



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIIKKA JORMANAINEN  
DIESELMOOTTORIN KAASULÄPÄN OHJAUS

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Veli-Pekka Pyrhönen  
4. tammikuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**MIIKKA JORMANAINEN:** Dieselmoottorin kaasuläpän ohjaus

Throttle valve control in a diesel engine

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 29 sivua, 2 liitesivua

Tammikuu 2018

Automaatiotekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Systeemitekniikka

Tarkastaja: Veli-Pekka Pyrhönen

Avainsanat: Kaasuläppä, PID-säädin, moottorinohjaus, Simulink

Dieselmoottorin kaasuläppä on moottorin imuilmakanavassa oleva läppäventtiili. Kaasuläpällä voidaan hallita ilman määrää moottorin palotilassa ja pakokaasujen takaisinkierätyjärjestelmän toiminta-astetta rajoittamalla ilman virtausta moottorin imuilmakanavassa.

Tässä työssä määritellään, toteutetaan ja testataan kaasuläpälle säätö- ja kalibrointiohjelma Simulink-lohkokaavio-ohjelmistolla. Toteutuksen on tarkoitus korvata aiempi C-koodilla tehty ohjelma AGCO Powerin valmistamissa moottoreissa, ja siksi siitä tehdään mahdollisimman tarkasti vanhan toteutuksen korvaava – tarkkaan harkituin parannuksin. Tavoitteena on saavuttaa vähintään sama toiminnallisuus ja suorituskyky kuin aiemmalla toteutuksella ja parantaa sovelluksen ylläpidettävyyttä käyttämällä toteutukseen Simulink-ympäristöä.

Toteutetun ohjaussovelluksen testaus osoittaa, että käytettäessä samoja parametreja uusi ja vanha sovellus toimivat lähes identtisesti. Uuden toteutuksen testattavuus on myös huomattavasti parempi sisääntulosignaalien ohitusmahdollisuuden ansiosta. Uudessa sovelluksessa on lisäksi korjattu vanhasta toteutuksesta tunnistettu ongelma, joka mahdollisti vikatilanteessa ylijännitteen syöttämisen kaasuläpän moottorille.

Lisäksi tässä työssä toteutettiin ohjaussovelluksesta tehty testiversio, jolla tutkitaan kaasuläpän jousen vaikutuksen kumoamista säätimessä uudella yksinkertaisemmalla tavalla. Toteutettujen parannusten lisäksi esitetään muutamia muita parannusehdotuksia, joita ei kuitenkaan ollut tämän työn aikana mahdollista toteuttaa tai tutkia.

## **ALKUSANAT**

Tämä opinnäytetyö on tehty osana Tampereen teknillisen yliopiston kandidaatin tutkinto-ohjelmaa AGCO Power Oy:n tuotekehitysosastolle. Haluan kiittää ohjaajaani Veli-Pekka Pyrhöstä ja AGCO Power Oy:n Mikko Viinikaista, jotka tukivat ja ohjasivat minua kirjoitusprosessin aikana. Lisäksi haluan kiittää AGCO Powerin Jukka Parkkista, jonka kärsivällinen tuki opetellessani toteuttamaan moottorinohjauksen ohjelmistokomponenttia oli korvaamatonta.

