Function selection A-5	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA27		For manufacturer setting	0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA28			0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA29			0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA30			0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA31			0000h		○	○	○	○	○	○	○
PA32			0000h		○	○	○	○	○	○	○

TAULUKKO 4. Osa erään servovahvistimen parametreistä (Mitsubishi Electric 2014a, 189)

2.7 Dynaaminen etäisyyden mittaus

Teollisessa ympäristössä järjestelmän tai prosessin ”tuntoaisteja” kutsutaan antureiksi. Anturi koostuu tuntoelimestä ja anturiosasta, missä tuntoelin havaitsee mitattavan suureen ja anturiosa muuntaa tämän sähköiseksi viestiksi (Fonselius & Laitinen & Pekkola & Sampo & Välimaa 1994, 6).

Karkeasti anturit voidaan jaotella 2-tilaisiin ON-OFF-antureihin, pulssi- tai koodiantureihin sekä suureen arvoa mittaaviin analogia-antureihin (Fonselius ym. 1994, 6).

Analogia-antureista virtaviestianturit ovat tavallisesti hieman kalliimpia kuin vastaavat jänniteviestianturit. Jänniteviesti on alttiimpi ulkoisille häiriöille ja pidemmissä johtimissa tapahtuu jännitehäviötä, mikä vääristää viestiä. Virtaviesti sietää paremmin ulkoisia häiriöitä, sillä virran arvon muuttumiseksi tarvitaan paljon ulkopuolista energiaa eikä johtimen pituus ei vaikuta virran arvoon. (Geosense n. d.)

Standardin omainen analogiaviesti on tyypillisesti jännite- tai virtaviesti. Jänniteviesti on tavallisesti välillä 0 – 10 V, ± 5 V tai ± 10 V, ja vastaavasti virtaviesti välillä 0 – 20 mA tai 4 – 20 mA. Virtaviesteistä yleisempi ja parempi on 4 – 20 mA, sillä ollessa anturin mitta-alueen alarajalla lähettää anturi silti virtaviestiä ja näin saadaan tietoa mitattavan suureen tilasta koko mitta-alueella. Virran arvon tippuessa nollaan voidaan havaita anturin vikatila tai hajoaminen. Anturista, joka lähettää virtaviestiä välillä 0 – 20 mA, vastaavaa tulkintaa ei mitta-alueen alarajalla voida tehdä.

Yleisesti anturi aistiessaan ei yllä mainittuja jännitteitä tai virtoja tuota, vaan jännite- tai virtaviestit tuotetaan vahvistimella tai lähettimellä. Tavallisesti nämä ovat integroitu suoraan anturiin ja koneautomaation kentällä se laajalti sisällytetään anturin käsitteeseen. (Fonselius ym. 1994, 6–7)

Jotta digitaalinen ohjauslaite pystyy prosessoimaan analogiaviestiä, tulee se muuntaa analogiaviestistä digitaaliviestiksi. Vastaavasti mikäli ohjauslaitteen tulee pystyä lähettämään analogiaviestiä esimerkiksi ohjausarvon muodossa, voidaan muutos tehdä myös toisinpäin. Tavallisesti puhutaan A/D- tai D/A-muunnoksista ja -muuntimista, missä kirjain A tarkoittaa analogiaviestiä ja D digitaaliviestiä.

A/D-muuntimen tärkeä ominaisuus on sen resoluutio, mikä ilmoitetaan bittien lukumäärällä. Bittien määrä kertoo, millä tarkkuudella A/D-muunnin kykenee erottamaan erisuuruiset analogiaviestit toisistaan tai toisin sanoen, kuinka moneen yhtä suureen osaan viesti jaetaan sitä käsiteltäessä. Periaate on binäärijärjestelmä ja esimerkiksi 8-bittinen A/D-muunnin pystyy erottamaan analogiaviestin 256 (2^8) yhtä suureen osaan.

Valitessa prosessiin tai järjestelmään anturia, on useita eri asioita, joita tulee ottaa huomioon ja näiden pohjalta voidaan määrittää anturille vaatimuslista. Oleellisin on määrittää, mitä suuretta mitataan, koska se määrittää myös anturityypin.

Tietty anturi on suunniteltu toimimaan luotettavasti vain tietyllä mittausvälillä (Fonselius ym. 1994, 10), minkä vuoksi pitää määrittää prosessissa tai järjestelmässä mitattavan suureen mittausalue. Jos esimerkiksi hypoteettisen ideaalisen etäisyysanturin mittausalueeksi ilmoitetaan etäisyys tuntoelimestä 100 – 200 mm ja kyseinen anturi lähettäisi analogiavirtaviestiä väliltä 4 – 20 mA, vastaisi 4 mA 100 mm:n etäisyyttä mitattavaan kohteeseen, 12 mA 150 mm:n etäisyyttä ja vastaavasti 20 mA 200 mm:n etäisyyttä. Mitta-alueen ulkopuolelta eli alle 100 mm:n tai yli 200 mm:n etäisyyksiä ja niitä vastaavia virran arvoja ei voida pitää luotettavina.

Anturin oman mittausalueen suuruus vaihtelee anturityypistä ja mitattavasta suureesta riippuen. Valintaa tehdessä onkin tärkeää anturin sovittaminen mittausjärjestelmään, missä tulee huomioida anturin fyysinen koko ja asennettavuus. Dynaamista etäisyyttä mitattaessa asennustapaan kannattaa kiinnittää huomiota. Asennettaessa anturi staattiseen elementtiin saa mitattava kohde liikkua vapaasti eikä esimerkiksi anturikaapeli aiheuta ongelmia.

Myös anturilla on ominaisuus erottelukyky tai resoluutio, joka kertoo mitattavassa suureessa pienimmän muutoksen, minkä anturi pystyy havaitsemaan. Voidaan puhua myös erottelukynnyksestä, mikä kuvaa mittausalueen muutosta, joka ei aiheuta muutosta lähtösuureeseen (Fonselius ym. 1994, 12). Kyseessä on yksi oleellisimmista analogia-anturin suorituskykyyn vaikuttavista tekijöistä. Järjestelmään anturia valittaessa tuleekin määrittää mitattavalle suurelle vaadittu erottelukyky, johon anturin tulee kyetä.

Seuraavaksi voidaan määrittää anturille dynaaminen suorituskykyvaatimus eli kuinka nopea anturin tulee olla tai kuinka nopeasti sen pitää pystyä reagoimaan mitattavan suureen muutoksiin. Suorituskyvyn mittaamiseen askelluontoisissa muutoksissa voidaan käyttää luvussa 2.2 esiteltyä askelvastetta, ja jatkuvasti ja nopeasti sinimuotoisissa suureen muutoksissa taajuusvastetta (Fonselius ym.

1994, 13–14). Anturien datalehdillä käytetään usein termejä kuten vasteaika tai päivitystaajuus kuvaamaan anturin nopeutta. Mitattaessa nopeasti vaihtelevaa suuretta tulee anturin päivitystaajuus olla moninkertainen mitattavan suureen vaihtelutaajuuteen nähden, jottei mittausdata vääristy.

Muita anturin suoristuskykyä kuvaavia ominaisuuksia ovat mm. anturin lineaarisuus sekä toistettavuus. Nämä käytännössä kertovat, käyttäytyykö anturin ulosulosignaali lineaarisesti suhteessa mitattavaan suureeseen ja toistettavuus nimityksen mukaan, kuinka tarkasti sama mittaustulos on toistettavissa. Lisäksi huomion arvoista on anturin mekaaninen ja sähköinen suojaus, lämpötilan ja värinän kesto, soveltuvuus käyttöympäristöön, anturin elinikä sekä hinta. Yleisesti ottaen anturin hinta kasvaa loogisesti suorituskyvyn kasvaessa. Yksinkertaiseen ja vähäistä tarkkuutta vaativaan prosessiin ei tarvita kaikkein kalleinta anturia ja vastaavasti toisin päin. (Fonselius ym. 1994, 10–16)

3 PROSESSIKEHITYKSEN LÄHTÖKOHDAT

3.1 Järjestelmän tila alussa

Opinnäytetyö oli prosessikehitysprojekti, jossa lähtötilanteessa oli olemassa prosessi ja laitteisto. Toimilaitteina järjestelmässä oli kaksi AC-servomoottoria, joiden akseleille oli kytketty kuularuuvit. Kuorma oli asennettu kuvan 1 mukaisesti vaaka-akselille ja vaaka-akselikokonaisuus pystyakselille mahdollistaen kuorman ajon pysty- ja vaakasuunnassa servomoottoreiden ja kuularuuviavulla. Moottoreiden, akselien ja kuorman muodostava kokonaisuus oli koottu jalustalle ja tämä jalusta oli asennettu neljän vaimentimen päälle. Lisäksi jalusta oli kiinnitetty ylemmää tukirakenteisiin jousilla muodostaen jousi-massa-vaimentimen. Kuvailun mekaanisen rakennelman alla oli kytkentäkaappi, jossa sijaitsi mm. loogikka ja sen lisämoduulit sekä servovahvistimet, ja kytkentäkaapin sivussa päävirralle oma keskuksensa. HMI-paneeli oli asennettu kytkentäkaapin oveen. Lisäksi kummankin akselin päihin oli asennettu raja-antureiksi induktiiviset lähestymiskytkimet rajaamaan kuorman liikealue, ja vaaka-akselille erilliseksi kotiasema-anturiksi niin ikään induktiivinen lähestymiskytkin. Pystyakselille vastaavaa ei ollut asennettu.

Oleellisimmat komponentit laitteistossa olivat sen ohjauslogiikka, HMI-paneeli, servomoottorit sekä servomoottoreiden vahvistimet. Ohjauslogiikka oli Mitsubishi Electric MELSEC FX3U-32M ja HMI-paneeli Beijer Electronic E1071. Servomoottoreina olivat vaaka-akselilla Mitsubishi Electric AC-servomoottori HG-MR13 ja pystyakselilla HG-MR13B. Erona toisiinsa nähden pystyakselilla olevassa moottorissa oli sähkömagneettinen jarru, mikä esti kuorman putoamisen. Servovahvistimina molemmilla moottoreilla oli Mitsubishi Electric MR-J4-10A-RJ.

Projektin alussa laitteiston voitiin katsoa olevan suurilta osin valmis, sillä laitteiston mekaaninen rakenne oli pieniä puutteita lukuun ottamatta valmis, ja virransyötön, ohjauslogiikan, servomoottoreiden sekä -vahvistimien kytkennät oli tehty mahdollistaen järjestelmän operoinnin. Mekaanisen rakenteen kannalta suurimmat puutteet olivat pystyakselin kotiasema-anturin ja jousi-massa-vaimentimen värähtelyn mittaamiseen soveltuva anturin puuttuminen kiinnikkeineen.

Järjestelmästä oli olemassa dokumentaatiota pääasiassa valokuvien muodossa, mitkä keskittyivät laitteiston mekaniikan rakentamiseen ja kokoonpanoon. Lisäksi ohjauslogiikalle ja käyttöliittymälle oli tehty alustavat ohjelmoinnit ja servovahvistimille parametroidut. Kirjallista dokumentaatiota tai kytkentäkaaviota järjestelmästä ei ollut saatavilla.

3.2 Toimenpiteet

Prosessikehitys alkoi määrittämällä laitteiston dynaaminen luonne jousi-massa-vaimentimeksi ja edelleen jousi-massa-vaimentimen värähtely järjestelmän kuorman kiihtyvyydestä aiheutuvaksi pystysuuntaiseksi aseman häiriöksi. On siis kyse häiriön kompensoinnista tai kompensatiosäädöstä, jossa mitataan häiriötä ja pyritään kompensoimaan sitä. Tämän toteuttamiseen järjestelmässä tarvittiin dynaamiseen etäisyyden mittaamiseen soveltuva anturi. Anturin vaatimusmäärittely sekä valintaa käsitellään luvussa 3.3.

Anturin mittausdataa oli määrä hyödyntää ohjauslogiikalla ja yhdessä servovahvistimelle asetettujen parametrien ja ohjauslogiikalla toteutetun säätimen avulla pyritään pitämään järjestelmän värähtely minimissä ja siten kuorman absoluuttinen asema tavoiteasemassa.

Ohjelmoitavassa logiikassa FX3U-32M ei ole analogiatuloja, joten analogisen etäisyysanturin mittausdataa voitiin hyödyntää lisäämällä järjestelmään erillinen analogiatulosignaali-moduuli, joka tuli asentaa laitteiston kytkentäkaappiin. Selvityksessä tuli ilmi, että Mitsubishi Electric MELSEC FX3U-32M -logiikalle oli potentiaalisena vaihtoehtona 2 eri moduulia, FX3U-4AD sekä FX3U-4AD-ADP ja näistä valittiin FX3U-4AD-ADP.

TAULUKKO 5. Analogiatulomoduurien tärkeimpien ominaisuuksien koonti (liite 1)

	FX3U-4AD		FX3U-4AD-ADP	
Analogiatulo	± 10 V DC	± 20 tai 4 – 20 mA	0 – 10 V DC	4 – 20 mA
Resoluutio	0,32 mV	1,25 μ A	2,5 mV	10 μ A
Digitaalilähtö	Signed 16-bit	Signed 15-bit	12-bit	11-bit
Muunnosaika	500 μ s		200 μ s	

Analogiatulomoduurin valintaan vaikutti suuresti moduurien fyysinen leveys, sillä kytkentäkaapissa ylimääräistä tilaa oli todella vähän ja siksi fyysisesti kapeamman moduurin valinta vaati vähemmän muutostöitä. Lisäksi FX3U-4AD-ADP -moduurin resoluution katsottiin olevan tarpeeksi hyvä demolaitteiston tarpeisiin. Se oli myös kilpailukykyinen muunnosajaltaan, mutta todellisuudessa tämän ajan määrää PLC:n ohjelmakiertoaika (liite 1).

Lisäksi järjestelmään tarvittiin yksi raja-anturi, minkä avulla voitiin määrittää kotiasema laitteiston pystyakselin suhteen. Anturiksi valittiin induktiivinen lähestymiskytkin, joka oli heti saatavilla. Lopuksi tuli suunnitella ja toteuttaa kiinnikkeet lisätävälle häiriön mittaukseen tarkoitetulle analogia-anturille ja kotiaseman määrittävälle raja-anturille sekä asentaa ne.

3.3 Etäisyysanturin valinta

3.3.1 Vaatimusmäärittely

Luvussa 2.6 käsiteltiin anturin valinnan kannalta oleellisia anturin suorituskykyä kuvaavia ominaisuuksia. Näihin peilaten valittavalle anturille määriteltiin seuraavanlainen vaatimusmäärittely, jossa korostui anturin sovitettavuus mittausjärjestelmään, mitta-alue, resoluutio sekä päivitystaajuus (nopeus).

Järjestelmässä mitataan värähtelyä aseman poikkeamana. Mitta-alueen järjestelmässä määrittää laitteen mekaaninen rakenne ja tarkemmin vaimentimien ääriasiuntojen sallima liikealue, jonka mitattiin olevan noin 70 mm. Tasapainoaseman eli nollatason korkeuden määrittää jousien synnyttävä jousivoima. Mikäli jousia ei ole ollenkaan, lepää moottoreiden ja kuorman muodostava osakokonaisuus

vaimentimien päällä eikä värähtelyä eli häiriötäkään synny. Vastaavasti vaihtamalla järjestelmään jäykemmät jouset tai lisäämällä kannattelevia jousia, siirtyy tasapainoasema eli nollassa kohti liikealueen ylärajaa. Jousi-massa-vaimentimessa kyseessä on vaimeneva värähtely, jonka yhden aallon amplitudin voidaan olettaa olevan positiivisessa ääriasennossa enintään yhtä suuri kuin negatiivisessa ääriasennossa, jos uutta värähtelyä kasvattavaa voimaa ei järjestelmään kohdistu. Voidaankin päätellä, että todellinen mitta-alue on arviolta noin 2 kertaa nollassa ja rajoittavan ääriarajan välinen etäisyys. Koska käytössä olleilla jousilla nollassa sijoittui lähemmäksi alarajaa, oli todellinen mitta-alue pienempi kuin 70 mm, mutta anturin valinnassa käytettiin mitta-alueen teoreettista suuruutta. Valittavan anturin mitta-alue tulee soveltua järjestelmän määriteltyyn mitta-alueeseen huomioiden myös anturin mekaanisen asennuksen vaikutus kokonaisuuteen.

Seuraavaksi määritettiin vaadittava nopeus tai päivitystaajuus anturille, minkä määrittää jousi-massa-vaimentimen dynaamiset ominaisuudet, massa, jousivaikio ja vaimennuskerroin. Mittaamalla järjestelmän värähtelyn jaksonaikaa kuorman testiajossa voitiin tehdä arvio värähtelytaajuuden maksimiarvosta ja mittauksen tulokset ovat taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Järjestelmän värähtelytaajuuden arviointi mittauksien keskiarvon perusteella

$10 T$ (s)	$1 T$ (s)	f (Hz)
4,2	0,42	2,4
4,3	0,43	2,3
4,4	0,44	2,3
4,4	0,44	2,3
4,3	0,43	2,3
KA 4,3	KA 0,43	KA 2,3

Nopeuden jälkeen määritettiin anturille vaadittu tarkkuus tai resoluutio. Sillä kyseessä on demolaitteisto, voitiin tarkkuus määrittää mielivaltaisesti kohtuuden rajoissa. Vaadituksi tarkkuudeksi päätettiin 0,5 mm.

