



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Sebastian Piironen

# Maa-ajoneuvon trukkihaarukan vaaitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

30.9.2019

Tekijä Otsikko	Sebastian Piironen Maa-ajoneuvon trukkihaarukan vaaitus
Sivumäärä Aika	21 sivua + 3 liitettä 30.9.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Päänsinööri Heikki Järvi Lehtori Heikki Paavilainen
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin maa-ajoneuvon trukkihaarukan vaaitusohjelma, sekä tähän liittyen anturipidike trukkihaarukkaan tulevaan anturiin. Työ tehtiin Rakkatec oy:n tilauksesta.</p> <p>Työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa toimiva vaaitus maa-ajoneuvon asennettuihin eurosovitteisiin trukkihaarukoihin. Maa-ajoneuvon asennetun trukkihaarukan täytyi myös olla helposti vaihdettavissa moduulin nostimeen.</p> <p>Toteutuksessa hyödynnettiin maa-ajoneuvon valmiiksi asennettuja antureita, sekä toisenä logiikkana toimivaa TEC132:sta.</p>	
Avainsanat	PID-säädin, vaaitus, kulma-anturi

Author Title Number of Pages Date	Sebastian Piironen Balancing the Lifting Fork of a Ground Vehicle 21 pages + 3 appendices 30 September 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Heikki Järvi, Head Engineer Heikki Paavilainen, Senior Lecturer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to design a balancing program for a ground vehicle lifting forks. In addition, a sensor holder was designed for the lifting fork's magnet sensor. The study was commissioned by Rakkatec Oy.</p> <p>The purpose of the thesis was to design and create a well-working balancing system for lifting forks that are mounted on ground vehicles. Furthermore, in the design process it was taken into account that the lifting fork installed on a ground vehicle must also be easily replaced by a module lifting device if necessary.</p> <p>In conclusion, the vehicle's preinstalled sensors and the secondary control system TEC132 were utilized in the implementation phase.</p>	
Keywords	PID-controller, balancing, angle sensor,

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Laitteiston rakenne	1
2.1	Yleistä	1
2.2	Anturit	1
2.2.1	Magneettianturi	1
2.2.2	Kallistusanturi	2
2.2.3	LPMS-CU Gyro	3
2.3	Logiikka TEC132	4
2.4	CAN-väylä	4
2.5	PID-säädin	4
2.6	Säätimen virittäminen	6
2.7	Parametrien vaikutus	6
3	Tasausjärjestelmän suunnittelu	7
3.1	Anturin pidike	7
3.2	CODESYS	9
3.3	Kytkenät	9
3.4	Hydrauliikka	11
3.5	Liikeradat	11
4	Ohjelma	12
4.1	Ohjelman toiminta PI-säätimellä	12
4.2	Ohjelman toiminta P-säätimellä	14
4.3	Ohjelman kulku	15
5	Testaaminen	16
6	Yhteenveto	19
	Lähteet	21

## Liitteet

Liite 1. P-säätimen ohjelma

Liite 2. PI-säätimen ohjelma

Liite 3. Hydraulikkakaavio

## Lyhenteet

CAN	<i>Controller Area Network</i> , automaatiiväylä tiedonsiirtoon
I/O	<i>Input/Output</i> , sisääntulo / ulostulo
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> , mikrosysteemi
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative-regulator</i> , proportionaali-integroiva-derivoiva -säädin
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> , ohjelmoitava logiikkaohjain
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteitten liittämiseksi

## 1 Johdanto

Tämä insinööri työ tehtiin Rakkatec OY:lle. Työn tarkoituksena oli suunnitella maa-ajoneuvolle asennettuun eurosovitteiseen trukkihaarukkaan tasaus. Tasauksen tarkoituksena on saada puomia nostettaessa tai laskiessa pitämään trukkihaarukka halutussa kulmassa, tällöin lastinkäsittely on vakaampaa ja helpompaa.

Tasaus on toteutettu ohjelmallisesti sähköisellä ohjauksella, joka on kustannustehokas ja riittävän tarkka ratkaisu kyseistä kokoonpanoa ja etenkin laitteen muokattavuutta ajatellen.

## 2 Laitteiston rakenne

### 2.1 Yleistä

Maa-ajoneuvoa ohjataan kaukosäätöisesti Hetronic-kauko-ohjaimella, joka lähettää komennot radiotaajuuksien avulla ajoneuvolle asennettuun yksikköönsä. Yksiköstä lähetetään edelleen viestit CAN-väylää (*Controller Area Network*) eli tiedon siirtoon tarkoitettua automaatiöväylää pitkin ajoneuvon kahteen logiikkaan, jotka ohjaavat kaikkia ajoneuvon toimintoja. Työssä hyödynnettiin ajoneuvossa valmiiksi asennettuja antureita sekä logiikoita.

### 2.2 Anturit

#### 2.2.1 Magneettianturi

Trukkihaarukkaan on asennettu Honeywell RTP180HVEAA -magneettianturi (kuva1), joka toimii Hall-ilmiöllä. Anturi on analoginen, ja sen lähtöpotti on lineaarinen 0.5 ja 4.5 V:n välillä. Anturi mittausalue on 180 astetta ja käyttöjännitteenä toimii 10–30 volttia. [1.]

Anturi on pitkäikäinen, sillä se toimii koskettamattomasti ja on tästä johtuen hyvin immuuni lialle, eri sääolosuhteille ja värähtelyille.

Hall-anturi mittaa magneettikentän suuruutta, ja sen toiminta perustuu johtimen reunojen välillä olevaan jännite-eron, jonka aiheuttaa johtimen elektroneihin kohtisuorassa vaikuttava magneettikenttä. [2.]