Tampereella, 04.01.2018

Miikka Jormanainen

## SISÄLLYSLUETTELO

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | JOHDANTO .....  | 1  |
| 2 | KAASULÄPPÄ .....  | 2  |
|   | 2.1 Kaasuläppä dieselmootorissa .....                             | 2  |
|   | 2.2 Ohjattava kaasuläppä.....                                     | 3  |
|   | 2.2.1 Kaasuläpän vastavoimajousi .....                            | 4  |
|   | 2.2.2 Sonceboz 4256 -moottori .....                               | 6  |
| 3 | OHJAUSSOVELLUKSEN VAATIMUKSET .....                               | 7  |
|   | 3.1 Sovelluksen vaatimusmäärittely.....                           | 7  |
|   | 3.2 Yhteensopivuus muuhun moottorinohjausohjelmistoon.....        | 8  |
|   | 3.3 Muut vaatimukset.....   | 9  |
| 4 | TOTEUTUS .....  | 10 |
|   | 4.1 Käytetyt ohjelmistot .....                                    | 10 |
|   | 4.2 Sovelluksen rakenne.....                                      | 10 |
|   | 4.2.1 Säätö.....  | 11 |
|   | 4.2.2 Kalibrointisekvenssin tilakone .....                        | 14 |
|   | 4.3 Vaatimukset ylittävät parannukset .....                       | 15 |
|   | 4.3.1 Yksinkertaisempi jousikorjaus .....                         | 16 |
|   | 4.3.2 Järjestelmän käyttöjännitteestä riippuva oletusjännite..... | 17 |
| 5 | OHJAUSSOVELLUKSEN TESTAUS .....                                   | 18 |
|   | 5.1 Testaus simuloitulla toimilaitteella .....                    | 18 |
|   | 5.2 Testaus HIL-simulaattorilla.....                              | 21 |
| 6 | YHTEENVETO .....  | 26 |
|   | LÄHTEET .....   | 28 |

LIITE A: SIMULINK-MALLIT

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>AGCO</b>                      | kansainvälinen maatalouskoneiden valmistukseen keskittyvä konserni.  |
| <b>AGCO Power</b>                | AGCO:n tytäryhtiö, joka valmistaa pääasiassa dieselmoottoreita työkoneisiin.   |
| <b>Embedded Coder</b>            | Simulink ja MATLAB Coderien lisäosa, joka lisää niihin useita sulautettuja kohdealustoja.  |
| <b>HIL-simulaattori</b>          | Simulaattori, jossa on simuloitujen osien lisäksi hyödynnetty myös oikeita toimilaitteita (engl. Hardware-In-Loop simulator).  |
| <b>MathWorks</b>                 | yritys jonka päätuote on MATLAB-matriisilaskentaohjelmisto.  |
| <b>MATLAB</b>                    | erityisesti matriisilaskentaan kehitetty numeerisen laskennan ohjelmointikieli ja kehitysympäristö.  |
| <b>MATLAB Coder</b>              | MATLAB:n lisäosa C-koodin generointiin MATLAB-koodista.  |
| <b>mittakanava</b>               | (moottorinohjaus)ohjelmiston tuottama jotain sen sisäistä tilaa vastaava lukuarvo, jota jokin toinen ohjelmiston osa tai ulkopuolinen diagnostiikkaohjelmisto voi lukea ECU:n muistista.   |
| <b>moottorinohjain pakolinja</b> | tietokone, joka hallitsee polttomoottorin toimilaitteita. pakosarja, pakoputkisto ja niihin välittömästi kuuluvat osat kuten päästöjenkäsittelyjärjestelmät sekä turboahtimien turbiinit.  |
| <b>parametri</b>                 | moottorinohjausohjelmiston muuttuja, jolla määritetään jonkin ohjelmiston osan toiminta tai ominaisuus.  |
| <b>PID-säädin</b>                | säädin, joka tuottaa asetusarvon ja mittaussignaalin erosuureesta ohjaussignaalin, joka koostuu eroisuureesta kerrottuna vakiolla (proportionaalinen osuus, P), erosuureen aikaintegraalista (I) ja erosuureen aikaderivaatasta (D). |
| <b>Simulink</b>                  | MATLAB:n lisäosa lohkokaaviopohjaiseen mallintamiseen ja ohjelmointiin.  |
| <b>Simulink Coder</b>            | MATLAB:n ja Simulinkin lisäosa C-koodin generointiin Simulink- ja Stateflow-malleista.   |
| <b>Stateflow</b>                 | MATLAB:n lisäosa lohkokaaviopohjaiseen tilakoneiden ohjelmointiin.   |
| <b>Sonceboz</b>                  | työn kohteena olevien kaasuläppien moottorien valmistaja   |
| <b>Wahler</b>                    | työn kohteena olevien kaasuläppien valmistaja.   |