Lisäksi valittava anturi tulee olla asennettavissa laitteistoon kohtuullisella rakenteen muokkaamisella.

3.3.2 Anturityyppien vertailu

Etäisyyden mittaukseen on useita eri anturityyppivaihtoehtoja. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin lyhyesti laseretäisyysantureita, ultraääniantureita, tarkkuuspotentiometrejä ja magnetostriktiivisiä antureita etäisyyden mittaukseen.

Laseretäisyysanturin mittaustekniikka perustuu yksinkertaistetusti laservalon lähettämiseen kohteeseen ja sen takaisin vastaanottamiseen. Eri tekniikat eroavat kuitenkin toisistaan: voidaan esimerkiksi mitata laservalon kulku-aikaa ja vaihesiirtoa tai valonsäteessä tapahtuvaa sirontaa, kun säde heijastuu takaisin kohteesta. (Fonselius ym. 1994, 89)

Vertailussa osoittautui, että suorituskyvyltään erilaisia laseretäisyysantureita on laajalti, mutta anturityypillä voidaan päästä erinomaiseen tarkkuuteen sekä nopeuteen. Vertailussa mukana olleen anturin resoluutioksi ilmoitetaan 5 μm ja nopeudeksi 30 μs (liite 2). Laseretäisyysanturi ei kulu, joten niillä on myös pitkä käyttöikä. Laseretäisyysanturit olivat yleisesti ottaen vertailuryhmän kalleimpia.

Ultraäänianturin toimintaperiaate perustuu ultraäänen kohteeseen kulkuajan ja takaisin heijastumisajan mittaamiseen. (Fonselius ym. 1994, 88). Ultraäänianturit voivat olla kaksi tilaisia lähestymiskytkimiä tai analogia-antureita, jolloin niitä voidaan käyttää etäisyyden mittaamiseen. Ultraäänianturit tunnistavat ääntä heijastavat materiaalit ja niitä käytetään usein turvajärjestelmissä kohteiden tunnistamiseen sekä pinnan korkeuden mittaukseen säiliössä (Sinclair 2001, 140–141).

Ultraäänianturit jäivät vertailussa viimeiseksi sekä nopeudessa että resoluutiossa, eikä niiden siksi katsottu olevan soveltuvia nopeasti muuttuvan etäisyyden mittaamiseen.

Lineaaripotentiometrin toimintaperiaate perustuu ulostulojännitteen muutokseen luistin liikkumisen myötä (Sinclair 2001, 30). Rakenteellisesti erilaisia tarkkuuspotentiometrejä löytyy useita. Niitä on saatavilla laajalle mitta-alueelle ja tarkkuuspotentiometrit tarjoavat yleisesti ottaen tarkan resoluution ja nopean vasteen. Hinnaltaan ne ovat myös kilpailukykyisiä.

Tarkkuuspotentiometrien heikkoutena on niiden rakenteen mekaaninen kuluminen ja hajoaminen normaalissakin käytössä. Lineaaritarkkuuspotentiometrissä liikkuva osa on luistin, joka tulisi kiinnittää mitattavaan kohteeseen. Tämä voi aiheuttaa luistiin ja sitä myötä potentiometrin rakenteeseen haitallisen suuntaisia ja suuruusvoimia, ja näin aiheuttaa vauriota anturille. (Fonselius ym. 1994, 124) Lisäksi valmistajat ilmoittavat jollakin tavalla mekaanisen rakenteen käyttöiän.

Magnetostriktiivisen anturin toiminta perustuu yksinkertaistetusti ulkoisen magneetin magneettikentän aikaansaamasta vaikutuksesta tuntoelimeen. Magneettikentän ja tuntoelimeen syötetyn virtapulssin vaikutuksesta tuntoelimeen syntyy hetkellinen magneettikenttä. Magneettikenttien yhteisvaikutuksesta saadaan magneetin sijaintitieto. Tarkkuuspotentiometreihin verrattuna magnetostriktiiviset anturit ovat tarkempia ja nopeampia mutta myös hintavampia. Toimintaperiaate ei vaadi magneetin fyysistä kosketusta anturin pintaan, mikä tekee antureista lähes kulumattomia ja pitkäikäisiä. (Liite 3)

3.3.3 Yhteenveto

Lyhyesti tiivistettynä tutkitusta joukosta laseretäisyysanturit olivat suorituskyvyllään erinomaisia mutta samalla myös kalliita, mikä lopulta johti hylkäämiseen. Ultraäänianturit jäivät suorituskyvyssä muille antureille erityisesti nopeudessa, ja niin ikään hylättiin. Lineaariantureista tarkkuuspotentiometrit ja magnetostriktiiviset anturit todettiin potentiaalisiksi vaihtoehdoiksi teoreettisesti lähes äärettömän resoluution, suorituskykyisen nopeuden ja kohtuullisen hinnan ansiosta. Taulukoon 7 on koottu tutkittujen antureiden oleellimmat ominaisuudet. Vertailuun valittiin anturit, joiden mitta-alue oli sovitettavissa järjestelmään.

TAULUKKO 7. Vertailussa olleiden antureiden ominaisuuksia (liite 2 & liite 3 & liite 4 & liite 5)

	ZX2	UM12	MBH	EP2
Ulostulo	4 – 20 mA	4 – 20 mA	Voltage	4 – 20 mA
Tyyppi	Laser	Ultraääni	Potentiometri	Magnetostriktiivinen
Resoluutio	5 μm	$\geq 69 \mu\text{m}$	Lähes rajaton	Rajaton
Nopeus	60 μs	24 ms	N/A	0,3 – 2 ms

Anturiksi lopulta valittiin magnetostriktiivinen lineaarianturi. Valintaan vaikutti oleellisesti hyvän tarkkuuden ja nopeuden ohella asennettavuus, jossa liikkuvaan tasoon kiinnitetty magneetti sai olla irrallaan itse anturista ja näin voitiin välttyä mekaanisen rakenteen kulumiselta.

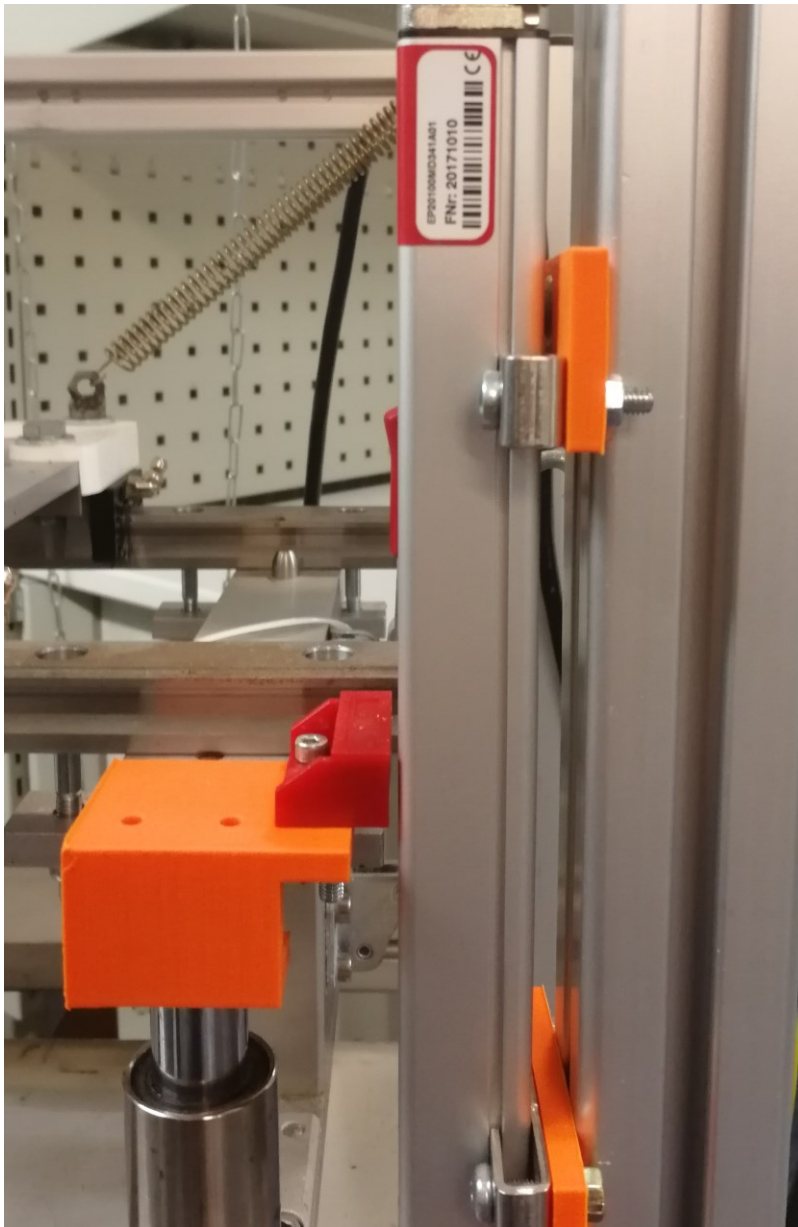
4 PROSESSIKEHITYKSEN VAIHEET

4.1 Alustus

Prosessikehitys lähti liikkeelle järjestelmän nykytilanteen ja laajennustarpeiden kartoituksesta, jota käsiteltiin edellisessä luvussa. Lopulta valittiin anturi häiriön mittaukseen sekä tätä varten analogiatulomoduuli. Samanaikaisesti tutustuttiin käytössä oleviin laitteisiin ja ohjelmistoihin. Käytetyt ohjelmistot olivat GX Works2 (PLC), E-Designer (HMI) ja MR Configurator2 (servovahvistin). Laitteiden ja ohjelmistojen käytön opettelu jatkui koko opinnäytetyöprosessin ajan valmistajien manuaaleja tutkimalla sekä käyttäen yrittäjä- ja erehdys -metodia.

Ennen varsinaista ohjelmointia tuli koko järjestelmästä luoda kytkentäkaavio, jotta valittu lineaarianturi sekä analogiatulomoduuli voitaisiin asentaa. Luotua kytkentäkaaviota havainnollistaa liitteenä 6 esitetty pelkistetty kytkentäkaavio, jossa on esitetty logiikan, servovahvistimien, servomootoreiden sekä tehonsyötön kytkennät.

Analogiatulomoduuli asennettiin PLC:n vasemmalle puolelle erillisen adapterin välityksellä, missä haasteena oli fyysisen tilan niukkuus. Anturi asennettiin kuvan 2 mukaisesti alumiiniprofiiliin suunnittelemalla ja 3D-tulostamalla sopivat kiinnikkeet sekä anturille että sen magneetille. Lisäksi asennettiin puuttuva kotiasema-anturi pysty akselille.



KUVA 2. Anturin asennus

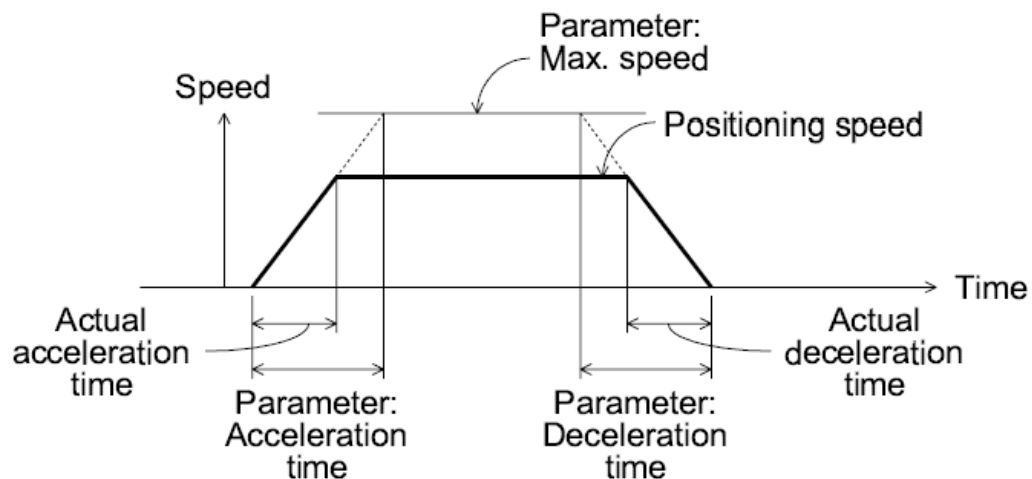
4.2 Aseman häiriötiedon luku PLC:llä

Jo olemassa olevaa ohjelmaa laajennettiin aluksi tuomalla häiriötä mittaavan anturin signaali analogiatulomodulille, joka suorittaa A/D-muunnoksen ja siirtää tiedon edelleen PLC:lle. Anturin digitaalisen signaalin datatyyppi muunnettiin matemaattisiin operaatioihin sopivaksi ja skaalattiin vastaamaan millimetrejä käyttäen hyväksi signaalin arvoa nollassa sekä alarajalla. Nollatasoa ja alarajaa vas-

taavat signaalin arvot saatiin monitoroimalla anturin antamaa signaalia, ja alarajan etäisyys nolatasosta mittaamalla. Olettaen anturin signaalin arvon muuttuvan lineaarisesti voitiin signaali laskennallisesti skaalata koko mittausalueelle.

4.3 Liikkeenhallinta

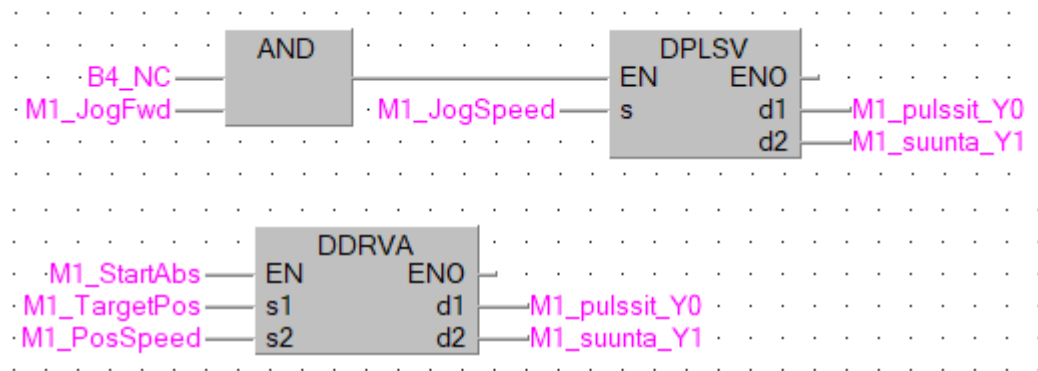
Yksinkertaistetusti servomoottorin ohjaus logiikan avulla tapahtuu servovahvistimen välityksellä lähettämällä pulssijonoa sekä suuntatieto PLC:ltä servovahvistimelle, joka puolestaan muodostaa ohjaussignaalin servomoottorille. Lähetettyjen pulssien lukumäärä määrittää liikkeen suuruuden, pulssitaajuus liikkeen nopeuden ja suuntatieto moottorin pyörimissuunnan. Yhdessä nämä muodostavat suoritettavan liikeprofiilin, jota havainnollistetaan kuviossa 18.



KUVIO 18. Havainnollistus liikeprofiilista (Mitsubishi Electric 2000, 31)

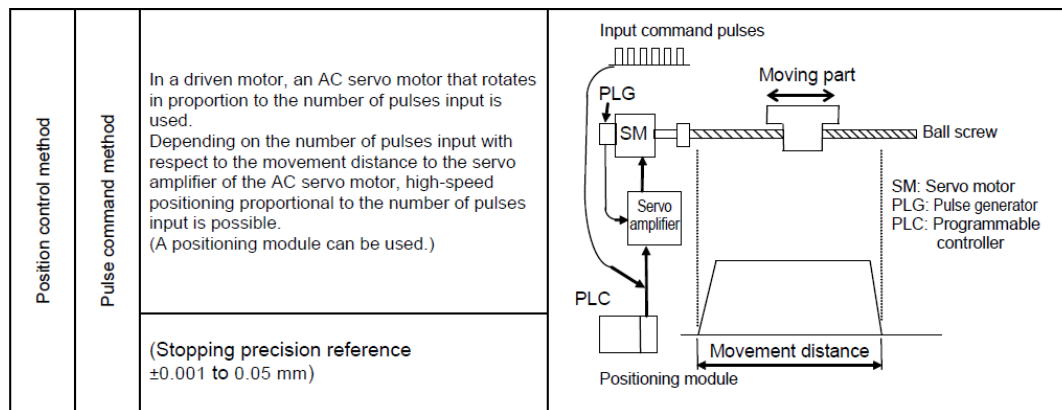
Servovahvistimen parametreissa on elektroninen vaihde, jolle erikseen määritetään, kuinka monta pulssia yhteen akselin kierrokseen vaaditaan väliltä 1000 – 1 000 000 pulssia. Tämä määrää osaltaan moottorin maksimikulmanopeuden, sillä käytössä ollut logiikka pystyi maksimissaan 100 kHz:n pulssitaajuuteen. PLC:llä voitiin niin ikään asettaa parametrejä, mm. erilaisia nopeuteen liittyviä arvoja. Liikekäskyille voitiin esimerkiksi asettaa maksimi pulssitaajuus huomioiden PLC:n ominaisuudet sekä erikseen kiihdytys- ja hidastusajat väliltä 50 – 5000 ms, mitkä näkyvät yllä esitettyssä liikeprofiilissa. Kuviosta huomataan, että asetettu kiihdytys- tai hidastusaika on maksiminopeudelle ja todellinen kiihdytys- tai hidastusaika määräytyy liikekäskyn tavoitenopeuden mukaan.