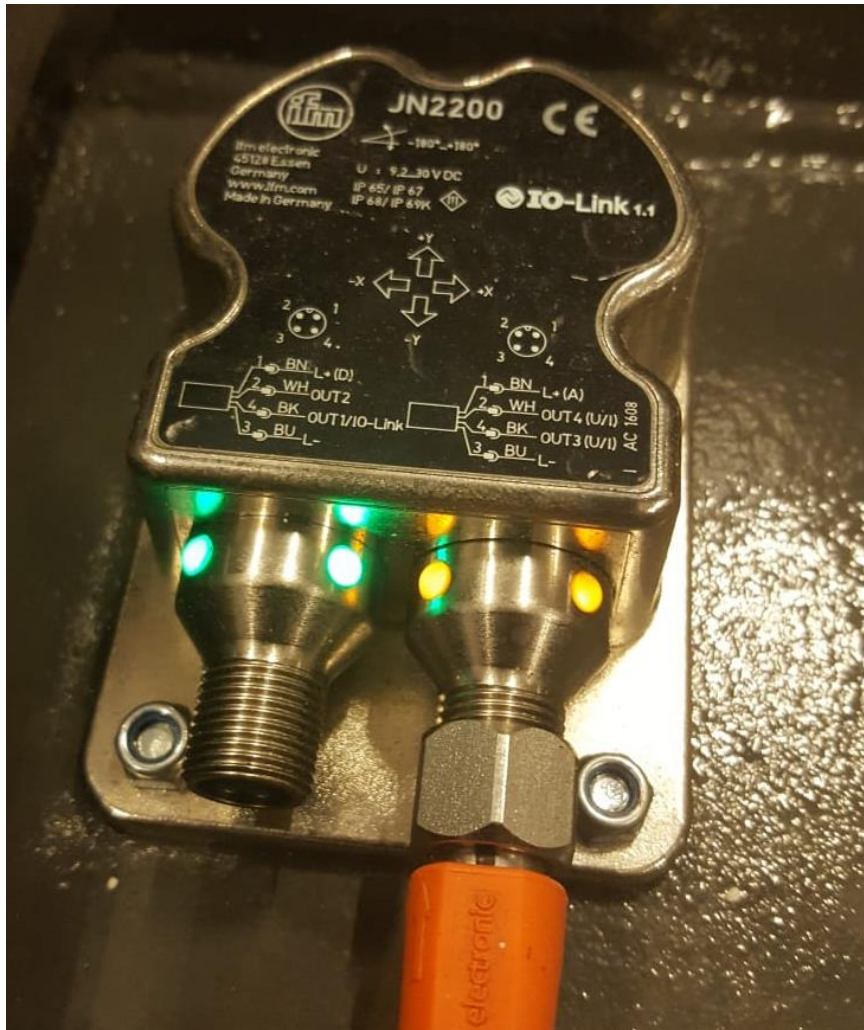


Kuva 1. Trukkihaarukkaan asennettava magneettianturi.

### 2.2.2 Kallistusanturi

Puomiin on asennettu kuvan 2 kaltainen IFM JN22000 -kallistusanturi. Anturi on ohjelmoitu käyttämään analogista 2–10 V:n signaalia, mittausperiaate MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) eli mikrosysteemi kapasitiivinen. Se mittaa kallistusta kahden akselin suunnassa maahan nähden, ja näistä tässä työssä on käytetty vain pituussuuntaista kallistuksen mittausta. [3.]





Kuva 2. Puomin kallistusanturi.

### 2.2.3 LPMS-CU Gyro

Gyroskooppi pitää sisällään kolme eri MEMS-anturia, jotka mittaavat kolmen akselin suhteen. Anturi liitetään CAN tai USB (*Universal Serial Bus*) -väylään, joissa tässä tapauksessa liittimenä on käytössä USB-väylä. Anturi pitää sisällään seuraavat anturit: [4.]

- gyroskooppianturi
- kiihtyvyyssanturi
- magneettometri.

### 2.3 Logiikka TEC132

Trukkihaarukoita ohjaavana logiikkana toimii Technionin valmistama TEC132 -logiikka. Logiikka on suunniteltu työkoneille käytettäväksi erityisesti orjalogiikaksi, jonka etuina on muun muassa kustannustehokkuus, lähtöjen monipuolisuus, IP67 Luokitus ja CAN-väylän tuki. [5.]

Logiikka rakentuu teholähteestä, keskusyksiköstä, I/O (*Input/Output*) -porteista eli tulo- ja lähtömoduuleista, sekä muisteista. Logiikan sovelluskehitystyökaluna toimii CODESYS 2.3. [5.]

### 2.4 CAN-väylä

CAN-väylä on automaatioväylä, mitä käytetään erityisesti ajoneuvoissa ja teollisuuslaitteissa. CAN-väylässä kaikki tieto välitetään kaikille moduuleille ja moduuli päättää, kuuluuko kyseinen tieto moduulille vai ei. Tämä mahdollistaa tiedon toimittamisen samaan aikaan monelle eri moduulille. [6.]

Väylään lähteviä tietoja pystyy myös priorisoimaan sanomatunnisteen avulla, jolloin pienemmän prioriteetin saanut luopuu lähettämisestä ja jää odottamaan, kunnes väylä vapautuu. Väylä on myös virheensietokykyinen, yhden viestin epäonnistuminen ei kaada koko viestijärjestelmää. [6.]

CAN-väylä mahdollistaa tehokkaan viestinnän logiikkojen ja komponenttien välillä käyttäen CAN Open -protokollaa, jolloin ylimääräisten johdotusten tarve poistuu.

### 2.5 PID-säädin

PID säädin eli *Proportional- integral -derivative* (suhde- integroiva -derivoiva) on yleisin säätöalgoritmi teollisuuden käytössä. Rakenteeltaan säädin on yksinkertainen ja toimii myös häiriö ja epävarmuustekijöitä sisältävissä piireissä. [10.]

PID-säätimen erilaisia yhdistelmiä ovat P-, PI-, PD- tai PID-säätimet, näistä yleisin säädinrakenne on PI-säädin ja harvinaisin PD-säädin. Säädin koostuu seuraavista osista:

- P-osa, suhdetermi
- I-osa, integroiva termi
- D-osa, derivoiva termi.

Suhteellinen termi kuvaa erotuksen suuruutta asetuksen ja sisääntulosuuren väliltä ja on suoraan verrannollinen näiden suhteeseen. Suureen kasvattaminen liian suureksi saa aikaan prosessissa värähtelyjä ja epästabiilisuutta. Suhteellinen säätö ei pysty yksinään tasoittamaan säätövirhettä kokonaan. Säätövirhe on sitä pienempi, mitä suurempi on vahvistuskerroin  $K_p$ . Kaavassa (1)  $K_p$  on säätimen vahvistus. [9, s. 35–37,10.]

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

Integroiva termi osoittaa, suureen poissaoloajan halutusta asetusarvosta. Integroiva säätö integroi tai summaa syntyneen virheen. Säätimen pienikin ero suure kasvattaa säätimen kasvua, kunnes virhe on nolla. Integroiva säätö poistaa P-säädöstä jäävän asentovirheen kokonaan. Integrointiajan asettaminen liian pieneksi aiheuttaa järjestelmään epästabiilisuutta. Kaavassa (2)  $T_i$  on integrointiaika sekunteina. [9, s. 38–39,10.]

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (2)$$

Derivoiva termi osoittaa virhesuureen muutosnopeutta. Derivointisäätöä käytetään järjestelmän vakauden ja asettumisajan parantamiseksi. Derivointitermi  $T_d$  kuvaa derivointivahvistusta. Kaavassa (3)  $T_d$  on derivointiaika sekunteina. [9, s. 40,10.]

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

## 2.6 Säätimen virittäminen

PID-säätimen virittämisellä tarkoituksena on löytää PID-säätimen parametreille eli vahvistukselle, intrigointiajalle ja derivointiajalle mahdollisimman ideaaliset arvot, jotta asetusarvo pystyttäisiin saavuttamaan mahdollisimman tehokkaasti ja tarkasti. Säädössä tulisi ottaa huomioon myös erilaisen kuormituksen muutokset ja mahdolliset pienet mitaushäiriöt. [7 s. 43.]

Säädintä voidaan virittää esimerkiksi seuraavilla menetelmillä:

- manuaalinen menetelmä
- Ziegler – Nichols-menetelmä
- Cohen- Coon-menetelmä
- Lambda-menetelmä
- kuollut aika -menetelmä.

## 2.7 Parametrien vaikutus

Taulukosta 1 havaitaan parametrien vaikutus nousu-aikaan, ylitykseen ja stabiilisuuteen.