|                |  |
|----------------|--|
| <b>ECU</b>     | moottorinohjain, eli tietokone, joka hallitsee polttomoottorin toimilaitteita (englanniksi Engine Control Unit).   |
| <b>EGR</b>     | pakokaasujen takaisinkierätysjärjestelmä (englanniksi Exhaust Gas Recirculation).  |
| <b>DOC</b>     | dieselmoottorin hapetuskatalysaattori (englanniksi Diesel Oxidation Catalyst).   |
| <b>DPF</b>     | dieselmoottorin pienhiukkassuodatin (englanniksi Diesel Particulate Filter)  |
| <b>SCR</b>     | urearuiskutuskatalysaattori (englanniksi Selective Catalytic Reduction), eli keino moottorin typenoksidipäästöjen vähentämiseksi suihkuttamalla urealiuosta pakolinjassa olevaan katalysaattoriin. |
| $e$            | PID-säätimen erosuure  |
| $\theta$       | kaasuläpän läpän asento (kulma)  |
| $\theta_{max}$ | kaasuläpän asennon maksimiarvo   |
| $\theta_{min}$ | kaasuläpän asennon minimiarvo  |
| $F$            | voima  |
| $k$            | jousivakio   |
| $k_d$          | PID-säätimen derivointitermin vahvistuskerroin   |
| $k_i$          | PID-säätimen integrointitermin vahvistuskerroin  |
| $k_p$          | PID-säätimen vahvistuskerroin  |
| $M$            | kaasuläpän palautusjousen jousivoiman momentti   |
| $r$            | Kaasuläpän jousivoiman vaikutuspisteen etäisyys läpän akselilta  |
| $s$            | Laplace-muuttuja   |
| $T_i$          | PID-säätimen integrointitermin integrointiaika   |
| $T_d$          | PID-säätimen derivointitermin derivointiaika   |
| $u$            | PID-säätimen ohjaussuure, ulostulo   |
| $x$            | x-koordinaatti   |

# 1 JOHDANTO

Dieselmoottorin kaasuläppä on moottorin imuilmakanavaan sijoitettu läppäventtiili, jolla säädetään moottorin palotilaan tulevaa ilmamassavirtaa. Moderneissa moottoreissa kaasuläppää, kuten muitakin moottorin toimilaitteita, ohjataan ohjelmilla, joita suoritetaan moottorinohjaimella (engl. Engine Control Unit, ECU). Kaasuläpän ohjaus sisältää muulta moottorinohjaukselta saadun asetusarvon perusteella tehtävän läpän asentosäädön sekä ajoneuvon käynnistyksen yhteydessä suoritettavan asentomittauksen kalibrointisekvenssin, jolla varmistetaan säädön toiminta kaasuläpän likaantuessa tai sen mekaanisten ominaisuuksien muuttuessa.

Erityisesti tässä opinnäytetyössä toteutetaan kaasuläpän ohjaus AGCO Power oy:n valmistamia moottoreita varten. Ohjaussovellus toteutetaan siten, että se on integroitavissa muuhun AGCO Powerin moottorinohjausohjelmistoon, ja toimii AGCO Powerin moottoreissaan käyttämällä kaasuläpällä ja moottorinohjaimilla. Tarkoituksena on korvata nykyisissä moottoreissa aiemmin käytössä ollut C-kielellä toteutettu kaasuläpän ohjaus saavuttaen vähintään samat toiminnallisuudet.

Kaasuläpän ohjauksen tyydyttävä toiminta edellyttää sen sisältämien parametrien virittämistä kullekin käytetylle toimilaitteelle ja halutulle dynamiikalle erikseen, mutta tässä työssä keskitytään vain toimivan ohjaus- ja säätösovelluksen tuottamiseen sekä sen toiminnan varmistamiseen yleisellä tasolla. Tarkempi säädön virittäminen ja muu parametrisointi jätetään myöhempien käyttäjien tehtäväksi.