Varsinaisessa liikkeenhallinnassa keskeisimmässä roolissa olivat pääasiassa kaksi erilaista käskyä: "Variable Speed Pulse Output" (PLSV) ja "Drive to Absolute" (DRVA).



KUVIO 19. Keskeisiä liikkeenhallintakäskyjä

Kaikille liikekäskyille määritetään pulssitaajuus, pulssien lähetyskohde sekä suuntatieto, ja ne suoritetaan erikseen aktivoimalla käsky. PLSV-käskyllä liike on aktiivinen käskyn aktivoinnin ajan. DRVA-käskyllä taas liikutaan määritettyyn absoluuttiseen asemaan huolimatta sijainnista liikkeen alussa. Referenssinä oikean aseman saavuttamiseksi PLC käyttää hyväksi tallennettua lähetettyjen pulssien lukumäärää. "Eteenpäin" liikkeessä pulssien määrä lasketaan ylöspäin ja "taaksepäin" mentäessä alaspäin, ja tätä tietoa voitiin käyttää "pulssiosoitteena" tai asematietona. Asematietoa hyväksikäyttäen luotiin likimääräinen sijainninseuranta, jossa sen hetkinen pulssiosoitte eli lähetettyjen pulssien määrä skaalattiin koordinaatiksi millimetreinä kullekin akselille kuularuuvien nousun ja yhteen moottorin akselin kierrokseen tarvittavan pulssimäärän avulla. Kuviossa 20 on havainnollistettu pulssiohjauksella toteutettua järjestelmää ja aseman saavuttamisen tarkkuutta. Liikealueen rajoilla pakotetut pysäytykset saattoivat aiheuttaa virhettä aseman seurantaan. Tilannetta pyrittiin ehkäisemään pyytämällä käyttäjää kalibroimaan sijaintitieto kotiasemaan ajolla, mikäli sille tarve havaittiin.



KUVIO 20. Asemasäätö pulssiohjauksella (Mitsubishi Electric 2015, 30)

Origin tai kotiaseman määrittämiseksi kummallakin akselilla oli kotiasema-anturit, joiden avulla aseman kalibrointi suoritettiin. ”Zero Return” -funktiolla ”etsitään” kotiasema-anturia määritetystä suunnasta. Kun havaitaan kotiasema-anturin signaalin nouseva reuna, lasketaan nopeus ns. ryömintänopeuteen ja havaittaessa laskeva reuna pysäytetään moottori ja ”Zero Return” -funktio on suoritettu. Funktion suoritus samalla nolaa servovahvistimelle lähetettyjen pulssien laskenta-arvon asettaen origin kotiasemaan.

Jousi-massa-vaimentimesta aiheutuva häiriö vaikuttaa ainoastaan pystyakselilla. Aikaisemmin skaalattu häiriön arvo lisätään pystyakselin asemaan ja saadaan absoluuttinen asema, mikä määräytyy pystyakselin kuorman aseman ja häiriön summasta.

Prosessikehityksen yhtenä tavoitteena oli mainittu liikkeenhallinnan kehittäminen, mistä esimerkkinä voisi toimia sini- tai ympyrämuotoisten liikeratojen luominen. Ongelmaksi osoittautui käytettävissä olevien liikekäskyjen ominaisuuksien puutteellisuudet. Liikekäskyn ollessa aktiivinen ei liikekäskyn ohjearvoa voitu muuttaa esimerkiksi ajan funktiona, vaan liikekäsky tulee deaktivoida ja antaa uusi liikekäsky uudella ohjearvolla, mikä rajoitti erilaisten liikeratojen luontia.

Prosessissa säilytettiin manuaaliohjaus suuntaa indikoivaa nappia painamalla. Tämän lisäksi luotiin koordinaatiohjaus, jossa käyttäjä voi asettaa halutun koordinaatin ja nopeuden kummallekin akselille ja suorittaa liikkeen taas nappia painamalla. Koordinaatioajoa hyödyntäen pyrittiin luomaan erillinen järjestelmän testaukseen tarkoitettu liikesarja, jossa kuormaa ajettaisiin pystyakselilla origosta

ensin alarajalle, sitten ylärajalle ja takaisin origoon. Samalla voitaisiin mitata jousi-massa-vaimentimen värähtelyn suuruutta liikesarjan aikana riippuen liikkeen nopeudesta, kiihdytys- ja hidastusajoista sekä mahdollisesta säätimestä.

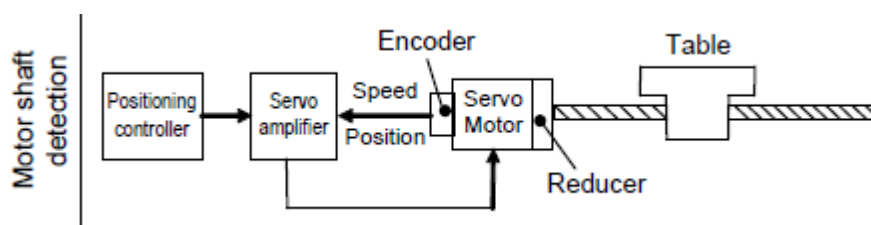
4.4 Käyttöliittymän suunnittelu

Käyttöliittymän suunnittelussa lähtökohtana oli pyrkiä käyttäjäystävälliseen kokemukseen, missä käyttäjälle tarjotaan informaatiota järjestelmän tilasta, toiminnot on nimetty selkeästi ja syötettäville numeerisille arvoille on annettu rajat sekä selitykset. Tarkoituksena oli luoda logiikalla luotuihin käyttömoodeihin yhteensopivat valikot ja operointialusta, jolla pystyttiin ohjaamaan järjestelmää.

Käytössä ollut HMI tarjosi myös mahdollisuuden datan graafiseen havainnollistamiseen. Ominaisuutta pyrittiin hyödyntämään esittämällä pystyakselin tavoite-asema ja absoluuttinen asema kuvaajassa ajan suhteen.

4.5 Säättöpiirin muodostus

Käytössä olleessa järjestelmässä kuorman absoluuttista asemaa ei mitata erillisellä anturilla, vaan absoluuttinen asema lasketaan lähetettyjen ohjauspulssien ja häiriötiedon avulla. Kuorman kiihtyvyydestä aiheutuvaa jousi-massa-vaimentimen värähtelyä eli häiriötä mitataan lineaarianturilla ja häiriö summataan asematietoon saaden absoluuttinen asema.



KUVIO 21. Käytössä ollut puoliksi suljettu järjestelmä (eng. semi closed-loop), johon lisättiin häiriön takaisinkytkentä PLC:lle (Mitsubishi Electric 2015, 31)

Säätöpiirin muodostamiseksi tarvitaan tieto absoluuttisesta asemasta sekä tavoiteasemasta, ja näiden erotuksesta saadaan erosuure, jonka pohjalta generoidaan ohjaussignaali. Liikkeenhallinnan yhteydessä mainittiin, miten liikekäslyn ohjearvoja ei voitu päivittää jatkuvasti, vaan käsky tuli deaktivoida ja aktivoida uudelleen uudella ohjearvolla. Yleisesti ottaen tilanteessa, jossa halutaan kasvattaa prosessin säädettävä suure arvosta A arvoon B, syntyy ohjaussignaali mitausarvon ja tavoitearvon erosuureen avulla, ja erosuure pyritään kuroma umpeen.

Ensimmäiseksi pyrittiin rakentamaan yksinkertainen ON-OFF-säädin, jossa liikekäslyn päätyttyä tarkasteltiin tavoiteaseman ja absoluuttisen aseman erosuurta tarkoituksena kurota tämä umpeen eikä säädintä siis käytetty varsinaisen liikekäslyn aikana. Häiriölle asetettiin hystereesirajat, minkä sisällä arvo sai vaihdella ilman, että säädin reagoi muutokseen. Häiriön ylittäessä hystereesirajan ja ollessa positiivinen eli absoluuttisen aseman ollessa suurempi kuin tavoiteasema, kompensoitiin häiriötä ajamalla kuormaa vastakkaiseen suuntaan tavoitellen tavoiteasemaa ja vastaavasti sama häiriön ollessa negatiivinen.

ON-OFF-säätimen pohjalta pyrittiin luomaan PID-säädin ja suoritettiin alustava parametointi, missä käyttöön otettiin vain P-säätö. Säätosilmukkaa muodostaessa huomattiin, miten PID-säätimen tuottama ohjausarvo ei soveltunut pulssijonomaiseen ohjaukseen PLC:ltä servovahvistimelle.

Häiriön syntymisen estämiseksi kokeiltiin kiihdytys- ja hidastusaikojen säätöä. Muokkaamalla liikeprofiilin trapetsimallia kiihdytys- ja hidastusaikojen avulla voitiin vaikuttaa kuormalle syntyvään kiihtyvyyteen kiihdytyksissä ja hidastuksissa, ja siten suoraan vaikuttaa jousi-massa-vaimentimen värähtelyyn.

4.6 Laitteiston käyttöohjeiden laatiminen

Prosessikehityksen päätyttyä oli määrä laatia laitteistoon liittyen yksityiskohtaiset käyttöohjeet. Käyttöohjeiden perusteella käyttäjän tulee kyetä järjestelmän itsenäiseen operointiin sekä tarvittaessa lukemaan tai kirjoittamaan PLC:n tai HMI:n ohjelma.

5 TULOKSET

5.1 Prosessikehitys

Järjestelmän laajennus onnistui alustavan suunnitelman mukaisesti. Järjestelmään saatiin asennettua jousi-massa-vaimentimesta aiheutuvaa häiriötä mitaava anturi ja tämän anturin mittaustiedot saatiin onnistuneesti sisällettyä ohjauslogiikalle luotuun ohjelmaan asennetun analogiatulomodulin avulla.

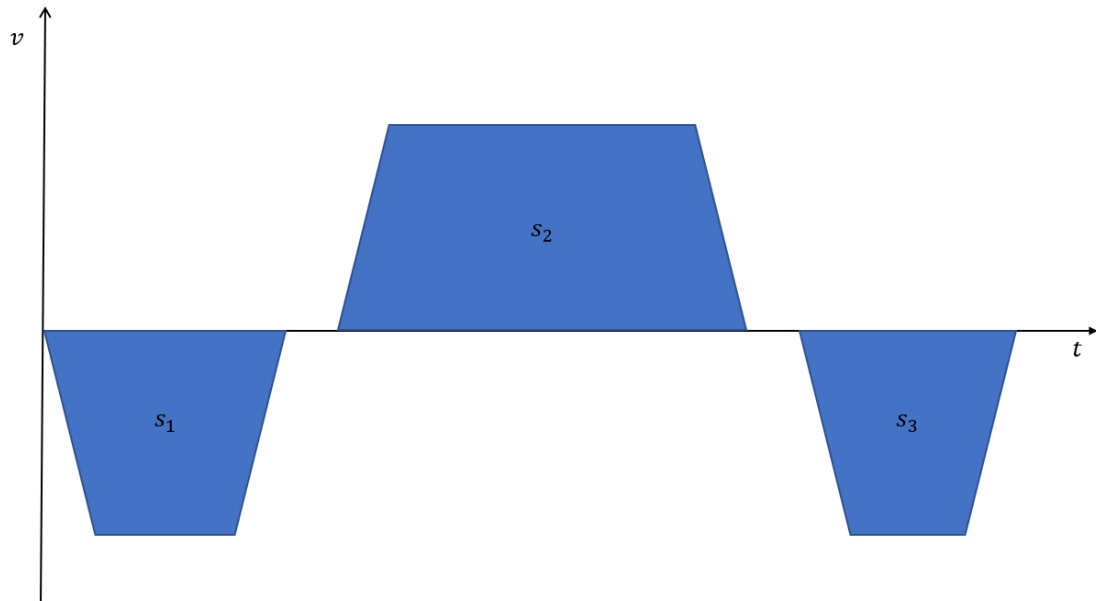
Järjestelmään saatiin sisällettyä erilaisia liikkeenhallintatiloja manuaalisen ohjauksen ohelle. "Drive to Absolute" -liikekäskyä käyttäen voitiin luoda molemmille akseleille erillinen koordinaattiasemaan ajomoodi, jossa käyttäjä voi asettaa kohdekoordinaatin millimetreinä ja aktivoinnilla suorittaa liikkeen. Lisäksi prosessikehityksen aikana luotiin useampi erilainen liikesarjavariaatio, mitkä lopulta karsittiin ohjelmakoon minimoimiseksi.

Koordinaattiajon mahdollistamiseksi tuli pystyä jatkuvaan paikoitukseen molemmilla akseleilla. Pulssien laskuun perustuva sijainnin seuranta saatiin onnistuneesti käyttöön. Kotiasemaan ajolla pystyttiin kummankin akselin origo asettamaan kotiasema-antureiden osoittamiin kohtiin, ja pystyakselin aseman ja häiriötiedon summaksi saatiin pystysuuntainen absoluuttinen asema, mitä tarvitaan säätimen erosuureen muodostamiseksi.

Käyttöliittymän kehitys kulki käsikädessä logiikan ohjelmoinnin kanssa mahdollistaen kaikki logiikalle ohjelmoidut toiminnot. Käyttöliittymän suunnittelussa pyrittiin hyödyntämään visualisointia numeeristen arvojen ja grafiikoiden avulla. Kuorman sijainti ilmoitettiin käyttäjälle koordinaatteina, häiriön suuruus numeerisena lukemana ja erillisestä kuvaajasta voitiin seurata pystyakselin absoluuttista asemaa ja tavoiteasemaa ajan funktiona. On kuitenkin huomioitava, että kuvaajan näytteenottoajan minimiarvo oli yksi sekunti ja siten sen hyödynnettävyys säätötekniikan tarpeisiin heikko.

Koska jousi-massa-vaimentimessa asema riippuu järjestelmään tuodusta voimasta, ja voima puolestaan jousi-massa-vaimentimen massa aiheutuvasta

kiikhtyvyydestä, voitiin häiriö suurilta osin eliminoida kasvattamalla pystyakselin moottorin kiihdytys- ja hidastusaikoja.



KUVIO 22. Testiliikeprofiili pystyakselille

Trapetsimaisessa häiriön mittaukseen tarkoitetussa testiliikeprofiilissa nopeuskäyrän ja aika-akselin välinen pinta-ala s kuvaa liikuttua matkaa ja liikerata alkoi aina pystyakselin origosta. Liikkeistä s_1 oli -140 mm:ä, s_2 +255 mm:ä ja s_3 -115 mm:ä takaisin origoon.

Suoritettaessa kuvion 22 mukainen testiliikeprofiili saatiin eri pulssitaajuuksilla taulukon 8 mukaiset maksimihäiriön Δy_{max} likimääräiset arvot. Mittauksessa dataa tallennettiin kynnyksmäisesti, jolloin häiriön maksimiarvon tiedettiin olevan esitetyiden rajojen sisällä. Taulukoissa 8 ja 9 ilmoitettu nopeusohje on asetettua pulssitaajuutta vastaava lineaariliikkeen nopeus, kun kiihdytys on suoritettu, ja kiihdytys- ja hidastusaikoja on merkitty symboleilla t_K ja t_H .

TAULUKKO 8. Pulssitaajuuden vaikutus häiriön maksimin suuruuteen vakio kiihdytys- ja hidastusajoilla

Pulssitaajuus (Hz)	Nopeusohje (mm/s)	t_K ja t_H (ms)	Maksimihäiriö (mm)
10 000	50	50	$0 < \Delta y_{max} < 1$
20 000	100	50	$0 < \Delta y_{max} < 1$
30 000	150	50	$1 < \Delta y_{max} < 2$
40 000	200	50	$1 < \Delta y_{max} < 2$
50 000	250	50	$2 < \Delta y_{max} < 3$
60 000	300	50	$2 < \Delta y_{max} < 3$
70 000	350	50	$4 < \Delta y_{max} < 5$
80 000	400	50	$6 < \Delta y_{max} < 7$
90 000	450	50	$7 < \Delta y_{max} < 8$
100 000	500	50	$8 < \Delta y_{max} < 9$

Tavoitenopeuden eli pulssitaajuuden pysyen vakiona ja kasvattamalla kiihdytys- ja hidastusaikoja askelmaisesti saatiin häiriötä pienennettyä taulukon 9 mukaisesti.