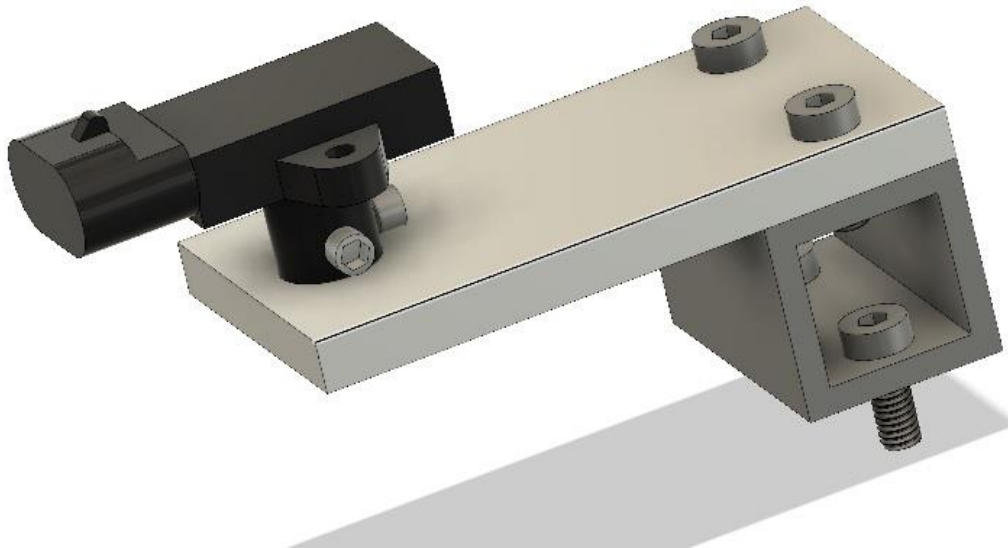
Taulukko 1. Parametrien vaikutus

Parametrin kasvaessa	Nousuaika	Ylitys	Stabiilisuus
<b>KP</b>	pienentyy	suurenee	huonontuu
<b>KI</b>	pienentyy	suurenee	huonontuu
<b>KD</b>	kasvaa	pienenee	paranee

### 3 Tasausjärjestelmän suunnittelu

#### 3.1 Anturin pidike

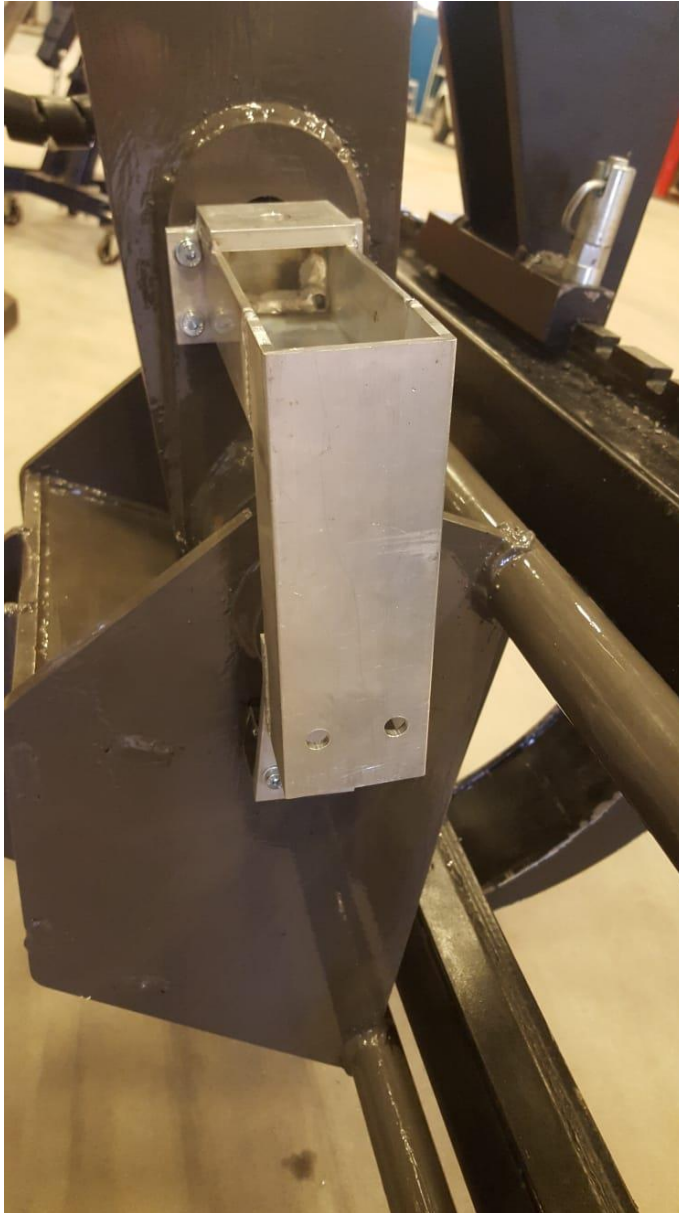
Trukkihaarukkaan on asennettu kuvan 3 mukainen pidike magneetille. Magneetin kiinnitysrunkona toimii ruostumattomasta teräksestä valmistettu 8 mm:n pultti, jonka pyöriminen auki värähtelyjen seurauksina on estetty jousilaatalla. Itse magneetti kiinnittyy 8 mm:in pulttiin kahdella ei ferromagneettisella 4 mm:n kuusiokolopultilla. Pidike on asennettu koneen runkoon kahdella 6 mm halkaisijaltaan olevalla pultilla.



Kuva 3. magneetin pidike

Magneettianturi on asennettu pidikkeen avulla akselin ulkopuolelle, jotta sille saataisiin aikaiseksi pyörimisliike akselille trukkihaarukkaan asennetun magneettinsa suhteen. Pidike kiinnitetään runkoon neljällä 6 mm halkaisijaltaan olevilla kuusiokolopulteilla.

Anturin pidike on valmistettu u-alumiiniprofiilista, sillä Honeywell -magneettianturi on herkkä ferromagneettisille metalleille ja vaatiikin vähintään 10 mm:n etäisyyden näihin. Kuvassa 4 näkyy anturipidikkeen kokoonpano kiinnitettynä ajoneuvon trukkihaarukan runkoon.



Kuva 4. Trukkihaarukan magneettianturin pidike.

### 3.2 CODESYS

CODESYS- ohjelmisto on laitteitten ohjelmointiin tarkoitettu IEC 61131 -standardin mukainen ohjelmistoympäristö, joka on laitteistorippumaton. CODESYS tukee standardin IEC 61131 mukaisia seuraavia ohjelmointikieliä: [7, 2–9.]

- Instruction List (IL), käskylista tekstipohjainen ohjelmointikieli, komennot suoritetaan yksi kerrallaan allekkain [7, s. 2-9]
- Structured Text (ST), rakenteellinen teksti [7, s. 2-11]
- Ladder Diagram (LD), tikapuukaavio [7, s. 2-22]
- Funktion Block Diagram (FBD), toimilohkokaavio [7, s. 2-21]
- Sequential Function Chart (SFC), vuokaaviokieli [7, s. 2-16].