Toteutuksen lisäksi sovellusta testataan muuhun moottorinohjaukseen integroituna ja verrataan aiempaan toteutukseen. Integraatiotyö itsessään ei kuitenkaan ole osa tätä työtä. Testaus suoritetaan oikealla kaasuläpällä, oikealla moottorinohjaimella ja simuloitulla moottorilla. Työn konkreettiset vaiheet ovat siis vaatimusmäärittely, toteutus ja testaus.

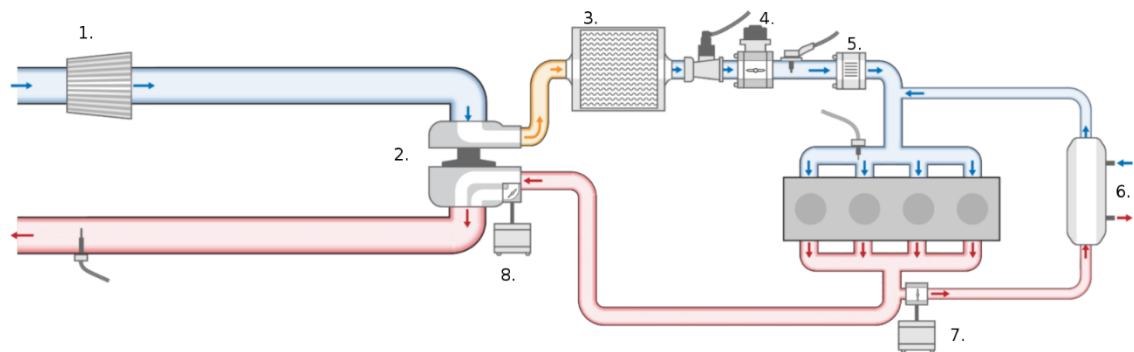
## 2 KAASULÄPPÄ

Dieselmootoreissa palotilaan tulevan seoksen polttoaine-ilmasuhteen ei tarvitse olla vakio, joten palotilaan tulevan ilman massavirtaa ei useinkaan tarvitse rajoittaa. Ilmavirran rajoittaminen kaasuläppällä kasvattaa moottorin pumppaushäviöitä heikentäen sen hyötysuhdetta [1], minkä takia dieselmootoreissa ei välttämättä ole kaasuläppää lainkaan.

Kaasuläppälle on kuitenkin muitakin käyttötarkoituksia, minkä takia monissa uusissa dieselmootoreissa sellainen on. Kaasuläppää voidaan käyttää esimerkiksi pakolinjan lämpötilan hallintaan [2 s. 216].

### 2.1 Kaasuläppä dieselmootorissa

Nykyinen lainsäädäntö [3] asettaa hyvin tiukat vaatimukset dieselmootorien päästöille. Rajat ovat erityisen tiukat ihmisille haitallisten pienhiukkasten ja typen oksidien osalta, minkä vuoksi moottorien valmistajat joutuvat käyttämään moottoreissaan monenlaisia päästöjen jälkikäsitelyjärjestelmiä, kuten esimerkiksi pakokaasujen takaisinkierätystä (engl. Exhaust Gas Recirculation, EGR). Kuvassa 1 on dieselmootorin ilma- ja pakokaasujärjestelmä, jossa pakokaasujen takaisinkierätysojärjestelmä on moottorin oikealla puolella oleva silmukka.