TAULUKKO 9. Kiihdytys- ja hidastusaikojen vaikutus häiriön maksimin suuruuteen vakionopeusohjeella

Pulssitaajuus (Hz)	Nopeusohje (mm/s)	t_K ja t_H (ms)	Maksimihäiriö (mm)
100 000	500	100	$7 < \Delta y_{max} < 8$
100 000	500	200	$6 < \Delta y_{max} < 7$
100 000	500	300	$3 < \Delta y_{max} < 4$
100 000	500	400	$1 < \Delta y_{max} < 2$
100 000	500	500	$1 < \Delta y_{max} < 2$
100 000	500	600	$1 < \Delta y_{max} < 2$
100 000	500	700	$1 < \Delta y_{max} < 2$
100 000	500	750	$0 < \Delta y_{max} < 1$

Tuloksissa tulee huomioida, että kussakin liikkeessä toteutunut nopeus ei välttämättä ole yhtä suuri kuin tavoiteltu nopeusohje, jos kuljettava matka ei riittänyt tavoitenopeuden saavuttamiseen ja symmetrisesti liikkeen hidastukseen.

Asemaservolle voidaan ajatella suorituskykyä kuvaaviksi arvoiksi liikkeen nopeus sekä tarkkuus, ja arvojen optimointi saattaakin olla niiden välillä tasapainottelua. Tulee huomioida, että säädön tai häiriön kompensoinnin toteuttaminen kiihdytys- ja hidastusajoilla ei palvele kaikkia liikkeitä yhtä hyödyllisesti, jollei niitä kyetä muuttamaan esimerkiksi tulevan liikkeen suuruuden ja nopeuden perusteella.

Lisäksi järjestelmän käyttöön luotiin käyttöohjeet (liite 7).

5.2 Häiriön kompensointi

Järjestelmään ei onnistuttu luomaan toimivaa häiriön kompensoivaa säädintä. Luotu ON-OFF-säädin ei kyennyt vastaamaan värähtelyyn tarpeeksi nopeasti ja saattoi myös satunnaisissa tilanteissa johtaa järjestelmän epästabiliin tilaan. PID-säädön luomisen esteeksi osoittautui järjestelmään alun perin valittu asemäsäätöohjaus (eng. position control mode), minkä ohjaussignaali PLC:ltä servovahvistimelle toteutettiin pulssijono-ohjauksella. Järjestelmän konfiguraatiolla PLC:n synnyttämää ohjaussignaalia ei pystytty muuttamaan ennen kuin liikekäskey oli deaktivoitu joko loppuun suorittamalla tai keskeyttämällä, kuten luvussa 4.5 todettiin, eikä siten jatkuvaa ohjearvon säätöä voitu toteuttaa.

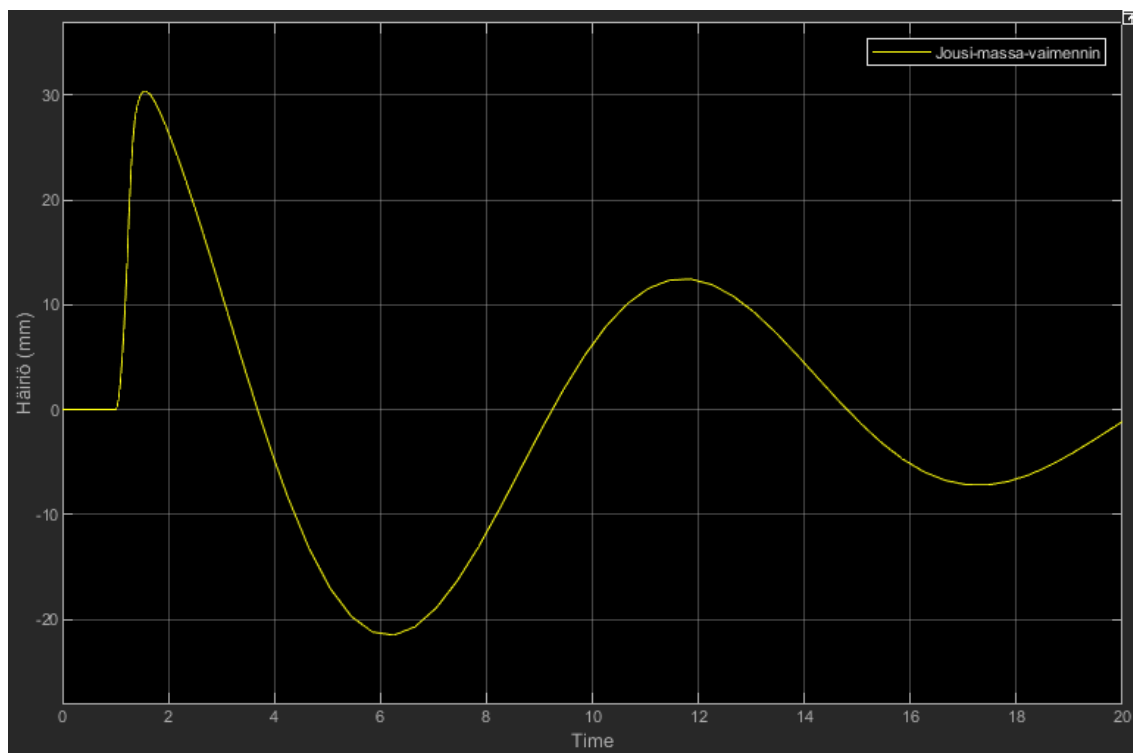
Järjestelmästä puuttui myös ominaisuus datan analysointiin graafisessa muodossa eli eräänlainen tiedonkeruuyksikkö. Säädintä viritettäessä olisi oleellista saada dataa annetusta ohjearvosta ja toteutuneesta suureesta, jotta säätöparametrin muutoksen vaikutus nähtäisiin tarkasti.

Koska häiriön kompensointia ei pystytty laitteistossa toteuttamaan, päätettiin tilannetta simuloida MATLAB:n Simulink:lla. Simuloinnissa laajennettiin luvussa 2.4 havainnollistettua DC-servomoottorin Simulink-mallia siten, että moottorin lähtösuureet kiertokulma ja kulmanopeus muunnettiin lineaariliikettä kuvaaviksi asemaksi sekä lineaariliikkeen nopeudeksi. Simuloinnissa päätettiin käytettävän DC-servomoottorin mallia sen yksinkertaisuuden vuoksi AC-servomoottorin sijaan. Lisäksi koska todellisen jousi-massa-vaimentimen massaa, jousien jousiva-

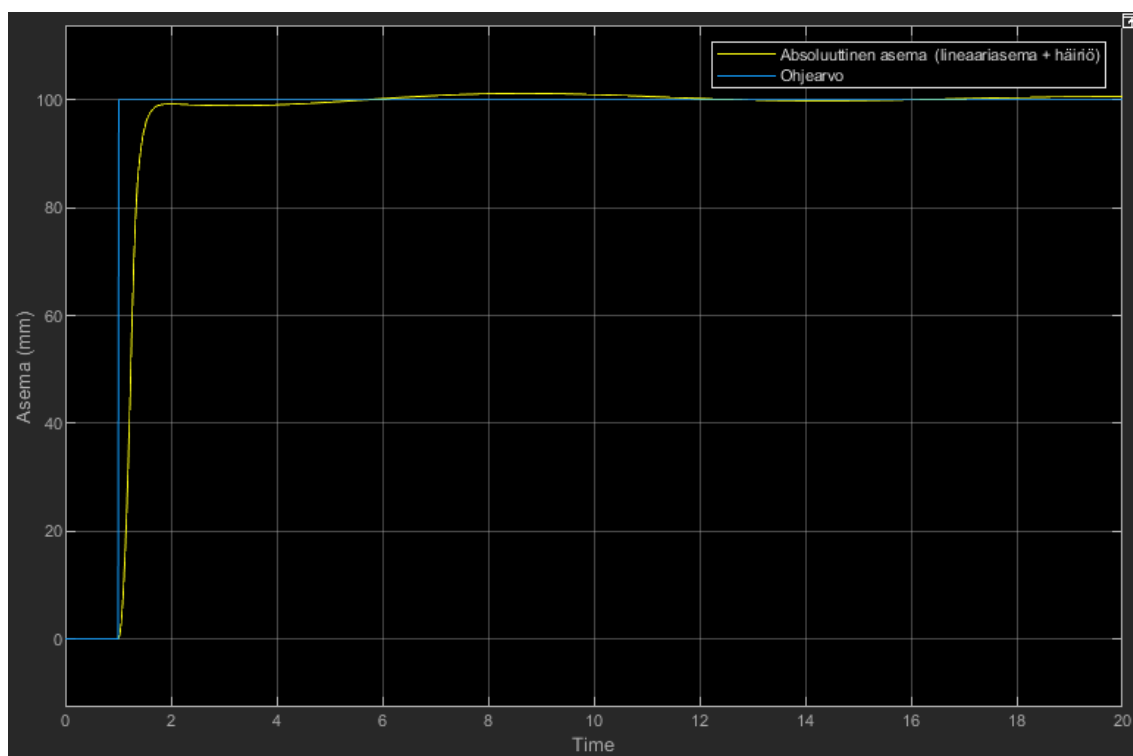
kioita tai vaimentimien vaimennuskertoimia ei ollut tiedossa, ei koettu tarpeelliseksi yrittää arvioida simulointimallin kaikkia parametrejä mahdollisimman todennukaisiksi, vaan tyydyttiin täysin hypoteettiseen tilanteeseen ja simulaatioon.

Laitteistossa pystyakselilla moottorin yksi kierros vastasi kuorman 5 mm:n liikettä, ja jousi-massa-vaimentimesta aiheutunut häiriö syntyi kuorman kiihtyvyydestä. Näillä tiedoilla voitiin kiertokulma muuntaa lineaariliikettä vastaavaksi asemaksi ja vastaavasti kulmanopeus lineaariliikkeen nopeudeksi. Lineaariliikkeen nopeus derivoitiin saaden selville sen kiihtyvyys ja kertomalla se asetetulla massan arvolla, mihin kiihtyvyys kohdistuu, saatiin selville häiriön aiheuttava voima. Lisäämällä simulointimalliin jousi-massa-vaimennin siirtofunktiona, jossa tulosuureena on edellä mainittu voima, saadaan lähtösuureeksi häiriön suuruus. Summaamalla häiriö kiertokulmasta muunnettuun lineaariseen asemaan saadaan selville kuorman absoluuttinen asema. Takaisinkytkemällä ja muuntamalla absoluuttinen asema takaisin radiaaneiksi saadaan erosuure PID-säätimelle. Simulink-malli on nähtävissä liitteenä 8.

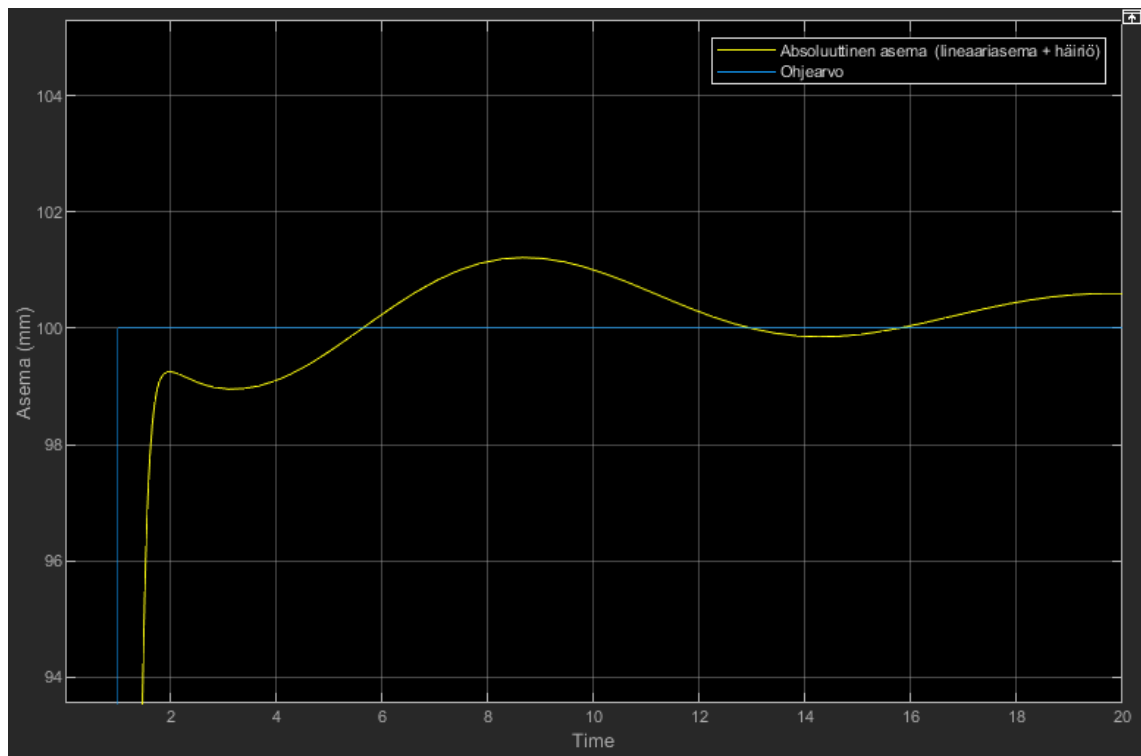
Antamalla DC-servomoottorille askelmainen ohjearvo nolasta 100 mm:iin saatiin kuvioden 23–25 mukaiset tulokset toteutuneesta häiriöstä sekä ohjearvosta ja toteutuneesta absoluuttisesta asemasta.