Tässä insinööriyössä on käytetty ST -ohjelmointikieltä, sillä alkuperäinen koodi oli lähes kokonaisuudessaan kirjoitettu tällä ohjelmointikielellä, joten oli luonnollisempaa ja selkeämpää jatkaa samaisella ohjelmointikielellä.

### 3.3 Kytkenät

Trukkihaarukan magneettianturi on kytketty TEC132:n sisääntuloporttiin x2-16. Portti on skaalattu lukemaan arvoja 0-10 V:n välillä. Käyttöjännitteen magneettianturi ottaa yhteisestä lähdöstä muiden antureiden kanssa. Maadoitus on myös hoidettu TEC132:n maadoituspisteeseen, jolloin anturin virransyöttö on vikasietoisempi mahdollisille jännitepiikkihäiriöille. Anturi ottaa käyttöjännitteensä TEC132 logiikan lähtöportin kautta ja se on reguloitu 24 V.



Sisääntuloportti x2-16 aiheuttaa jostakin syystä ylikuulumista x2-17 porttiin eli sama jännite arvo siirtyy myös porttiin x2-17. Käyttäessä pelkästään x2-17 sisääntuloporttia TEC132 ei ilmoita tälle portille mitään arvoa, vaikka portin tyyppi on identtinen portin x2-16 kanssa, kuten taulukosta 2 ilmenee. Molempien porttien ollessa kytkemättä seuraavat sisääntulot myös samaa häiriökohina-arvoa välillä 0–4 mV.

Taulukko 2.Porttien tyypit [8].

Connector A – TYCO AMPSEAL 776231-1 BLACK					
Pin	Dir	Function(s)	Group	Notes	
X2 1	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.1, DI <sub>H</sub> .1, AI <sub>10V</sub> .1, AI <sub>27V</sub> .1, DO <sub>L</sub> .1	I/O#1	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 2	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.1, DI <sub>H</sub> .1, AI <sub>10V</sub> .1, AI <sub>27V</sub> .1	I/O#1	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 3	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.1, DI <sub>H</sub> .1, AI <sub>10V</sub> .1, AI <sub>27V</sub> .1	I/O#1	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 4	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 5	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 6	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 7	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 8	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 9	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 10	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 11	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 12	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 13	GND	IO GND			
X2 14	I	AI <sub>5V</sub> .2, AI <sub>10V</sub> .2, DI <sub>H</sub> .3	I#3		
X2 15	I	AI <sub>5V</sub> .2, AI <sub>10V</sub> .2, DI <sub>H</sub> .3	I#3		
X2 16	I	AI <sub>5V</sub> .2, AI <sub>10V</sub> .2, DI <sub>H</sub> .3	I#3		
X2 17	I	AI <sub>5V</sub> .2, AI <sub>10V</sub> .2, DI <sub>H</sub> .3	I#3		
X2 18	I	AI <sub>5V</sub> .2, AI <sub>10V</sub> .2, DI <sub>H</sub> .3	I#3		
X2 19	I	AI <sub>5V</sub> .2, AI <sub>10V</sub> .2, DI <sub>H</sub> .3	I#3		
X2 20	I	AI <sub>5V</sub> .2, AI <sub>10V</sub> .2, DI <sub>H</sub> .3	I#3		
X2 21	I	AI <sub>5V</sub> .2, AI <sub>10V</sub> .2, DI <sub>H</sub> .3	I#3		
X2 22	O	VREF <sub>5V</sub> .1, VREF <sub>10V</sub> .1	O#4		
X2 23	O	VREF <sub>5V</sub> .1, VREF <sub>10V</sub> .1	O#4		
X2 24	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.1, DI <sub>H</sub> .1, AI <sub>10V</sub> .1, AI <sub>27V</sub> .1, DO <sub>L</sub> .1	I/O#1	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 25	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.1, DI <sub>H</sub> .1, AI <sub>10V</sub> .1, AI <sub>27V</sub> .1	I/O#1	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 26	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.1, DI <sub>H</sub> .1, AI <sub>10V</sub> .1, AI <sub>27V</sub> .1	I/O#1	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 27	O	AO <sub>10V</sub> .1	O#5		
X2 28	GND	IO GND			
X2 29	GND	IO GND			
X2 30	GND	IO GND			
X2 31	GND	IO GND			
X2 32	GND	IO GND			
X2 33	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 34	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	
X2 35	I/O	DO <sub>H</sub> 3A5.2, DI <sub>H</sub> .2	I/O#2	Input voltage must be ≤ VBAT in all cases	



### 3.4 Hydraulikka

Maa-ajoneuvoon asennettuja trukkipiikkejä ohjataan Hetric -kauko-ohjaimella, joka välittää oman vastaanottimensa kautta viestit CAN-väylää pitkin logiikalla. Logiikka ohjaa proportionaaliventtiin keloja virtaviestinä, jolloin venttiin päästäessä läpi tilavuusvirtaa alkavat hydraulikkasylinterit toimia.

Trukkihaarukan kallistuksen ohjaukseen käytetään proportionaaliventtiin toista puolta ja kaksitoimisen hydraulikkasylinterin toiminta suuntaa ohjataan tämän proportionaaliventtiin perään asennetulla suuntaventtiilillä, joka määrää kumpaan suuntaan hydraulikkasylinteriä ohjataan. Proportionaaliventtiilit ovat kuormantuntevia ja mahdollistaa portaattoman säädön tilavuusvirralle. Pelkistetty hydraulikkakaavio löytyy liitteestä 3.

### 3.5 Liikeradat

Eurosovitteisen trukkihaarukan liikealue on 0–91.1 astetta, ja sen nollakulma on määritetty trukkihaarukkaa ohjaavan sylinterin ollessa sisäänvedettynä, jolloin Honeywell -magneettianturi antaa jännitearvon 612 mV, joka vastaa asteissa 0 asteen kulmaa. Sylinterin taas ollessa täysin ulostyönnettynä magneettianturi antaa arvon 2589 mV, vastaten 91.1 asteen kulmaa.

Puomin liikealue on 0-155 astetta ja nollakulma on asetettu puomin sylinterin ollessa vedettynä sisään ja maksimikulma puomin sylinterin ollessa kokonaan ulostyönnettynä. Kuvassa 5 näkyvät osittain puomin sylinteri, sekä haarukan kallistusta ohjaava sylinteri.



Kuva 5. Trukkihaarukka ja puomin geometria.

## 4 Ohjelma

Ohjelman käynnistäminen vaatii Hetronic -kauko-ohjaimelta oikeaa käyttömoodia, eli haarukan ajovalinnan kytkemistä, sekä tämän jälkeen keskimmäisen painikkeen pitämistä pohjassa. Mikäli pääohjelma ei anna antureista johtuvia virheilmoituksia jatkaa se vaaitusohjelmaan. Painikkeen vapautettaessa, loppuu myös ohjelman suoritus välittömästi.