**Kuva 1.** Dieselmootorin ilma- ja pakokaasujärjestelmä. Kuvassa on ilmapuoli sinisellä ja keltaisella ja pakolinja punaisella. Numeroidut osat ovat 1. ilmanpuhdistin, 2. turbo, 3. välijäähdytin, 4. kaasuläppä, 5. imuilman lämmitin, 6. EGR-jäähdytin, 7. EGR-venttiili ja 8. hukkaportti. (Kuva käytössä AGCO Power Oy:n luvalla)

Pakokaasujen takaisinkierätyso, myöhemmin EGR, on yksinkertaistettuna moottorin imu- ja pakokanavat yhdistävä EGR-venttiilillä (kuva 1, osa 7) varustettu putki ja jäähdytin (osa 6). EGR:llä jolla voidaan johtaa osa pakokaasuista kiertämään jäähdytettynä uudestaan moottorin palotilan läpi alhaisilla moottorin kuormitusasteilla. Toimiakseen EGR edellyttää, että imuilmakanavassa on selkeästi alempi paine kuin pakokanavassa, jotta pakokaasut voisivat virrata oikeaan suuntaan paine-eron vaikutuksesta. Useissa



tilanteissa virtausta täytyy rajoittaa EGR-venttiilillä, jotta takaisinkiertävät pakokaasut eivät syrjäyttäisi liikaa ilmaa palotilaan tulevasta seoksesta. On kuitenkin tilanteita, joissa jopa EGR-venttiilin ollessa täysin auki on paine-ero liian pieni, ja siten takaisinkiertätys-suhde riittämätön. Paine-eroa voidaan tällöin edelleen kasvattaa rajoittamalla imuilmakanavan virtausta kaasuläpällä [4] (kuva 1, osa 4), jonka ohjausta tämä opinnäytetyö käsittelee.

EGR-järjestelmän lisäksi kaasuläppää voidaan dieselmoottorissa käyttää myös ahtopaineen hallintaan yhdessä hukkaportin (kuva 1, osa 8) kanssa [4] sekä pakolinjan lämpötilan hallintaan. Sekä ahtopaine että pakolinjan lämpötila täytyy moottorin käydessä pitää määrättyllä alueella, jotta erilaiset päästöjenkäsittelyjärjestelmät, kuten hapetuskatalysaattori ja urearuiskutus-katalysaattori (engl. Diesel Oxidation Catalyst – DOC ja Selective Catalytic Reduction – SCR) toimivat optimaalisesti.

## 2.2 Ohjattava kaasuläppä

Työn kohteena oleva kaasuläppä on tyyppilinen kaasun virtauksen rajoitukseen käytettävä läppäventtiili ja malliltaan dieselmoottorimallin mukaisesti joko Wahler 710451 tai 710452 (kuva 2). Eri malliversioiden tärkeimpänä erona on venttiilin halkaisija, joka on joko 55 tai 80 mm. Kumpikin toimilaite käyttää läpän asennon muuttamiseen Sonceboz - 4256 tasavirtamoottoria.



*Kuva 2. Wahler 710452 -kaasuläppä. Venttiilin metallinen runko on erilainen eri malleilla. Kaasuläpän yläosassa on musta muovikuorinen moottori Sonceboz 4256.*

Venttiilin läppä on jousikuormitettu siten, että jousi avaa venttiilin täysin auki, ellei moottori tuota läpän akselille tarpeeksi vääntöä kiinni-suuntaan. Mikäli läppää siis halutaan pitää paikallaan jossakin auki-asennosta poikkeavassa vakioasennossa, eli reguloida sen asentoa, tulee moottoria ohjata siten että se tuottaa jousen tuottamaan momenttiin nähden vastakkaismerkkisen ja yhtä suuren momentin.

### 2.2.1 Kaasuläpän vastavoimajousi

Kaasuläpän jousi tuottaa läppää kiertävän momentin, joka vastaa lineaarisen systeemin jousivoimaa

$$F = -kx, \quad (2.1)$$

jossa  $x$  on massan sijainnin poikkeama lepotilasta x-akselilla ja  $k$  jousivakio [5 s. 184]. Kaasuläpän tapauksessa jousivoima tuottaa siten läpän akselille momentin