KUVIO 23. Syntynyt häiriö askelmaisella herätteellä

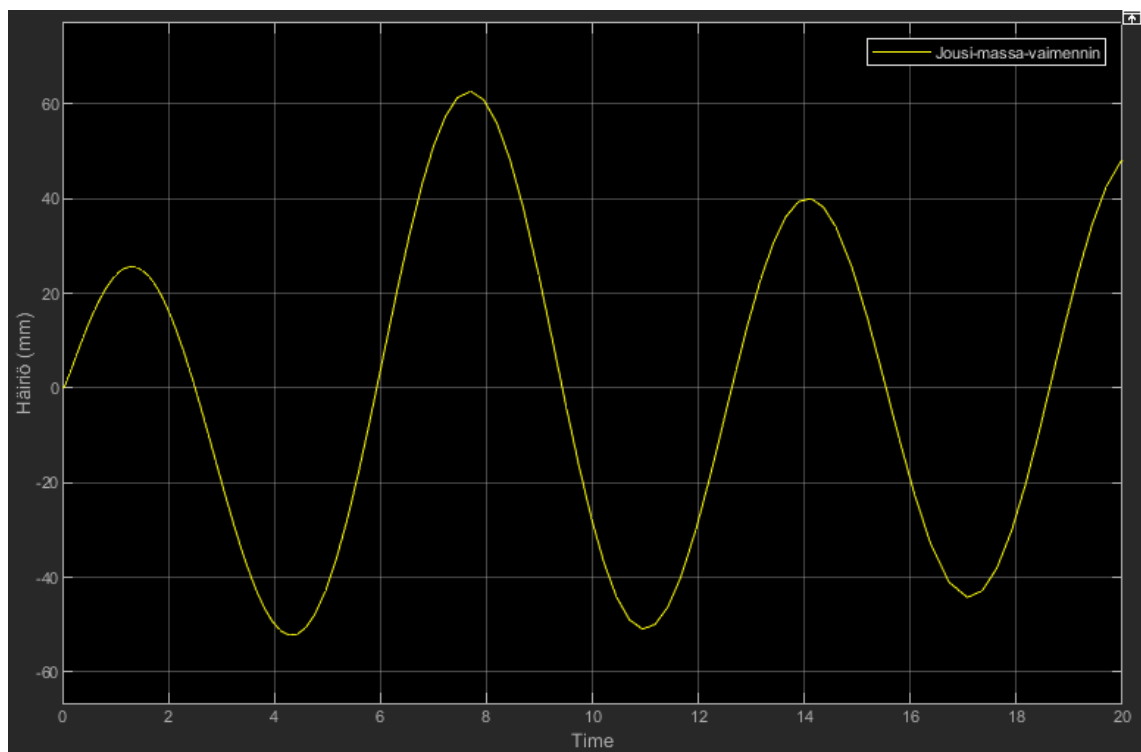


KUVIO 24. Absoluuttinen asema ja ohjearvo askelmaisella herätteellä

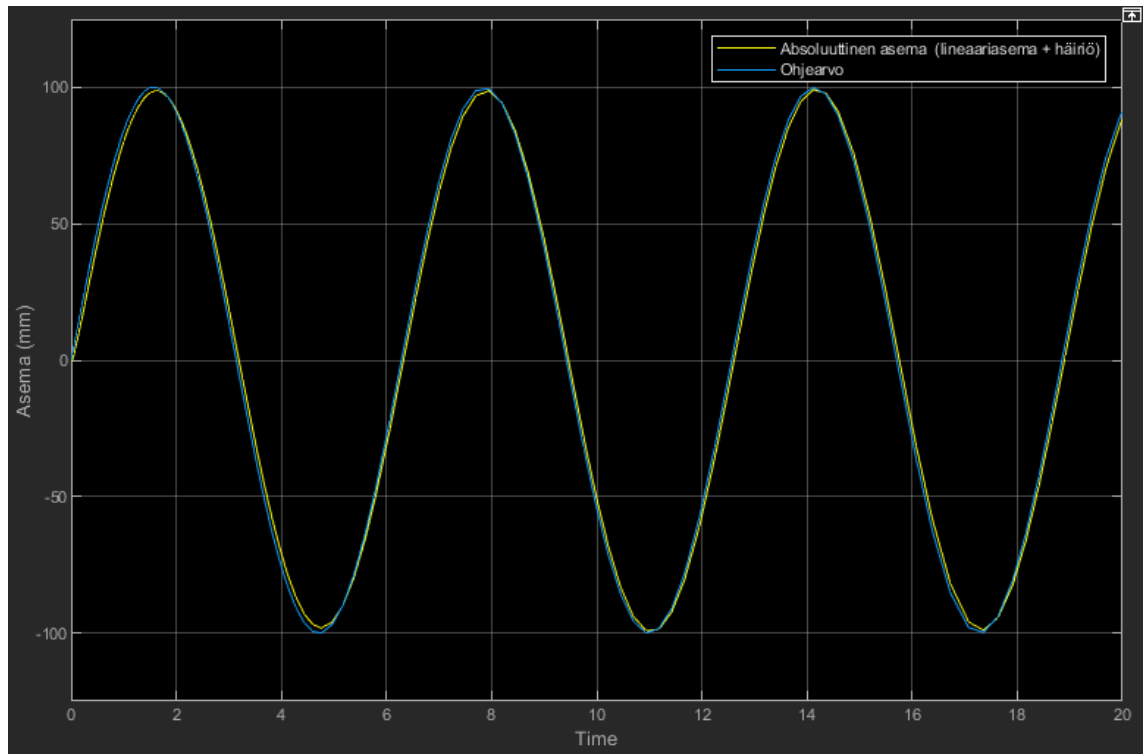


KUVIO 25. Tarkennus kuvioon 24

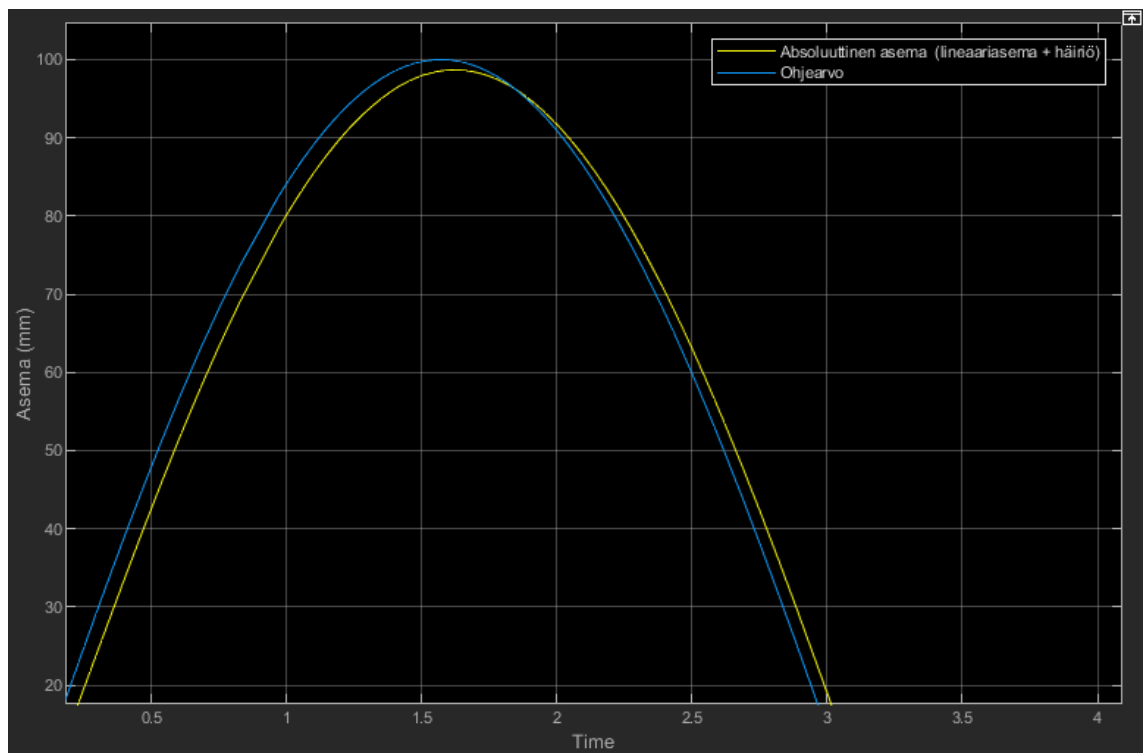
Simulink-mallia simuloitiin vielä sinimuotoisella ohjearvolla, jonka amplitudi oli asetettu vastaamaan 100 mm:ä, ja jonka taajuus oli 1 Hz. Simulaatiosta saatiin kuvioden 26–28 mukaiset kuvat.



KUVIO 26. Syntynyt häiriö sinimuotoisella ohjearvolla



KUVIO 27. Absoluuttinen asema ja ohjearvo sinimuotoisella ohjearvolla



KUVIO 28. Tarkennus kuvioon 27

Kuvaajien perusteella järjestelmälle voitaisiin halutessa määrittää luvussa 2.2 esiteltyjä suorituskkyä kuvaavia arvoja ja edelleen muokata PID-säätimen para-

metrejä paremman suorituskyvyn saavuttamiseksi tai hypoteettisten suorituskykyvaatimuksien täyttämiseksi. Tulee kuitenkin pitää mielessä, että luotu malli vastaa todellista tilannetta vain periaatteellisella tasolla, mutta simulaatiosta selviää, mistä tavoitellussa häiriön kompensoinnissa on oikein kyse.

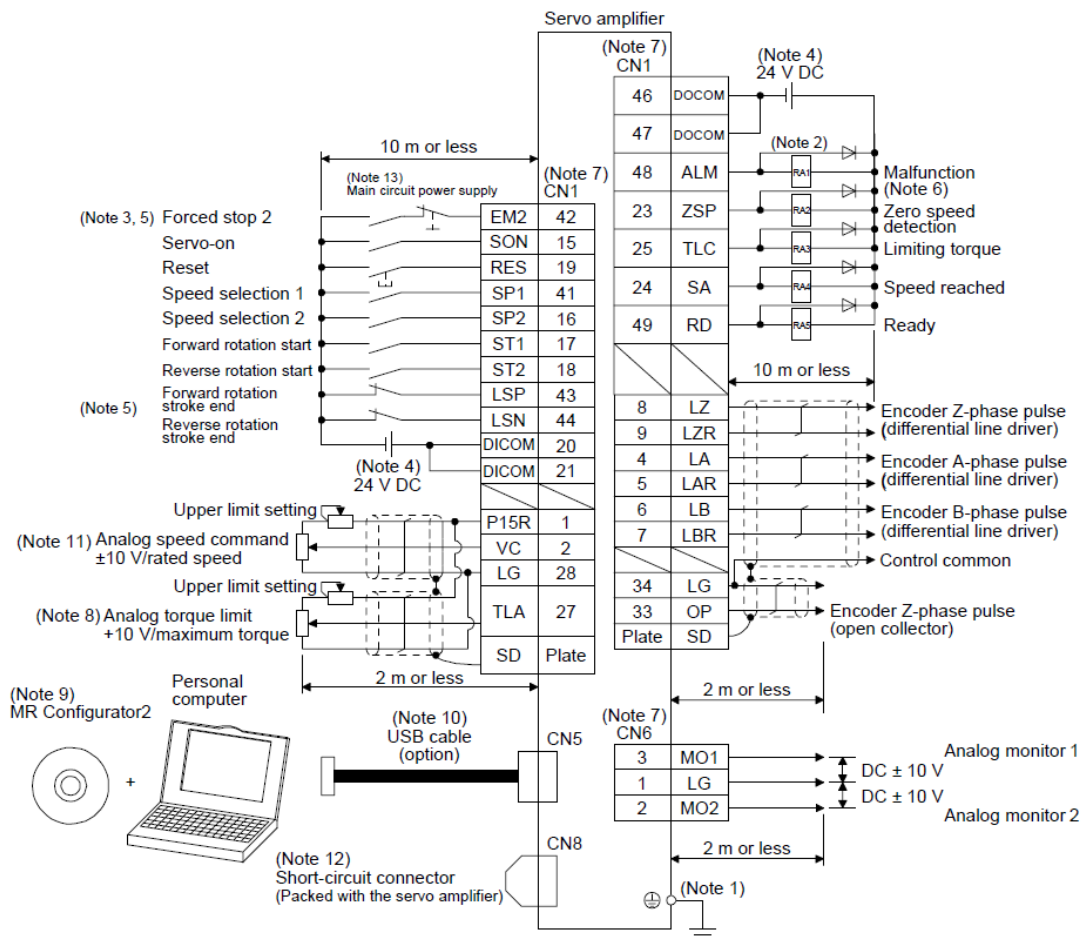
6 POHDINTA

Opinnäytetyöprosessista teki työlään ja haastavan käytössä olleiden laitteiden ja ohjelmistojen käytön opettelu perusteista lähtien, ja ongelmatilanteissa tuli turvautua pääasiassa valmistajien laatimiin manuaaleihin. Prosessin alussa järjestelmästä oli materiaalia ja dokumentaatiota saatavilla niukasti, pääasiassa valokuvia sekä esimerkkiohjelmat logiikalle ja käyttöliittymälle. Toisaalta juuri dokumentaation vähyys saattoi pakottamaan tutustumaan järjestelmän rakenteeseen ja laitteiden toimintaan syvällisemmin kuin mitä muuten oli saattanut tehdä, mikä jo itsessään loi otollisen oppimiskokemuksen.

Työlle asetettuiden tavoitteiden häiriön kompensointia lukuun ottamatta voitiin ajatella olevan alustusta juurikin kompensatiosäätimen luomiselle. Ne olivat helpommin saavutettavissa eikä niiden kanssa suuria ongelmia syntynyt. Kuitenkin opinnäytetyön keskeisimmän tavoitteen saavuttamisen uupuminen nostattaa kysymyksen, miten järjestelmään olisi häiriön kompensointi kyetty toteuttamaan. Selvää lopulta oli, ettei pulssijono-ohjauksella kyetty häiriön kompensointiin tilanteessa, jossa absoluuttiseen asemaan aiheutui ulkoista häiriötä jousi-massa-vaimentimen värähtelystä. Koska ennalta määrättyjen parametrien mukaisesti luotua liikeprofiilia (kuvio 18) ei kyettä muuttamaan esimerkiksi erosuureen muuttuessa, vaan vasta paikoituksen päätyttyä, ei sillä voitu toteuttaa hienovaraista nopeuden säätöä, mitä jatkuvasti muuttuvan häiriön kompensointiin vaaditaan. Siksi olisikin mielenkiintoista kehittää luotua Simulink-mallia vastaamaan mahdollisimman tarkasti todellista järjestelmää niin mallinnetun moottorin kuin jousi-massa-vaimentimenkin osalta. Tämä kuitenkin vaatisi järjestelmän mekaanisen rakenteen purkamista, jotta simulaatiomallin tärkeimmät parametrit saataisiin määritellyä mahdollisimman tarkasti tarvittavan dokumentaation puuttuessa. Näitä ovat mm. jousi-massa-vaimentimen jousien jousivakiot, vaimentimien vaimennuskerroimet sekä sen kokonaisuudessa.

Simulaatiomallin ohella mahdollinen suunta prosessin jatkokehittämiseksi olisi vaihtaa pysty akselin pulssijonolla ohjattu asemasäätö analogisella jännitteellä ohjattuun nopeussäätöön. Järjestelmää tulisi laajentaa erillisellä analogialähtömoduulilla, jolla mahdollistettaisiin ± 10 V:n DC analogialähtö. Analogialähdön

kytkentä servovahvistimelle on esitetty kuviossa 29. Analogialähtömoduuliksi järjestelmään sopisi esimerkiksi lisämoduuli FX3U-4DA (liite 1).

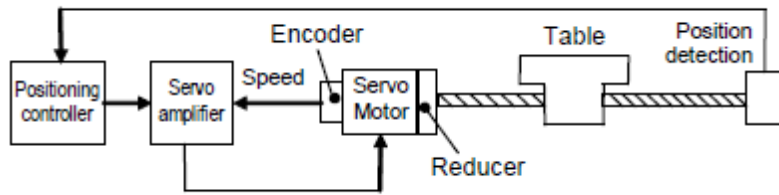


KUVIO 29. MR-J4-10A-RJ servovahvistimen CN1-kytkentä nopeussäädöllä (speed control mode) (Mitsubishi Electric 2014a, 88)

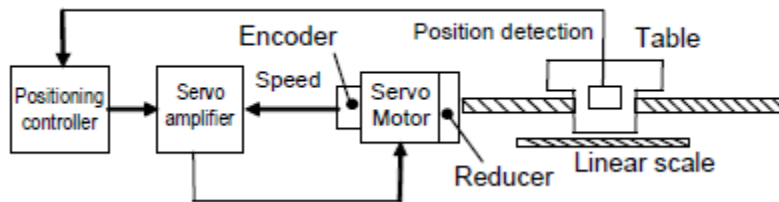
Päivittämällä servovahvistimen parametrejä sekä luomalla uusi liikkeenhallinta PID-säädinblokillä päästäisiin alkuun kompensatiosäätimen luomisessa.

Koska ohjaus ei enää pysty akselilla tapahtuva pulssijonoa lähettämällä, ei lähetettyjä pulsseja voida laskea eikä asemaa voida paikottaa kuvioiden 20 ja 21 havainnollistamalla tavalla, jossa laskettiin PLC:itä lähetettyjä ohjauspulsseja ja tiedettiin moottorin liikkeen olevan suoraan verrannollinen lähetettyjen pulssien lukumäärään. Järjestelmään voitaisiin lisätä pysty akselin asemaa mittaava anturi esimerkiksi Mitsubishi Electricin kuvioissa 30 tai 31 esittämällä tavalla. Vaihtoehtoisesti kuorman asemaa mittaavan lineaarinkooderin tieto on mahdollista tuoda

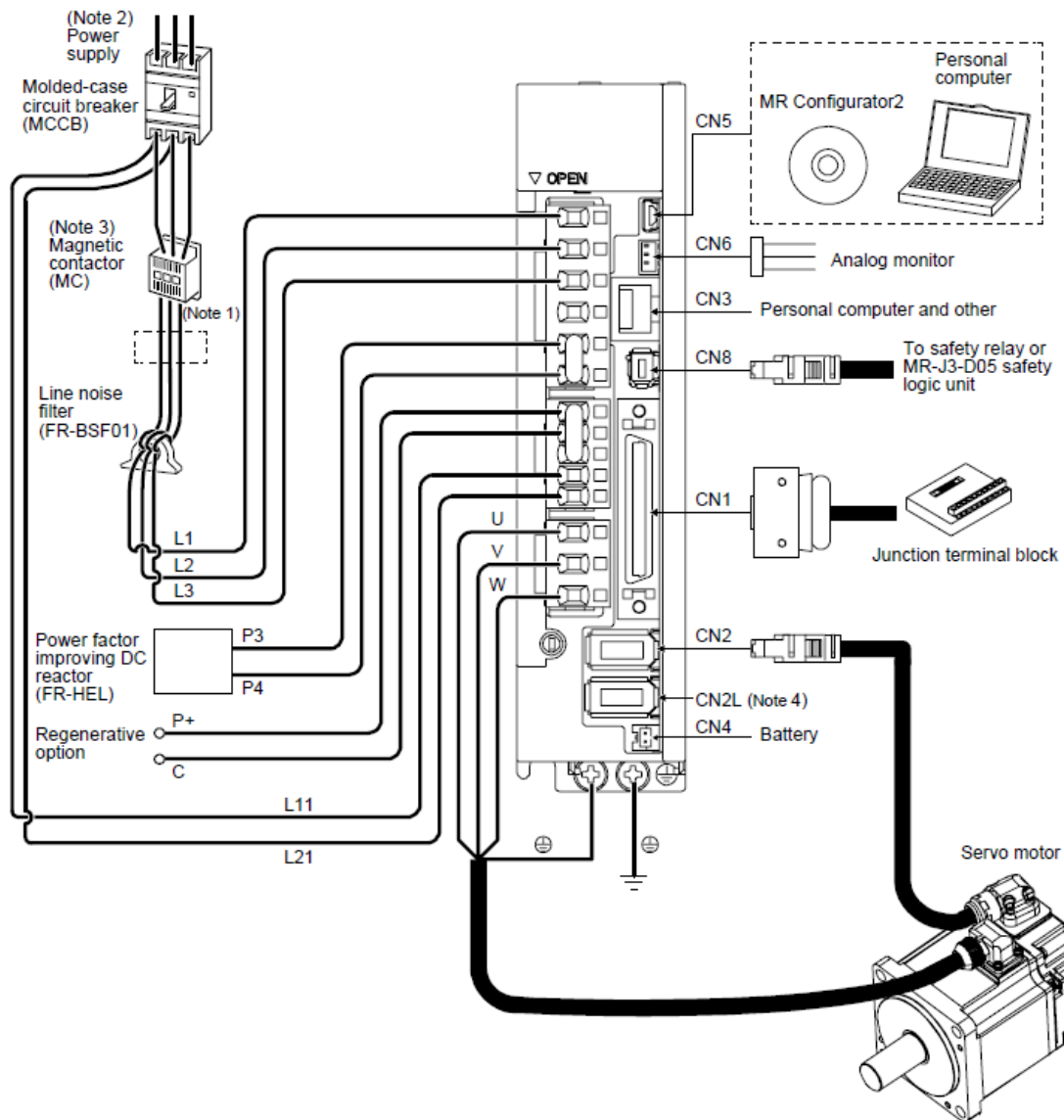
myös suoraan käytössä olleille servovahvistimille kuvion 32 mukaisesti liittimeen CN2L.