### 4.1 Ohjelman toiminta PI-säätimellä

Virheilmoitus annetaan äänimerkillä, mikäli puomin kulman tai trukkihaarukan kulman anturin tietoja ei ole jostain syystä saatavilla, jolloin vaaituskin on myös mahdotonta toteuttaa ilman kulmatietoja. Vaaitusohjelma aloittaa vaaituksen saman tien napin ollessa pohjaan painettuna, mikäli trukkihaarukan kulma on 0.1 ja 91 asteen välillä.

Mikäli puomin kulma on sellainen, että vaaitus ei ole mahdollista tehdä, ajaa ohjelma trukkihaarukan maksimi- tai minimikulmaansa riippuen siitä, mille puolelle vaaitus olisi tarkoitus tehdä. Puomin kulman jälleen tullessa vaaitusrajojensa sisäpuolelle, vaaitus käynnistyy uudelleen.

Vaaitus on toteutettu CODESYS 2.3 -kirjaston omalla PID-piirillä. PID -säätöpiiriä käytetään PI- säätöpiirinä, asettamalla derivaattamuuttuja nolaksi. Ulostulot on rajattu positiivisella puolella 100:aan ja negatiivisella puolella -100:aan. Ulostulon negatiivinen arvo muutetaan positiiviseksi ABS-komennolla ennen kuin se lähetetään eteenpäin ohjauskäskyksi.

Suuntaventtiilin suunta päätellään erotussuureesta, joka lasketaan seuraavalla kaavalla:

#### **Puominanturinkulma + Gyronkulma - Trukkihaarukankulma - Korjaus.**

Korjausarvo määrittää arvon, millä trukkihaarukka on 90 asteen kulmassa maahan nähden. Mikäli erosuure on negatiivinen, ajetaan haarukkaa ylöspäin ja erosuureen ollessa positiivinen alaspäin.

Vaaitusohjelman ollessa käynnissä ja mikäli puomille ei anneta ohjauskäskyä, tällöin ohjelmalla on käytössä hystereesi. Mikäli erosuureen ollessa -0.5 ja 0.5 asteen välillä suuntaventtiili suljetaan ja PI-säädin resetoidaan, myös proportionaaliventtiilin ohjausarvo on nolla. Yhden asteen kokoisella hystereesillä vältetään vaaituksen suorittua se, että trukkihaarukka lähtisi liikkumaan suuntaventtiilin vaihtaessa suuntaansa häiriöllisen ohjausarvon takia.

Annettaessa puomille jotain ohjausarvoa, vaaituksella ei ole käytössä kuollutta aluetta, vaan suuntaventtiiliä pyritään ohjamaan pääsääntöisesti vain yhteen suuntaan ja pitämään mahdollisuuksien mukaan suuntaventtiili koko ajan auki.

Riippuen tapauksesta negatiivinen tai positiivinen PI-ulostuloarvo ylikirjoitetaan nolaksi, mikäli ylitys on nollan ja kahden asteen välillä väärään suuntaan. Arvon mahdollisesti mennessä vielä enemmän väärään suuntaan sallitaan myös suunnanvaihto, jolloin yli

kahden asteen ylityksessä vaihdetaan suuntaventtiilin suunta ja PI-piirin ulostulon arvo jälleen sallitaan.

Pitämällä suuntaventtiilit jatkuvasti auki on pyritty tasaamaan tavoitearvoa lähestyttäessä töksähdykset ja tarpeettomat suunnanvaihdokset, mitkä pääsääntöisesti aiheuttavat koneelle lisää värähtelyä, jolloin ohjausarvo häiriintyy edelleen lisää. Etenkin mikäli puomilla on suuri tilavuusvirran tarve, samanaikainen suuntaventtiilin kiinnilaitto saattaa aiheuttaa tietyissä tilanteissa paineiskun järjestelmään.

PI-piirin ohjausarvoa on pyritty suodattamaan pyöristämällä arvo 0.1 asteen tarkkuuteen ja laskemalla kolmen vanhan arvon keskiarvo ennen näiden lähettämällä PI-säätimen sisääntuloon. Ohjelman yhden kierroksen suorittamisaika on noin 6 ms. Liitteessä 2 on PI-säätimen ohjelma.

#### 4.2 Ohjelman toiminta P-säätimellä

P-säätimen ohjelmakuvas perustuu hyvin samankaltaisena PI-säätimen toimintakuvaukseen. Säätimen ulostulon rajaukset, erosuureen laskenta ja keskiarvoistaminen ovat täysin samat kuin PI-säätimen ohjelmassa.

Poikkeuksena verrattuna PI-säätimeen P-säätimessä on koko ajan toiminnassa oleva hystereesi, jonka säätimen resetointiarvo on määritetty välille -0.5 ja 0.5. Suuntaventtiilit ovat määritetty sulkeutumaan -0.3 tai 0.3 rajojen sisällä. Liitteessä yksi on P-säätimen ohjelma.

#### 4.3 Ohjelman kulku

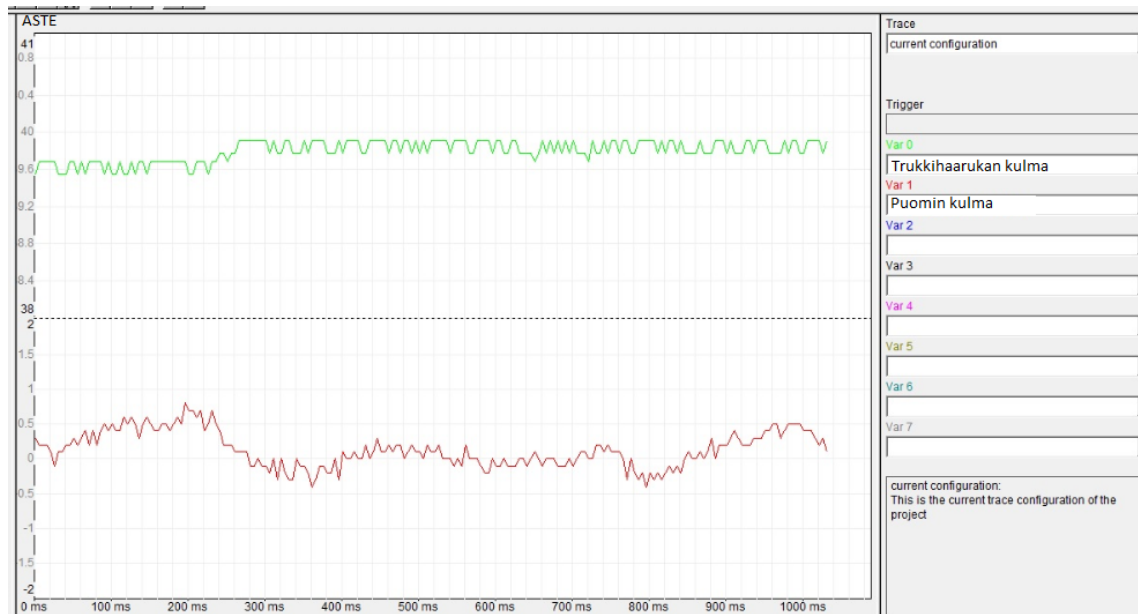
Ohjelman selkeytetty kulkutapa yhdistettynä P- ja PI-säätimestä on seuraavanlainen:

- käyttäjän käynnistys (alue + painikkeen pitäminen pohjassa)
- anturivirheitten tarkistus
- vertailu onko kulmien sisällä mahdollista suorittaa tasaus (puomin ja haarukka-anturin kulmista)
- keskiarvoistaminen (3 vanhaa arvoa)
- erosuureen laskeminen (anturin arvoista)
- P-säätö/ PI-säätö (hystereesi ja resetointi riippuvat kummalla säätimellä toteutettu)
- suuntaventtiilin suunnan päättelemineen (erosuureesta)
- trukkihaarukanliike.