$$M = -k\theta r, \quad (2.2)$$

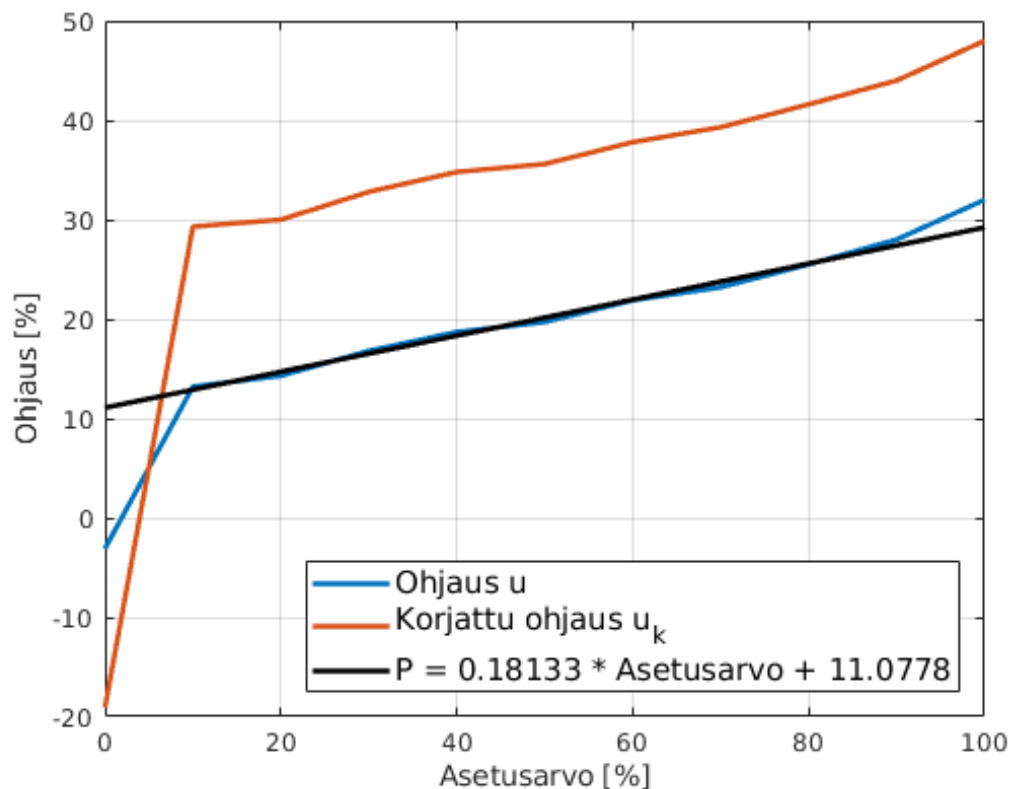
jossa  $r$  on jousivoiman vaikutuspisteen etäisyys kaasuläpän akselilta ja  $\theta$  läpän asento (kulma) [5 s. 303–304]. Jousivoiman momentin muutos kaasuläpän liikealueella on siten

$$\Delta M = -k\theta_{max}r + k\theta_{min}r, \quad (2.3)$$

jossa  $x_{max}$  ja  $x_{min}$  ovat liikealueen rajat.

Mikäli  $\theta_{max} - \theta_{min}$  on hyvin pieni verrattuna arvoon  $\theta_{min}$ , on jousivoiman momentin muutos liikealueella hyvin pieni. Kaasuläpän ohjauksen aiemmassa toteutuksessa tämän muutoksen on oletettu olevan merkityksetön, ja siksi PID-säätimen rinnalla on käytetty myötäktykentänä jousen tuottavaa momenttia vastaavaa vakiotermiä.

Jousen tuottaman momentin suuruutta toimialueen eri kohdissa voidaan tutkia ajamalla toimilaite eri asentoihin olemassa olevalla säätimellä ja mittaamalla tasapainotilan vakio-ohjaus eri toimipisteissä. Tasapainotilan ohjaus on suoraan verrannollinen jousen tuottamaan momenttiin nähden, sillä systeemiin ei vaikuta muita merkittäviä voimia. Kuvassa 3 on esitettyä tällaisen mittauksen tulokset.