KUVIO 30. Havainnollistus kuorman aseman mittauksen takaisinkytkennästä (Mitsubishi Electric 2015, 31)



KUVIO 31. Vaihtoehtoinen kuorman aseman mittauksen takaisinkytkentä (Mitsubishi Electric 2015, 31)



KUVIO 32. MR-J4-10A-RJ-servovahvistimen kytkentäkaavio (Mitsubishi Electric 2014a, 53)

Yhdistämällä jälleen asematieto häiriötiedon kanssa voidaan absoluuttinen asema laskea saaden säätimen tarvitsema erosuure. Koska servovahvistimelle lähetettävä ohjausjännite on suoraan verrannollinen moottorin nopeuteen, voidaan myös hyödyntää moottorin nopeuden takaisinkytkentää servovahvistimen analogiamonitoroinnin avulla.

Huomioitavaa käytössä olleen logiikan suorituskyvystä on, että ohjelman laajentuessa tai monipuolistuessa ja siten ohjelmakoon kasvaessa ohjelmakiertoaika kasvoi helposti 40 – 50 millisekuntiin. Koska käytössä ollut analogiatulomoduli

FX3U-4AD-ADP päivittää arvonsa joka ohjelmakiertoajalla (liite 1), vaikuttaa ohjelmakiertoajan kasvu oleellisesti järjestelmän kykyyn vastata häiriöön ja siten sen kompensointiin.

Suhteellisen pitkän ohjelmakiertoajan luoman ongelman ratkaisemiseksi voisi harkita PLC:n vaihtoa tehokkaampaan ja nopeampaan ohjelmakiertoaikaan kykenevään keskusyksikköön, mikä vaatisi myös uusien lisämoduulien tarpeen karjoittamisen. Käytössä olleelle Mitsubishi Electricin FX-sarjan FX3U-32M keskusyksikölle valmistaja ilmoittaa loogisen komennon suoritusajaksi 0,065 μ s (Mitsubishi Electric 2014b, 20) ja vertailuksi Q-sarjan Q02HCPU:lle 0,032 μ s (Mitsubishi Electric 2007, 28). On kuitenkin huomioitava, että kokonaisuudessaan ohjelmakiertoaika riippuu niin komentojen tai käskyjen määrästä mutta myös niiden tyyppistä (Mitsubishi Electric 2007, 19), eikä siten tarkkaa vertailua ohjelmakiertoajien välillä suoraan tämän perusteella voida tehdä.

Mikäli järjestelmän jatkokehityksessä kyetään luomaan suorituskykyinen häiriön kompensoitiosäädin ja mahdollisimman todenmukainen simulaatiomalli, olisi näitä mielenkiintoista verrata keskenään. Simulaatiomallissa hyväksi todettuja säätöparametreja voisi käyttää todellisessa järjestelmässä. Toisaalta todellisen järjestelmän fysikaalisen ominaisuuden, kuten jousi-massa-vaimentimen jousivaikion tai vaimennuskertoimen, muutoksen vaikutusta järjestelmän käyttäytymiseen voisi simulaatiomallin avulla ennustaa. Todellisuus yhdessä simulaation kanssa loisi havainnollistan ja monipuolisen kokonaisuuden säätötekniikan opetuskäyttöön, mikä olikin koko opinnäytetyön taustalla.

LÄHTEET

Geosense. n. d. Sensor Outputs. Luettu 12.11.2020.

<https://www.geosense.co.uk/technical/sensor-outputs>

Fonselius, J., Laitinen, E., Pekkola, K., Sampo, A. & Välimaa, T. 1994. Koneautomaatio. Anturit. 3. painos. Helsinki: Painatuskeskus.

Fonselius, J., Rinkinen, J. & Vilenius, M. 1998. Koneautomaatio. Servotekniikka. 2. painos. Tampere: Tampereen yliopistopaino oy.

Kiong, T. K. & Putra, A. S. 2011 Drives and Control for Industrial Automation. Lontoo: Springer.

Megatron. 2019. Data Sheet for Linear Sensors. Potentiometric Linear Transducer. Series MBH.

Mitsubishi Electric. 2000. Positioning Control. Training Manual.

Mitsubishi Electric. 2006. FX Analog Family.

Mitsubishi Electric. 2007. MELSEC System Q. Programmable Logic Controllers. Beginner's Manual.

Mitsubishi Electric. 2014a. General-Purpose AC Servo. MELSERVO-J4. MR-J4_A_(-RJ) Servo Amplifier Instruction Manual.

Mitsubishi Electric. 2014b. MELSEC FX Family. Programmable Logic Controllers. Beginner's Manual.

Mitsubishi Electric. 2015. AC Servo School Text. AC Servo Practice Course (MELSERVO-J4).

MTS Sensors. 2018. Temposonics. Magnetostrictive Linear Position Sensors. EP2 Analog Data Sheet.

Omron. 2019. Smart Sensor Laser Sensors CMOS Type. ZX2.

SICK. 2020. UM12-1172261. Ultrasonic Sensors.

Sinclair, I. 2001. Sensors and Transducers. 3. painos. Oxford: Newnes.

Virtanen, M. J. 1981. Yleinen säätötekniikka. Helsinki: Infopress.








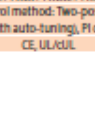





LIITTEET

Liite 1. FX Analog Family -katalogi

1 (2)

(Mitsubishi Electric 2006, 6–7)

Specifications

	Expansion Board	2CH		4CH			
							
							
							
							
							
							
DA	FX1N-1DA-BD	FX2N-2DA		FX2N-4DA		FX2NC-4DA	
Output Channel	1 CH	2 CH		4 CH		4 CH	
Analog Output Range (External load resistance)	0 to 10V DC (2k to 1MΩ) 4 to 20mA (500Ω or less)	0 to 5V DC, 0 to 10V DC (2k to 1MΩ) 4 to 20mA (400Ω or less)		-10 to +10V DC (2k to 1MΩ) 0 to 20mA, 4 to 20mA (500Ω or less)		-10 to +10V DC (2k to 1MΩ) 0 to 20mA, 4 to 20mA (500Ω or less)	
Resolution	2.5mV 8μA	2.5mV 4μA		5mV 20μA		5mV 20μA	
Digital Input	12 bit	12 bit		Signed 12 bit		Signed 12 bit	
Overall Accuracy *1	±1%	±1%		±1%		±1%	
Conversion Time	one scan time	4ms / 1 channel		2.1ms / 4 channels		2.1ms / 4 channels	
Isolation	None	See Notes below: *3 & *4		See Notes below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3, *4 & *6	
No. of Occupied I/O	0 points	8 I/O points		8 I/O points		8 I/O points	
Applicable PLC	FX1s / FX1w	FX1w / FX2N / FX2NC / FX2u *5		FX1w / FX2N / FX2NC / FX2u *5		FX2NC	
Certifications *2	CE	CE, UL/UL		CE, UL/UL		CE, UL/UL	
AD	FX1N-2AD-BD	FX2N-2AD		FX2N-4AD		FX2NC-4AD	
Input Channel	2 CH	2 CH		4 CH		4 CH	
Analog Input Range (Input resistance)	0 to 10VDC (300kΩ) 4 to 20mA (250Ω)	0 to 5V DC, 0 to 10V DC (200kΩ) 4 to 20mA (250Ω)		-10 to +10 V DC (200kΩ) -20 to +20 mA, 4 to 20mA (250Ω)		-10 to +10V DC (200kΩ) -20 to +20mA, 4 to 20mA (250Ω)	
Resolution	2.5mV 8μA	2.5mV 4μA		5mV 20μA		0.32mV 1.25μA	
Digital Output	12 bit	12 bit		Signed 12 bit Signed 11 bit		Signed 16 bit Signed 15 bit	
Overall Accuracy *1	±1%	±1%		±1%		±0.3%(20 to 30°C), ±0.5%(0 to 55°C) ±0.5%(20 to 30°C), ±1.0%(0 to 55°C)	
Conversion Time	one scan time	2.5 ms / 1 channel		Normal speed: 15ms / number of used channel, High speed: 6ms / number of used channel		1ms / Number of used channel	
Isolation	None	See Notes below: *3 & *4		See Notes below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3, *4 & *6	
No. of Occupied I/O	0 points	8 I/O points		8 I/O points		8 I/O points	
Applicable PLC	FX1s / FX1w	FX1w / FX2N / FX2NC / FX2u *5		FX1w / FX2N / FX2NC / FX2u *5		FX2NC	
Certifications *2	CE	CE, UL/UL		CE, UL/UL		CE, UL/UL	
Temperature		FX3N-2TC		FX3N-4TC		FX3N-4PT	
Channel		2CH (Temperature Input 2CH, Transistor output 2CH and CT Input 2CH*11)		4 CH Input		4 CH Input	
Input Types		Thermocouple type K, J, R, S, E, T, B, N, PL I, WR6S-2S, U, and L, 3-wire platinum resistance thermometer sensor(s) PT100, and JPT100		K type thermocouple J type thermocouple		3-wire platinum resistance thermometer sensor(s) PT100	
Compensated range		Examples: - Type K: -100°C to +1300°C / -100°F to +2400°F - Type J: -100.0°C to +800.0°C / -100°F to +2100°F		-100 to +1200°C / -1480 to +2192°F -100 to +600°C / -148 to +1112°F		-100 to +600°C / -148 to +1112°F	
Resolution		0.1°C / 0.1°F or 1°C / 1°F		0.4°C / 0.72°F 0.3°C / 0.54°F		0.2 to 0.3°C / 0.36 to 0.54°F	
Digital Output		Examples: - Type K: -100 to +1300 (°C) / -100 to +2400 (°F) - Type J: -1000 to +8000 (°C) / -100 to +2100 (°F)		-1000 to +120000 (°C) / -1480 to +21920 (°F)		-1000 to +6000 (°C) / -1480 to +11120 (°F)	
Accuracy		±0.7% of range span ± 1digit *12		±0.5% of fullscale +1°C		±1% of full scale	
Conversion Time		500ms (Sampling time)		(240ms ±2%) / Number of used channel		15ms / 1 channel	
Isolation		See Notes Below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3, *4 & *6	
No. of Occupied Points		8 I/O points		8 I/O points		8 I/O points	
Applicable PLC		FX1w / FX2N / FX2NC / FX2u *5		FX1w / FX2N / FX2NC / FX2u *5		FX1w / FX2N / FX2NC / FX2u *5	
Notes		Control method: Two-position, PID(with auto-tuning), PI control		—		—	
Certifications *2		CE, UL/UL		CE, UL/UL		CE, UL/UL	

Notes: (For detailed information please refer to the respective product manuals).

*1: Percentage of full scale

*2: For Shipping approvals consult with respective manual

*3: A photocoupler is used to insulate the analog input or output area from the PLC.










*4: Channels are not insulated from each other.

*5: FX2NC-CN1-F required for FX2NC

*6: A DC/DC converter is used to insulate the power supply from the analog input or output.

*7: Data updated every PLC scan time

*8: FX2u-***-BD required. (***) represents "422", "232", "485", "CAN", or "USB"

New 		New 		3CH Hybrid		5CH Hybrid		8CH Hybrid	
FX3U-4DA		FX3U-4DA-ADP		FX3U-3A		FX3U-5A			
4 CH		4 CH		1 CH		1 CH			
-10 to +10V DC (1k to 1MΩ)		0 to 20mA, 4 to 20mA (500Ω or less)		0 to 5V DC, 0 to 10V DC (1k to 1MΩ)		-10 to +10V DC (2k to 1MΩ)		0 to 20mA, 4 to 20mA (500Ω or less)	
0.32mV		0.63μA		40mV		5mV		20μA	
Signed 16 bit		15 bit		8 bit		Signed 12 bit		10 bit	
±0.5% (20 to 30°C), ±0.5% (0 to 55°C)		±0.5% (20 to 30°C), ±1.0% (0 to 55°C)		±1%		±0.5% (20 to 30°C), ±1.0% (0 to 55°C)			
1ms / 4 channels		200μs *7		3 x T/D instruction time		2ms			
See Notes below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3, *4 & *6		See below		See below			
8 I/O points		0 I/O points		See below		See below			
FX3U *8		FX3U *8		See below		See below			
CE, UL/cUL		CE, UL/cUL		See below		See below			
New 		New 							
FX3U-4AD		FX3U-4AD-ADP		FX3U-3A		FX3U-5A		FX3U-8AD	
4 CH		4 CH		2 CH		4 CH		8 CH (also can be used as TC inputs)	
-10 to +10V DC, (200kΩ)		-20 to +20mA, 4 to 20mA (250Ω)		0 to 5V DC, 0 to 10V DC (200kΩ)		-100 to +100mV DC, -10 to +10V DC (200kΩ)		-10 to +10V DC (200kΩ)	
0.32mV		1.25μA		2.5mV		10μA		0.63mV	
Signed 16 bit		Signed 15 bit		12 bit		11 bit		Signed 15 bit	
±0.3% (20 to 30°C), ±0.5% (0 to 55°C)		±0.5% (20 to 30°C), ±1.0% (0 to 55°C)		±0.5% (20 to 30°C), ±1.0% (0 to 55°C)		±1%		±0.3% (20 to 30°C), ±0.5% (0 to 55°C)	
500μs x No. of used channels *9		200μs *7		2 x T/D instruction time + FROM instruction time		1ms / Number of used channels		500μs / Number of used channels *10	
See Notes below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3 & *4		See Notes below: *3, *4 & *6		See below	
8 I/O points		0 points		8 I/O points		8 I/O points		8 I/O points	
FX3U *8		FX3U *8		FX3U / FX3N / FX3NC / FX3U *5		FX3U / FX3N / FX3NC / FX3U *5		FX3U / FX3N / FX3NC / FX3U *5	
CE, UL/cUL		CE, UL/cUL		CE		CE, UL/cUL		See below	
New 		New 							
FX3U-4AD-TC-ADP		FX3U-4AD-PT-ADP						FX3U-8AD	
4 CH Input		4 CH Input						8 CH (also can be used as VmA input)	
K type thermocouple		J type thermocouple		3-wire platinum resistance thermometer sensor(s) PT100				K type thermocouple	
-100 to +1000°C / -148 to +1832°F		-100 to +600°C / -148 to +1112°F		-50 to +250°C / -58 to +482°F				-100 to +1200°C / -148 to +2192°F	
0.4°C / 0.72°F		0.3°C / 0.54°F		0.1°C / 0.18°F				0.1°C / 0.1°F	
-1000 to +10000 (°C) / -1480 to +18320 (°F)		-1000 to +6000 (°C) / -1480 to +11120 (°F)		-500 to +25000 (°C) / -5800 to +48200 (°F)				-1000 to +12000 (°C) / -1480 to +21920 (°F)	
±(0.5% of full scale +1°C)		±0.5% (20 to 30°C), ±1.0% (0 to 55°C)		±0.5% (20 to 30°C), ±1.0% (0 to 55°C)				±0.5% (0 to 55°C)	
200μs *7		200μs *7		40ms / Number of used channels				40ms / Number of used channels	
See Notes below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3, *4 & *6		See Notes below: *3, *4 & *6				See Notes below: *3, *4 & *6	
0 points		0 points		8 I/O points				8 I/O points	
FX3U *8		FX3U *8		FX3U / FX3N / FX3NC / FX3U *5				FX3U / FX3N / FX3NC / FX3U *5	
—		—		—				—	
CE, UL/cUL		CE, UL/cUL		CE, UL/cUL				CE, UL/cUL	

*9: If 1 or more channels use the digital filter(s), the time required for A/D conversion will be *5 ms x number of selected channels.
 *10: If 1 or more channels use the thermocouple input(s), the input voltage/current data conversion speed will be *1 ms x number of selected channels.