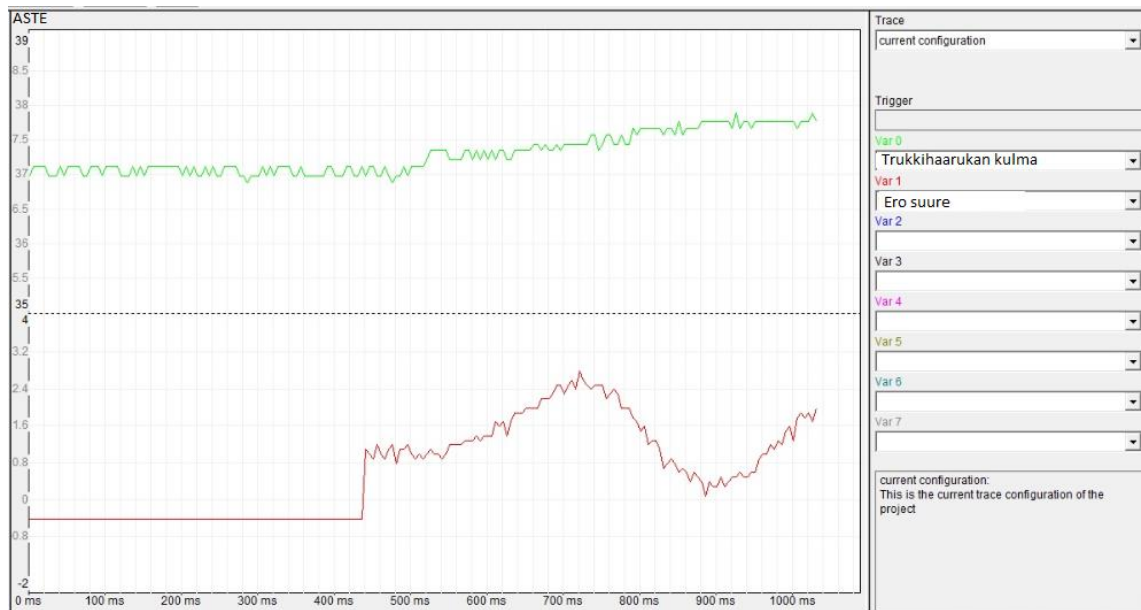
## 5 Testaaminen

Vaaitus hakee järkevästi paikkansa puomin ollessa paikallaan noin yhden asteen tarkkuuteen. Puomin ollessa liikkeessä etenkin puomin laskemissuunnassa, trukkihaarukan vaaitusnopeus tulee ongelmaksi ja vaaitus toimiikin järkevästi vain hitailla puomin nopeuksilla. Puomia nostaessa vaaitusnopeus on hiukan parempi.

Kuollut alue on määritetty yhden asteen kokoiseksi, koska erotussuureen virhearvo on noin 0.7 asteen luokkaa jo tyhjäkäynnillä (kuva 6). Puomin tai haarukan liikkeen pysähtyessä virhearvo kasvaa vielä enemmän juuri kriittisellä hetkellä, jolloin virhearvon pitäisi olla mahdollisimman pieni, että säätimen toiminta pysähtyisi järkevästi (kuva 7).



Kuva 6. Anturien kohina-arvot tyhjäkäynnillä.

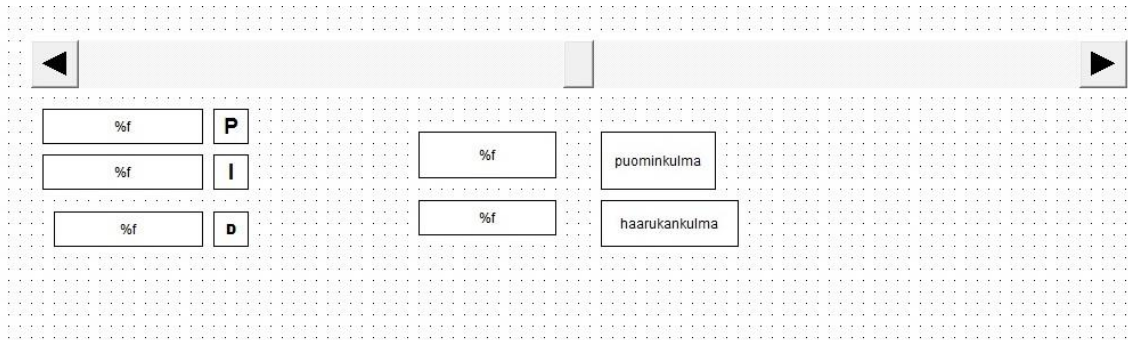


**Kuva 7. Erosuuren heittelehtiminen puomin juuri pysähtyessä.**

P-säädöllä puomin ja haarukan yhdistelmä toimi stabiilisti pienillä nopeuksilla, sillä pääsääntöisesti säätö oli aina myöhässä ja erosuure saattoikin kasvaa kohtuuttoman paljon. P-säätöinen piiri tarvitsi myöskin korkeita vahvistusarvoja toimiakseen.

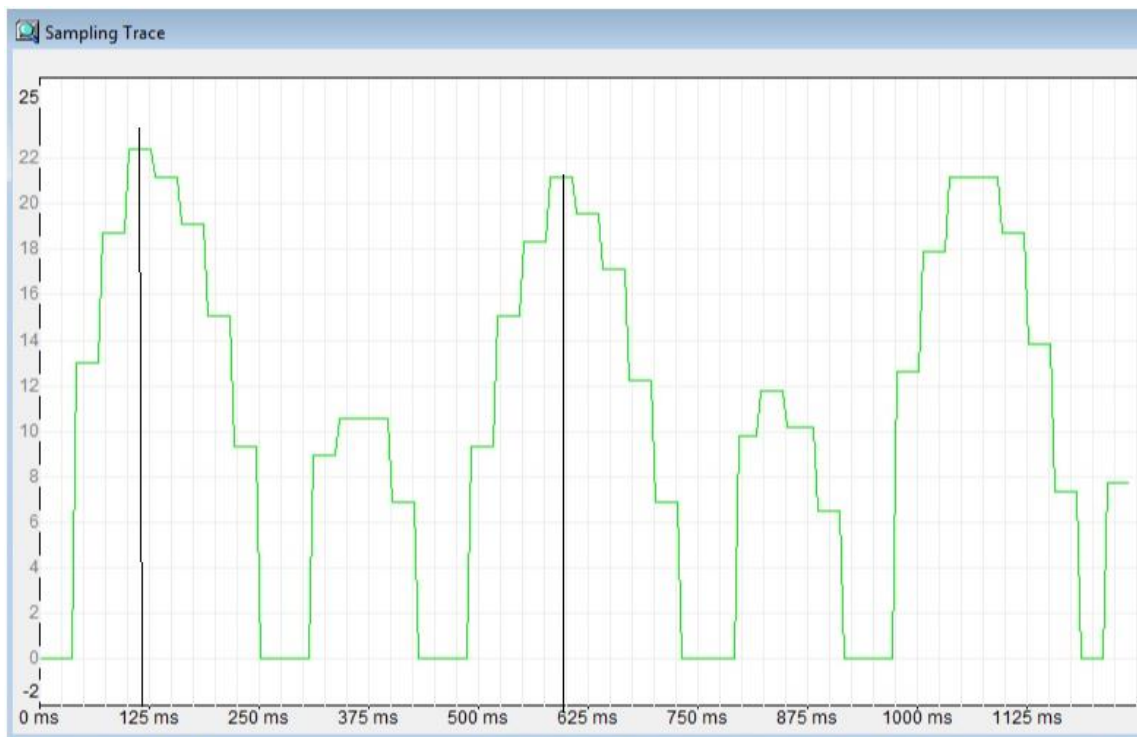
PI-säätö reagoi paremmin liikkeen muutoksiin kasvattamalla arvoa nopeasti, mikäli erosuure on pitkään ollut pois paikaltaan, mutta tietyillä hyvillä arvoilla vaaitus toimi hyvin tietyillä puomin kulma-alueilla, mutta puomin geometriasta johtuen joillakin alueilla käyttäytyminen muuttui enemmän tai vähemmän epästabiiliseksi.