*11: CTL-12-S36-8 or CTL-6-P-H (manufactured by U.R.D. Co., Ltd)
 *12: Cold contact temperature compensation error Within ±1.0°C (within ±2.0°C: -100 to -35°C, within ±3.0°C: -150 to -200°C)

Liite 2. Omron ZX2-laseretäisyysanturin datalehti

1 (2)

(Omron 2019, 5–6)

ZX2

Specifications

Diffuse-reflective Sensor Heads

Item	Model	ZX2-LD50L	ZX2-LD50	ZX2-LD100L	ZX2-LD100
Optical system		Diffuse reflective			
Light source (wave length)		Visible-light semiconductor laser with a wavelength of 660 nm and an output of 1mW max. EN class 2, FDA class 2 *5			
Measurement center point		50 mm		100 mm	
Measurement range		±10 mm		±35 mm	
Beam shape		Line	Spot	Line	Spot
Beam size *1		Approx. 60 μm × 2.6 mm	Approx. 60 μm dia.	Approx. 110 μm × 2.7 mm	Approx. 110 μm dia.
Resolution *2		1.5 μm		5 μm	
Linearity *3		±0.05% F.S. (40 to 50 mm)	±0.1% F.S. (40 to 50 mm)	±0.05% F.S. (65 to 100 mm)	±0.1% F.S. (65 to 100 mm)
Temperature characteristic *4		0.02% F.S./°C			
Ambient illumination		Incandescent lamp: 10,000 lx max. (on light receiving side)			
Ambient temperature		Operating: 0 to 50 °C, Storage: -15 to 70 °C (with no icing or condensation)			
Ambient humidity		Operating and storage: 35% to 85% (with no condensation)			
Dielectric strength		1,000 VAC, 50/60 Hz for 1 min.			
Vibration resistance (destruction)		10 to 150 Hz, 0.7-mm double amplitude, 80 min. each in X, Y, and Z directions			
Shock resistance (destruction)		300 m/s ² 3 times each in six directions (up/down, left/right, forward/backward)			
Degree of protection		IEC60529, IP67			
Connection method		Connector connection (standard cable length: 500 mm)			
Weight (packed state)		Approx. 160 g (main unit only: Approx. 75 g)			
Materials		Case and cover: PBT (polybutylene terephthalate), Optical window: Glass, Internal thread: Brass, Cable: PVC			
Accessories		Instruction sheet, Ferrite core ×1 (made by TDK Corp. ZCAT1730-0730A), Laser warning label (English), FDA			

Regular-reflective Sensor Head

Item	Model	ZX2-LD50V
Optical system		Regular reflective
Light source (wave length)		Visible-light semiconductor laser with a wavelength of 660 nm and an output of 0.24 mW max. EN class 1, FDA class 1 *5
Measurement center point		48mm
Measurement range		±5mm
Beam shape		Spot
Beam size *1		Approx. 60 μm dia.
Resolution *2		1.5 μm
Linearity *3		±0.3%F.S. (entire range)
Temperature characteristic *4		0.06%F.S./°C
Ambient illumination		Incandescent lamp: 10,000lx max. (on light receiving side)
Ambient temperature		Operating: 0 to 50 °C, Storage: -15 to 70 °C (with no icing or condensation)
Ambient humidity		Operating and storage: 35% to 85% (with no condensation)
Dielectric strength		1,000 VAC, 50/60 Hz for 1 minute
Vibration resistance (destruction)		10 to 150 Hz, 0.7-mm double amplitude, 80 minutes, each in X, Y, and Z directions
Shock resistance (destruction)		300 m/s ² 3 times each in six directions (up/down, left/right, forward/backward)
Degree of protection		IEC 60529, IP67
Connection method		Connector connection (standard cable length: 500 mm)
Weight (packed state)		Approx.160g (Sensor Head only: Approx.75g)
Materials		Case and cover: PBT (polybutylene terephthalate), Optical window: Glass, Internal thread: Brass, Cable: PVC
Accessories		Instruction sheet, Ferrite core ×1 (made by TDK Corp. ZCAT1730-0730A), Laser warning label (English), FDA

Note: False detection outside the measurement range can occur in the case of an object with high reflectance.

- *1. Beam size: Defined as $1/e^2$ (13.5 %) of the center optical intensity at the minimum value of the measurement range (effective value).
False detections can occur in the case there is light leakage outside the defined region and the surroundings of the target object have a high reflectance in comparison to the target object. Correct measurements may not be obtained if the workpiece is smaller than the beam size.
- *2. Resolution: indicates the degree of fluctuation (±3σ) of analog output when connected to the ZX2-LDA.
(The measured value is given for the center distance for OMRON's standard target object (diffuse-reflective models: white ceramic object, regular-reflective models: 1/4 λ flat mirror) when the response time of the ZX2-LDA is set to 128 ms.)
Indicates the repetition accuracy for when the workpiece is in a state of rest. Not an indication of distance accuracy.
Resolution performance may not be satisfied in a strong electromagnetic field.
- *3. Linearity: indicates the error with respect to the ideal straight line of the displacement output in the case of measuring Omron's standard target object. Linearity and measured value may vary depending on target object.
F.S. indicates the full scope of the measurement range. (ZX2-LD50(L): 20 mm)
- *4. Temperature characteristic: Value for the case the space between the sensor head and Omron's standard target object is secured by an aluminum jig. (Measured at the measurement center distance)
- *5. These Sensors are classified as Class 2 laser devices for diffuse-reflective models and Class 1 for regular-reflective models under EN 60825-1 and the regulations of Laser Notice No. 50 for FDA certification. CDRH registration has been completed.

2 (2)

ZX2

Amplifier Units

Item	Model	ZX2-LDA11	ZX2-LDA41
Measurement period *1		Min. 30 μ s	
Response time		80 μ s, 120 μ s, 240 μ s, 500 μ s, 1 ms, 2 ms, 4 ms, 8 ms, 12 ms, 20 ms, 36 ms, 66 ms, 128 ms, 250 ms, 500ms	
Analog output *2		4 to 20 mA, Max. load resistance: 300 Ω ±5 VDC or 1 to 5 VDC, Output impedance: 100 Ω	
Judgement outputs (HIGH/PASS/LOW: 3 outputs), error output		NPN open-collector outputs, 30 VDC, 50 mA max. (residual voltage: 1 V max. for load current 10 mA max., 2V max. for load current above 10 mA)	PNP open-collector outputs, 30 VDC, 50 mA max. (residual voltage: 1 V max. for load current 10 mA max., 2 V max. for load current above 10 mA)
Laser OFF input, zero reset input, timing input, reset input, bank input		ON: Short-circuited with 0-V terminal or 1.2 V or less OFF: Open (leakage current: 0.1 mA max.)	ON: Supply voltage short-circuited or supply voltage within -1.2 V OFF: Open (leakage current: 0.1 mA max.)
Functions		Smart tuning, scaling, sample hold, peak hold, bottom hold, peak-to-peak hold, self-peak hold, self-bottom hold, average hold, zero reset, On-delay timer, OFF-delay timer, keep/clamp switch, (A-B) calculations *3, thickness calculation *3, mutual interference prevention *3, laser deterioration detection, bank function (4 banks), differential function	
Indications		Judgement indicators: HIGH (orange), PASS (green), LOW (orange), 11-segment main display (red), 11-segment sub-display (orange), laser ON (green), zero reset (green), enable (green), menu (green), HIGH threshold (orange), LOW threshold (orange)	
Power supply voltage		10 to 30 VDC, including 10% ripple (p-p)	
Power consumption		3,000 mW max. (at 24 VDC: 125 mA max., at 12 VDC: 250 mA max.)	
Ambient temperature		Operating: 0 to 50 °C, Storage: -15 to 70 °C (with no icing or condensation)	
Ambient humidity		Operating and storage: 35% to 85% (with no condensation)	
Dielectric strength		1,000 VAC, 50/60 Hz for 1 min.	
Vibration resistance (destruction)		10 to 150 Hz, 0.7-mm double amplitude, 80 min. each in X, Y, and Z directions	
Shock resistance (destruction)		300 m/s ² 3 times each in six directions (up/down, left/right, forward/backward)	
Degree of protection		IEC60529, IP40	
Connection method		Prewired (standard cable length: 2 m)	
Weight (packed state)		Approx. 200 g (main unit only: Approx. 135 g)	
Materials		Case: PBT (polybutylene terephthalate), Cover: Polycarbonate, Display: Methacrylic resin, Button: Polyacetal, Cable: PVC	
Accessories		Instruction sheet	

*1. In the case of Omron's standard target object (white ceramic)

*2. Select current output (4 to 20 mA) and voltage output (±5V or 1 to 5V) by MENU mode.

*3. Calculating unit (ZX2-CAL) is necessary. Calculations are possible for up to two amplifier units. Mutual interference prevention is possible for up to five amplifier units.

Calculating Unit

Item	Model	ZX2-CAL
Applicable Amplifier Units		ZX2-LDA11, ZX2-LDA41
Current consumption		12 mA max. (supplied from the Smart Sensor Amplifier Unit)
Ambient temperature		Operating: 0 to +50°C, storage: -15 to +70°C (with no icing or condensation)
Ambient humidity		Operating and storage: 35% to 85% (with no condensation)
Connection method		Connector
Dielectric strength		1,000 VAC, 50/60 Hz for 1 minute
Vibration resistance (destruction)		10 to 150 Hz, 0.7-mm double amplitude, 80 minutes, each in X, Y, and Z directions
Shock resistance (destruction)		300 m/s ² 3 times each in six directions (up/down, left/right, forward/backward)
Materials		Case: ABS, Display: Methacrylic resin
Weight (packed state)		Approx. 50g (Calculating Unit only: Approx. 15g)
Accessories		Instruction sheet

ZX2-series Communications Interface Unit

Item	Model	ZX2-SF11
Power supply voltage		10 to 30 V DC ±10% (including 10% ripple (p-p)) (Supplied from Sensor Amplifier.)
Power consumption		720 mW max. (at 24 V: 30 mA max., at 12 V: 60 mA max.) (Not including Sensor Amplifier current consumption or output current)
Applicable Amplifier Units		ZX2-LDA: T1 (Production after November 2013)
Applicable Amplifier Unit versions		Sensor Amplifier Unit version: V1.330 or higher (The Sensor Amplifier version is shown on the sub-digital display when the power of the Sensor Amplifier is turned ON.)
Max. No. of Amplifier Units		5
Communications functions	Port	RS-232C (9-pin, D-Sub connector)
	Communications method	Full duplex
	Synchronization method	Start/stop synchronization
	Transmission code	ASCII
	Baud rate	38,400 (at shipping)/9,600 bps switchable
	Data bit length	8 bits
	Parity check	None
	Stop bit length	1 bit
Data delimiter	Receiving	CR or CR + LF is automatically recognized.
	Sending	CR + LF fixed
Indicators		Power supply: green, Sensor communications: green, Sensor communications error: red, External terminal communications: green, External terminal communications error: red
Protective circuits		Power supply reverse polarity protection
Ambient temperature		Operating: 0 to 50°C, storage: -15 to 60°C (with no icing or condensation)
Ambient humidity		Operating and storage: 35% to 85% (with no condensation)
Insulation resistance		20 M Ω min. (at 500 VDC)
Dielectric strength		1,000 VAC, 50/60 Hz for 1 min., Leakage current: 10 mA max.
Materials		Case: PBT (polybutylene terephthalate), Cover: Polycarbonate
Accessories		Instruction sheet, 2 clamps

Liite 3. Temposonics EP2-magnetostriktiivisen anturin datalehti

1 (2)

(MTS Sensors 2018, 2–3)

Temposonics® EP2 Analog
Data Sheet

MEASURING TECHNOLOGY

The absolute, linear position sensors provided by MTS Sensors rely on the company's proprietary Temposonics® magnetostrictive technology, which can determine position with a high level of precision and robustness. Each Temposonics® position sensor consists of a ferromagnetic waveguide, a position magnet, a strain pulse converter and supporting electronics. The magnet, connected to the object in motion in the application, generates a magnetic field at its location on the waveguide. A short current pulse is applied to the waveguide. This creates a momentary radial magnetic field and torsional strain on the waveguide. The momentary interaction of the magnetic fields releases a torsional strain pulse that propagates the length of the waveguide. When the ultrasonic wave reaches the end of the waveguide it is converted into an electrical signal. Since the speed of the ultrasonic wave in the waveguide is precisely known, the time required to receive the return signal can be converted into a linear position measurement with both high accuracy and repeatability.

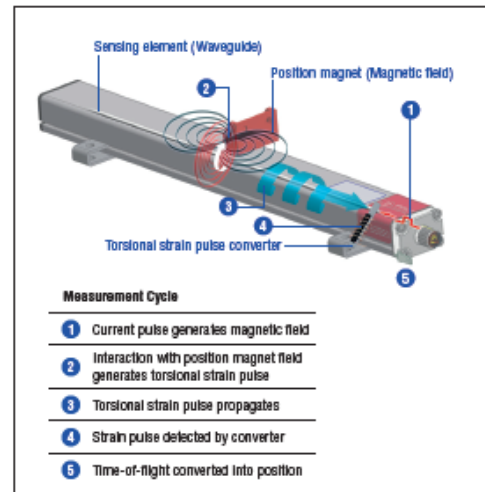


Fig. 1: Time-of-flight based magnetostrictive position sensing principle

EP2 SENSOR

Robust, non-contact and wear free, the Temposonics® linear position sensor provide high durability and precise position measurement feedback in harsh industrial environments. Measurement accuracy is tightly controlled by the quality of the waveguide manufactured exclusively by MTS Sensors.

The compact and smooth aluminum profile offers flexible mounting options and easy installation. Moreover, the position magnet can travel along the entire flat housing profile. The EP2 has an attractive price- / performance ratio and is ideal for industrial applications including plastics molding and processing, factory automation and packaging.



Fig. 2: Plastic granulate for injection molding or extrusion

TECHNICAL DATA

Output	
Voltage	0...10 VDC or 10...0 VDC, 0...10 VDC and 10...0 VDC (controller input resistance RL: > 5 kΩ)
Current	4...20 mA or 20...4 mA (minimum / maximum load: 0 / 500 Ω)
Measured value	Position, option: Multi-position measurement with a maximum of 2 magnets
Measurement parameters	
Resolution	Infinite
Cycle time	Typ. 0.3 ms < t < 2 ms (depending on stroke lengths)
Linearity	≤ ±0.02 % F.S. (minimum ±90 μm)
Repeatability	≤ ±0.005 % F.S. (minimum ±20 μm)
Operating conditions	
Operating temperature	-40...+75 °C (-40...+167 °F)
Humidity	90 % rel. humidity, no condensation
Ingress protection ^{1,2}	IP67 (if mating cable connector is correctly fitted)
Shock test	100 g (single shock) IEC standard 60068-2-27
Vibration test	8 g / 10...2000 Hz IEC standard 60068-2-6 (resonance frequencies excluded)
EMC test	Electromagnetic emission according to EN 61000-6-3 Electromagnetic immunity according to EN 61000-6-2 The sensor meets the requirements of the EC directives and is marked with CE .
Magnet movement velocity	Any
Design / Material	
Sensor lid	Zinc die-cast
Sensor profile	Aluminum
Stroke length	50...2540 mm (2...100 in.)
Mechanical mounting	
Mounting position	Any
Mounting instruction	Please consult the technical drawings and the brief instructions (document number: 551684)
Electrical connection	
Connection type	M12 (5 pin) male connector
Operating voltage	+24 VDC (-15 / +20 %); UL recognition requires an approved power supply with energy limitation (UL 61010-1), or Class 2 rating according to the National Electrical Code (USA) / Canadian Electrical Code.
Ripple	≤ 0.28 V _{pp}
Current consumption	50...140 mA
Dielectric strength	500 VDC (DC ground to machine ground)
Polarity protection	Up to -30 VDC
Overvoltage protection	Up to 36 VDC

1/ The IP rating is not part of the UL recognition

2/ The IP rating IP67 is only valid for the sensors electronics housing, as water and dust can get inside the profile.

Liite 4. SICK UM12-ultraäänianturin datalehti

1 (2)

(SICK 2020, 2–3)

UM12-1172261 | UM12
 ULTRASONIC SENSORS


Ordering information

Type	Part no.
UM12-1172261	6053544

Other models and accessories → www.sick.com/UM12

Detailed technical data

Mechanics/electronics

Supply voltage V_s	DC 10 V ... 30 V ¹⁾
Power consumption	≤ 1.2 W ²⁾
Initialization time	< 300 ms
Design	Cylindrical
Housing material	Metal (nickel-plated brass, PBT) Ultrasonic transducer: polyurethane foam, glass epoxy resin
Thread size	M12 x 1
Connection type	Male connector, M12, 4-pin
Indication	2 x LED
Weight	15 g
Sending axis	Straight
Dimensions (W x H x D)	12 mm x 12 mm x 60.1 mm
Enclosure rating	IP65 / IP67
Protection class	III

¹⁾ Limit values, reverse-polarity protected Operation in short-circuit protected network: max. 8 A, class 2.²⁾ Without load.

Performance

Operating range, limiting range	20 mm ... 150 mm, 250 mm
Target	Natural objects
Resolution	≥ 0.089 mm
Repeatability	± 0.15 % ¹⁾
Accuracy	± 1 % ¹⁾
Temperature compensation	✓
Response time	24 ms ²⁾
Output time	8 ms

¹⁾ Referring to current measurement value.²⁾ Subsequent smoothing of the analog output, depending on the application, may increase the response time by up to 200 %.³⁾ Functions may vary depending on sensor type.

UM12-1172261 | UM12

ULTRASONIC SENSORS

Ultrasonic frequency (typical)	380 kHz
Additional function	Teach-in of analog output, Invertable analog output, reset to factory default ³⁾

¹⁾ Referring to current measurement value.

²⁾ Subsequent smoothing of the analog output, depending on the application, may increase the response time by up to 200 %.

³⁾ Functions may vary depending on sensor type.

Interfaces

Analog output	
Number	1
Type	Current output
Current	4 mA ... 20 mA, $\leq 500 \Omega$ ¹⁾
Resolution	12 bit

¹⁾ For 4 mA ... 20 mA and $V_s \leq 20$ V max. load $\leq 100 \Omega$.

Ambient data

Ambient temperature operation	-25 °C ... +70 °C
Ambient storage temperature	-40 °C ... +85 °C

Classifications

ECl@ss 5.0	27270804
ECl@ss 5.1.4	27270804
ECl@ss 6.0	27270804
ECl@ss 6.2	27270804
ECl@ss 7.0	27270804
ECl@ss 8.0	27270804
ECl@ss 8.1	27270804
ECl@ss 9.0	27270804
ECl@ss 10.0	27270804
ECl@ss 11.0	27270804
ETIM 5.0	EC001846
ETIM 6.0	EC001846
ETIM 7.0	EC001846
UNSPSC 16.0901	41111960

Liite 5. Megatron MBH-lineaaripotentiometrini datalehti

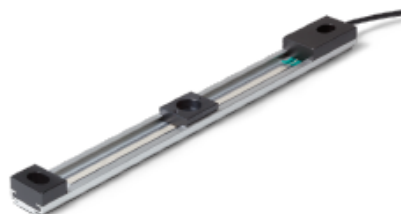
(Megatron 2019, 1)

Data Sheet for Linear Sensors



Potentiometric Linear Transducer

Series MBH



The Series MBH is used in applications that need a hermetically sealed sensor element. The sensor technology is based on an encapsulated foil-potentiometer.

- Hermetically encapsulated sensor element
- Sealed round cable outlet
- Flat design
- Integrated end stops
- Protection class IP45
- 3 million slider movements

There are various applications for the linear potentiometer series MBH with environmental exposure to water and humidity, like filling level meters, adjustment of operation tables or position control of diagnostics or therapy appliances.

Electrical Data	
Effective electrical travel 1.)	100 ±0,3 mm (optional 50, 200, 300, 400, 500 mm)
Total resistance 1.)	2,5 kOhm
Resistance tolerance	±20 %
Independent linearity (best straight line) 1.)	±2 % (90% effective electrical travel)
Theoretical resolution 1.)	Almost infinite
Max. / recommended wiper current1.)	1 mA (@ 40°C, 1 min in case of failure) / 0,1 µA
Power rating	≤ 0,25 W

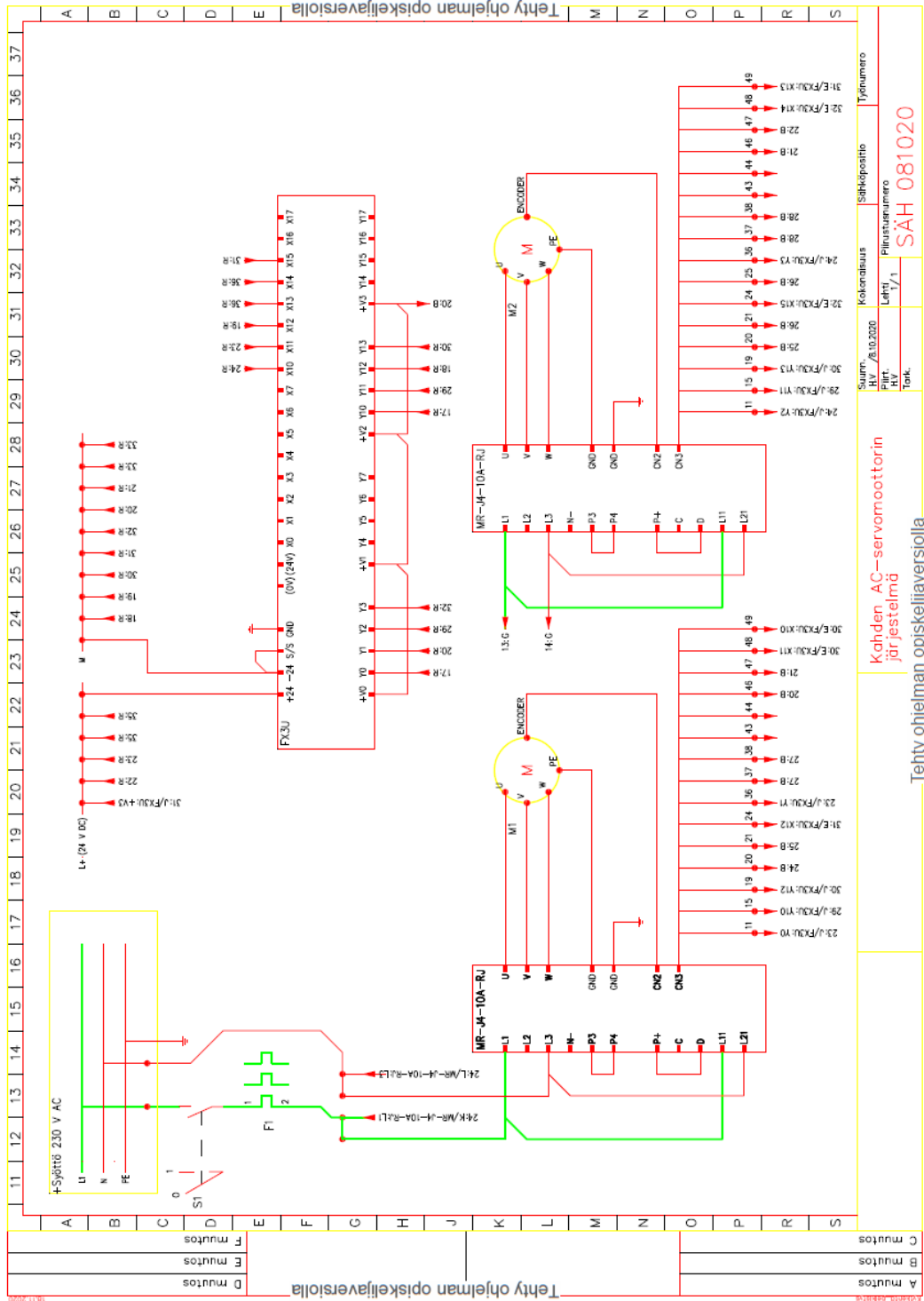
Mechanical Data, Environmental Conditions, Miscellaneous	
Mechanical stroke 1.)	> 95 mm
Lifetime (90% effective electrical travel) 2.)	3 Mio. movements
Max. operational speed	< 3 m/s
Operational force (@ RT 1.) 2.)	< 1 N
End stop force	< 20 N
Operational temperature	-25...+55°C
Storage temperature	-30...+60°C
Protection grade (IEC60529)	IP45
Sensor length	200 mm
Max. permissible perpendicular load on the slider	< 1 N
Mass	about 110 g
Mounting parts (not included in delivery)	For example: Screws M5 ISO7380
Fastening torque of the screws	<150 Ncm
Materials	Plastic, Aluminium

1.) According IEC 60393

2.) Determined by climatic conditions according to IEC 68-1, para. 5.3.1 without load collectives

Please note: Max. permissible supply voltage ≤42 VDC respectively ≤42 VAC in addition the max. power rating must be observed

Liite 6. Havainnollistava ja pelkistetty kytkentäkaavio laitteiston tilasta prosessi-kehityksen alussa



Suunn. / H.V. /8.10.2020		Kokonaissumma	Sähköpostiosoite	Tehtynumero
Pääsuunnittelija / Tark.		Lehti / 1	Piirustusnumero	
		SAH 081020		
Kahden AC-servomoottorin järjestelmä				
Tehty ohjelman opiskelijaversiolla				

2-akselisen AC-servojärjestelmän liikkeenhallinta ja häiriökompensointi

Virran kytkentä

Järjestelmä käyttää päävirtana yksivaiheista 230 V AC 50 Hz verkkovirtaa, joka saadaan kaapelilla W3. Järjestelmään kytketään virta laitteiston takaa löytyvällä päävirtakytkimellä. Kun päävirta on kytketty, PLC:n, HMI:n sekä antureiden käyttöjännite voidaan kytkeä 24 V DC teholahteesta.

Servovahvistimet käynnistetään painikkeella "System Start" ja voidaan sammuttaa joko hätäseiskytkimellä tai päävirtakytkimellä. Ongelmatilanteessa, jossa servovahvistimet tai 24 V DC teholähde ei saa päävirtaa tai virta katkeaa kesken operoinnin, tulee tarkistaa vikavirtasuojakytkimet F1 ja F2, jotka löytyvät laitteiston kyljessä sijaitsevasta kytkentäkaapista. Painonapit "M1 Option" tai "M2 Option" eivät ole käytössä.

HMI:n operointi

Aina HMI:n käynnistyessä aloitetaan päävalikosta "MAIN". Valikosta valitaan haluttu alavalikko, joita ovat "Manuaaliajo", "Koordinaattiajo" sekä "Parametrit".

Järjestelmän käynnistyessä kummankin moottorin lukitus ("servo lock") on automaattisesti päällä. Ennen kunkin moottorin ajoa lukitus tulee poistaa painikkeilla "Servo Lock ON/OFF" joko manuaaliajo- tai koordinaattiajo-valikosta.

Manuaaliajolla kumpaakin moottoria ajetaan erikseen. Suunta ilmaistaan painikkeilla "Ylös" ja "Alas" sekä "Vasen" ja "Oikea". Kummallekin moottorille asetetaan erikseen nopeus taajuutena (Hz) ja se syötetään nimettyyn kenttään. Taajuuden maksimi on 100 kHz ja suuremman arvon syöttäminen on estetty. Suuremman taajuuden syöttö voi vaurioittaa PLC:tä.

Koordinaattiajossa liikkeen aktivointi suoritetaan painikkeella ”Ajo asemaan”. Haluttu koordinaatti syötetään nimettyyn kenttään. Koordinaatin minimi- ja maksimiarvot ovat esitetty ja minimiä pienempien sekä maksimia suurempien arvojen syöttö on estetty.

Sekä manuaaliajo- että koordinaattiajo-valikossa esitetään aktiivinen sijainti XY-koordinaattina, jossa lukeman yksikkö on millimetri (mm). Lisäksi molemmissa valikoissa esitetään häiriötieto millimetreinä, missä nollataso on jousi-massa-vaihtimen tasapainoasema.

Sijainnin kalibrointi

Sijainti tulee kalibroida seuraavissa tilanteissa:

- PLC:n käynnistys
- PLC:n ohjelma päivitetään
- raja-anturit suorittavat kuorman pakkopysäytyksen

Jos raja-anturit suorittavat kuorman pakkopysäytyksen, esitetään käyttäjälle sijainnin kalibrointikehote sekä manuaaliajo- että koordinaattiajo-valikossa.

Sijainti kalibroidaan ”Kotiasema” painikkeella. Kun aktiivinen koordinaatti on nolattu, on kotiasemaan ajo suoritettu ja ollaan origossa. Kotiasemaa indikoi kummallakin akselilla olevat keskimmäiset induktiiviset lähestymiskytkimet. Häiriötilassa, jossa kotiasemaa ei saavuteta, voidaan kotiasemaan ajo suorittaa uudelleen.

Vikatila

Mikäli liikkeenhallinassa havaitaan vikatila, esimerkiksi pystyakselin moottori ei reagoi ohjaukseen, voidaan moottorin tila nollata ”Reset”-painikkeilla.

Parametrit

Parametrit-valikossa voidaan aktivoida ja asettaa kiihdytys- ja hidastusajat. Koordinaattiajossa kiihdytys- ja hidastusajat ovat aina käytössä. Manuaaliajoon kiihdytys- ja hidastusajat aktivoidaan ”ON/OFF” painikkeella.

PLC Read/Write

Ohjelman luku tai kirjoitus tapahtuu Ethernetin välityksellä, ja kaapeli kytketään Ethernet-kytkimeen. PLC:n IP-osoite on 192.168.50.21. Yhteyden aikaansaamiseksi tulee PC:n IP asettaa samaan verkkoon: Ohjauspaneeli > Verkko ja Internet > Verkko- ja jakamiskeskus > Muuta sovittimen asetuksia > Ethernet (tai muu verkkokortti) oikea klikkaus > Ominaisuudet > valitse Verkko -välilehdeltä Internet Protocol Version 4 (TCP/IPv4) ja avaa Ominaisuudet. IP-osoitteeksi tulee asettaa 192.168.50.xx (ei sama kuin muilla järjestelmän laitteilla), aliverkon peitteeksi 255.255.255.0. Oletusyhdykäytävä ja DNS-osoitteet jätetään tyhjäksi. Klikkaa OK. (Windows 10)

Ohjelmaa luettaessa GX Works2:lla avaa tyhjä projekti. Valitse "Online"-valikosta "Read from PLC". Valitse "FXCPU" (FX3U-logiikalla) ja paina OK. Aukeaa "Transfer Setup" valikko, jossa tulee määrittää "PC side I/F" ja "PLC side I/F". PC side I/F:ksi asetetaan "Ethernet Board" ja PLC side I/F:ksi "Ethernet Module". Tuplaklikkaamalla Ethernet Module -kuvaketta aukeaa IP-kenttä, johon syötetään PLC:n IP. Paina OK. Syötetty IP näkyy Transfer Setup valikon "IP Address / Host Name" kentässä. Transfer Setup valikossa voit testata yhteyden "Connection Test" painikkeella. Muutokset hyväksytään ja valikosta poistutaan painamalla OK.

Jo olemassa olevalla projektitiedostolla tulee yhteys tarkistaa. "Navigation" sivupalkista avataan välilehti "Connection Destination", jolla näkyy määritetyt yhteydet. Tuplaklikkaamalla määritettyä yhteyttä (esim. "Connection1") aukeaa Transfer Setup valikko. Tarkista PC ja PLC side I/F, IP Address / Host Name -kenttä sekä testaa yhteys. Korjaa tarvittaessa. Paina OK. Jos Connection Destination välilehdellä ei ole luotuja yhteyksiä, luo uusi yhteys yllä mainittujen ohjeiden mukaisesti painamalla "Add New Data" painiketta.

Kun yhteys on luotu, voi ohjelman ladata PLC:lle. Aseta PLC "STOP" tilaan PLC:n etupaneelin kytkimellä, valitse Online valikosta "Write to PLC". "Read / Write / Verify" valinnan ollessa Write, valitse ladattavat tiedot ("Select All") ja paina "Execute" ja seuraa ohjeita.

HMI Read/Write

Ohjelman lukemiseksi avaa uusi projekti ("New") ja valitse ohjauslaitteeksi ("Controller Systems") "FX3U Ethernet". "Operator Terminal" kannattaa pitää oletuksena (Landscape 1.2x), sillä ladattavan projektin tulee vastata luodun projektin kuvasuhdetta näkyäkseen oikein. Avaa "Project Manager" näkymästä "Network Connections" ja tuplaklikkaa "TCP/IP connection 1" (yhteyden oletusnimi). Aseta IP 192.168.50.41, Subnet mask 255.255.255.0. Loput jätetään oletusarvoiksi. Paina OK. Valitse "Transfer" valikosta "Project", paina "Receive" ja seuraa ohjeita.

Jo olemassa oleva projekti ladataan saman Transfer valikon kautta painamalla painiketta "Send".

Liite 8. DC-servomootorin ja jousi-massa-vaimentimen muodostama järjestelmä MATLAB Simulink-mallina