Säätimen ideaalisia arvoja pyrittiin hakemaan manuaalisesti virittämällä kuvan 8 mukaisella säätöikkunalla, joka mahdollisti arvojen säätämisen lennosta.



Kuva 8. Säätimen viritysikkuna.

PI-säätimelle on suljetun piirin värähtelymetodilla saatu kriittiseksi kertoimeksi 12.170 ja kriittiseksi jakson ajaksi kuvan 9 mukaisesti 475 ms. Tästä on Ziegler – Nicholsin värähtelymenetelmän parametrien avulla saatu vahvistuskertoimeksi 7,302 ja integraaliajaksi 237,5 ms.



Kuva 9. PI-säätimen värähtely.



## 6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli saavuttaa mahdollisimman stabiili vaaitus trukkihaarukan kulmanohjaukseen, käyttäen mahdollisimman paljon hyödyksi aikaisemmin hankittuja laitteistoja ja osia.

Tällä kertaan tämä ei täysin onnistunut kokonaisuudessaan, sillä tavoitteen mukainen vaaitus toimi stabiilisti karkeasti, joko vaaituksen alueen puolesta välistä ylös- tai alaspäin, eikä täten koko alueella, johtuen osittain puomin liikeradan epäsymmetrisyyksistä, jolloin tietyissä kohtaa puomin liikenopeus suurenee kohtuuttomasti.

Tämä virhe voisi osittain korjaantua tekemällä puomin liikenopeudesta yksitoimisen, jolloin puomi hidastaisi tai nopeuttaisi liikenopeutta optimaalista käyrää seuraten, välttämättä käyttäjän antamasta nopeusarvosta. Tällöin ohjauksesta otettaisiin vain käyttäjän manuaalinen ohjausarvo, kuinka kauan nostoa tai laskua suoritetaan, tällä pystyttäisiin välttämään kaikkein kriittisimmät kohdat, missä trukkihaarukan liikenopeus ei tahdo pysyä perässä.

Suurimpana ongelmana vaaitusta tehdessä tuli puomissa olevan IFM JN22000-kallistusanturi häiriöherkkyys etenkin puominliikkeen loppuessa, jolloin sisääntulon häiriö saattoi paikoitellen olla jopa yli 3 asteen suuruista, tämä aiheutti ongelmia säätöpiirissä. Toisena ongelmana oli välillä myöskin itse ajoneuvon taipumus värähtelyyn venttiilien sulkeutuessa. Anturista johtuen myös hystereesi on jouduttu säätämään 1 asteen luokkaan, jotta vaaituksen suoritettua trukkihaarukka ei jäisi liikkumaan ja vaihtelevaan suuntaventtiin suuntaa.

Parhaimpana stabiiliutta ajatellen toimi yksinkertainen P-säädin korkealla vahvistuskerroimella ja puomin hitailla liikenopeuksilla. Huonona puolena tällä säätimellä oli erosuurteen kasvaminen vähän ennen puomin viimeistä kolmas osaa puomia laskiessa. PI-säädin reagoi taas paremmin liikenopeuksiin, mutta toimi järkevästi tietyillä parametreilla vain joko puominkulman puolivälistä ylös tai alaspäin.

Kehitysideoina voisi olla käyttäjän antama kulman arvo ja valinta, kumman suhteen vaaitus tehdään koneen vain maan suhteen. Kulman arvon antamalla kone ajaisi itse

suoraan parhaimmalla nopeudella halutulle korkeudelle pitäen käyttäjän määrittämän kulman.

IFM JN22000- kallistusanturi vaihtaminen myös vähemmän värähtelylle alttiiseen anturiin vähentäisi säätimelle syötettävän arvon virhettä huomattavasti, jolloin tarkempi anturitieto lisäisi stabiiliutta trukkihaarukan vaituksen toiminnalle etenkin vaituksen ollessa paikallaan.

## Lähteet

- 1 Honeywell. 2016. PDF-dokumentti. Hall-effect Rotary Position Sensors <<https://www.mouser.fi/datasheet/2/187/honeywell-sensing-rtv-series-rtp-series-datasheet--1228683.pdf>>. Luettu 21.4.2019.
- 2 Magneettiset. 2010. Verkkoaineisto. <<https://wiki.metropolia.fi/display/koneauto-maatio/Magneettiset>>. Luettu 4.6.2019.
- 3 IFM. 2016. Verkkodokumentti. JN2200. <<https://www.ifm.com/fi/fi/product/JN2200>>. Luettu 4.6.2019.
- 4 LP-RESEARCH. 2019. Verkkodokumentti. LPMS-CU. <<https://lp-research.com/lpms-cu/>>. Luettu 4.6.2019.
- 5 Technion. PDF-dokumentti. Controllers-tec122-tec132-brochure-en.pfd <<https://technion.fi/wp-content/uploads/controllers-tec122-tec132-brochure-en.pdf>>. Luettu 4.6.2019.
- 6 Siemens. 2015. PDF-dokumentti. Canopen Tutorial <[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/771/109479771/att\\_861905/v1/109479771\\_CANopen\\_Tutorial\\_V10\\_en.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/771/109479771/att_861905/v1/109479771_CANopen_Tutorial_V10_en.pdf)>. Luettu 4.6.2019.
- 7 COSDESYS. 2010. PDF-dokumentti. User Manual for PLC Programming with CoDeSys 2.3 <[http://marie-www.ee.pw.edu.pl/~purap/PLC/manuals/m07590333\\_00000000\\_1en.pdf](http://marie-www.ee.pw.edu.pl/~purap/PLC/manuals/m07590333_00000000_1en.pdf)>. Luettu 4.6.2019.
- 8 Technion. 2015. PDF-dokumentti. Technion Control Unit TEC132 Technical manual <<https://technion.fi/wp-content/uploads/tec132-technical-manual-v1.1.pdf>>. Luettu 4.6.2019
- 9 Sauvolainen Jari, Vaittinen Reijo. 2003. Sääntötekniikan perusteita. Saarijärvi 2003. Gummerus Kirjapaino Oy 5. painos.
- 10 Harju Timo, Marttinen Arto. Verkkoaineisto. Sääntötekniikan koulutusmateriaali <[https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1367/pid\\_kirja\\_1-1.pdf](https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1367/pid_kirja_1-1.pdf)>. Luettu 4.6.2019

## P-säätimen ohjelma

```
0001 Fork_Angle_Limit_Low := 0;
0002 Fork_Angle_Limit_High := 91.1;
0003 Fork_correction_add:=78.6;
0004
0005 IF Hooklift_boom_user_cmd > 0 THEN          (*Boom Load*)
0006     wBoomLoad := 1000;
0007     JoyCurve(IN :=ABS(Hooklift_boom_user_cmd), N:=3, P:= JoyCurveArray);;
0008
0009 ELSIF Hooklift_boom_user_cmd < 0 THEN        (*Boom UnLoad*)
0010     wBoomUnload := 1000;
0011     PID_FORK_AUTO();
0012     JoyCurve(IN :=ABS(Hooklift_boom_user_cmd), N:=3, P:= JoyCurveArray);
0013 END_IF
0014
0015
0016 actual_temp1 := (rHookliftAngleRelative-rFork_angle-Fork_correction_add);
0017
0018 loop_calculate:=loop_calculate+1;
0019 IF loop_calculate = 1 THEN
0020     avg_temp1:= actual_temp1;
0021 ELSIF loop_calculate =2 THEN
0022     avg_temp2:= actual_temp1;
0023 ELSIF loop_calculate = 3 THEN
0024     avg_temp3:= actual_temp1;
0025     loop_calculate:=0 ;
0026 END_IF
0027
0028
0029 actual_temp3:=REAL_TO_INT((avg_temp1+avg_temp2+avg_temp3)/3);
0030 actual_temp3:=actual_temp3*10;
0031 actual_temp:=INT_TO_REAL(actual_temp3)/10;
0032 actual:= actual_temp;
0033
0034 IF (rFork_Angle > Fork_Angle_Limit_Low AND actual < 0 ) THEN
0035     Pid_P_Value := 12;
0036     PID_FORK_AUTO();
0037 ELSIF ( rFork_Angle < Fork_Angle_Limit_High AND actual > 0) THEN
0038     Pid_P_Value := 12;
0039     PID_FORK_AUTO();
0040 END_IF
0041
0042
```

```
0001 * Pid values*)
0002 K_value:= Pid_P_value;
0003 I_value:= Pid_I_value;
0004 D_value:= Pid_D_value;
0005
0006 IF (actual < 0.5 AND actual > -0.5) THEN
0007     Pid_Reset:= TRUE;
0008 ELSE
0009     Pid_Reset:= FALSE;
0010 END_IF
0011
0012 PD_AUTO (
0013     ACTUAL:=actual ,
0014     SET_POINT:=0 ,
0015     KP:=Pid_P_value ,
0016     TV:=0 ,
0017     Y_MANUAL:= ,
0018     Y_OFFSET:= ,
0019     Y_MIN:=-100 ,
0020     Y_MAX:= 100,
0021     MANUAL:= ,
0022     RESET:=Pid_Reset ,
0023     Y=>PID_OUT ,
0024     LIMITS_ACTIVE=> );
0025 ;
0026
0027 IF actual > 0.3 THEN
0028     wForkDown := 1000;
0029 ELSIF actual < -0.3 THEN
0030     wForkUp := 1000;
0031 END_IF
0032
0033 PID_OUT := ABS (PID_OUT);
0034 Change_Out := REAL_TO_WORD(PID_OUT);
0035 wForkPWMRequest := Change_Out;
0036
```

## PI-säätimen ohjelma

```

0001 (* Pid values*)
0002 K_value:= Pid_P_value;
0003 L_value:= Pid_I_value;
0004 D_value:= Pid_D_value;
0005 Fork_correction_add:=78.6;
0006
0007 actual_temp1 := (HookliftAngleRelative-rFork_angle-Fork_correction_add);
0008
0009 loop_calculate:=loop_calculate+1;
0010 IF loop_calculate = 1 THEN
0011   avg_temp1:= actual_temp1;
0012 ELSIF loop_calculate =2 THEN
0013   avg_temp2:= actual_temp1;
0014 ELSIF loop_calculate = 3 THEN
0015   avg_temp3:= actual_temp1;
0016   loop_calculate:=0;
0017 END_IF
0018
0019 actual_temp3:=REAL_TO_INT((avg_temp1+avg_temp2+avg_temp3)/3);
0020 actual_temp3:=actual_temp3*10*
0021 actual_temp:=INT_TO_REAL(actual_temp3)/10;
0022 actual:= actual_temp;
0023
0024
0025 IF (actual < 0.5AND actual > -0.5) AND Hooklift_boom_user_cmd=0 THEN
0026   Pid_Reset= TRUE;
0027 ELSE
0028   Pid_Reset= FALSE;
0029 END_IF
0030
0031
0032 PID_AUTO(
0033   ACTUAL:=actual ,
0034   SET_POINT:= 0,
0035   KP:=K_value ,
0036   TN:=L_value ,
0037   TV:=Pid_D_value ,
0038   Y_MANUAL:= ,
0039   Y_OFFSET:= ,
0040   Y_MIN:=100 ,
0041   Y_MAX:=100 ,
0042   MANUAL:= ,
0043   RESET:=Pid_Reset,
0044   Y=> PID_OUT,
0045   LIMITS_ACTIVE=> ,
0046   OVERFLOW=> );
0047
0048
0049 IF Hooklift_boom_user_cmd= 0 THEN
0050   IF actual > 0.5 THEN
0051     wForkDown:= 1000;
0052   ELSIF actual < -0.5 THEN
0053     wForkUp:= 1000;
0054   END_IF
0055 END_IF
0056
0057 IF Hooklift_boom_user_cmd < 0 THEN
0058   IF actual < -2 THEN
0059     wForkDown:= 0;
0060     wForkUp:= 1000;
0061   ELSIF actual < 0 AND actual > -2 THEN
0062     PID_OUT:=0;
0063   ELSE
0064     wForkDown:= 1000;
0065   END_IF
0066 END_IF
0067 IF Hooklift_boom_user_cmd > 0 THEN
0068   IF actual > 2 THEN
0069     wForkUp:= 0;
0070     wForkDown:= 1000;
0071   ELSIF actual > 0 AND actual < 2 THEN
0072     PID_OUT:= 0 ;
0073   ELSE
0074     wForkUp:= 1000;
0075   END_IF
0076 END_IF
0077
0078 PID_OUT := ABS(PID_OUT);
0079 Change_Out := REAL_TO_WORD(PID_OUT);
0080 wForkPWMRequest:= Cchange_Out;

```

Hydrauliikkakaavio