**Kuva 3.** Tasapainotilan ohjaus eri asetuservoilla

Mittaus suoritettiin kaasuläpän ohjauksen aiemalla C-koodilla tehdyllä toteutuksella. Kuvan 3 kuvaajan y-akselilla on ohjaussovelluksen tuottama ohjaussignaali prosentteina suurimmasta mahdollisesta pulssisuhteesta (-100–100 %) ja x-akselilla kaasuläpän asento (0 % on auki ja 100 % vastaavasti kiinni-asento). Kuvaajaan on piirretty kahden mittauksen arvot, ohjaussignaali ja korjattu ohjaussignaali. Säätimen tuottamaa ohjaussignaalia (sininen) korjataan, jotta pulssinleveysmodulaattorin tuottama todellinen signaali olisi mahdollisimman lähellä alkuperäistä ohjaussignaalia. Tämä korjattu signaali on kuvattu kuvaajassa punaisella värillä.

Kuvaajassa on myös 1. asteen polynomisovite  $P$  sovitettuna pienimmän neliösumman menetelmällä alkuperäiseen ohjaussignaaliin, joka on siis saman muotoinen kuin jousivoiman momentin yhtälö (2.2) lisättyä vakiotermillä. Sovitetta laskettaessa ei ole huomioitu ääriasentoja, sillä ääriasentojen ohjaus ei riipu pelkästään jousivoiman momentista. Esimerkiksi asennon ollessa lähellä 0 %:a ohjaussovellus vaihtaa avoimen silmukan säädölle pitääkseen läpän tiukasti paikallaan.

Kuvasta 3 käy siis ilmi, että todellisuudessa jousivoima ja sen tuottama momentti muuttuvat paljonkin toimialueella – auki-asennon lähellä ohjaus on n. 10 % ja kiinni-asennon lähellä jo n.30 %. Koska tasapainotilassa kaasuläpän ohjauksen on kyettävä tuottamaan jousivoimaa vastaava voima, on myös ohjaussignaalin kolminkertaistuttava auki-asennosta kiinni-asentoon. Käytännössä tällainen lineaarinen muutos voidaan kuitenkin jättää huomiotta, sillä PID-säätimen integraattori kykenee kumoamaan sen, mutta tällöin säädön ominaisuudet kärsivät toimilaitteen epälinearisesta vasteesta.

### 2.2.2 Sonceboz 4256 -moottori

Kaasuläpän moottoria ohjataan virtasignaalilla, joka tuotetaan ECU:n pulssinleveysmodulaattorilla. Moottori sisältää sisäänrakennetun kulma-anturin, joka tuottaa 500–4 500 mV jännitesignaalin. Moottoria voidaan ohjata ECU:n pulssinleveysmodulaattorin tuottamalla virtasignaalilla molempiin suuntiin. Moottorin tuottama vääntö on verrannollinen ohjausvirtaan ja lähes riippumaton akselin asennosta käytetyllä liikealueella. [6]

Ohjaussovelluksen säädön kannalta oletetaan, että moottorin tuottama momentti on viiveetön, lineaarisesti riippuvainen ohjaussignaalista ja riippumaton toimilaitteen asennosta tai ajasta. Mittaussignaalin oletetaan olevan vastaavasti lineaarisesti verrannollinen venttiilin asentoon nähden ja aikainvariantti. Lisäksi oletetaan, että mittaussignaalin kohina on merkityksetön, sillä käytetty PI-säädin ei ole kovin herkkä kohinalle, toisin kuin esimerkiksi PID-säätimet.

## 3 OHJAUSSOVELLUKSEN VAATIMUKSET

Ohjelmistotuotannossa ensimmäinen vaihe on kohdeohjelmiston vaatimusmäärittely, johon kuuluu sovellukseen kohdistuvien vaatimuksien tunnistaminen ja ohjelmistovaatimusten johtaminen niistä. Määrittelyn tuloksena syntyy listaus ohjelmalta vaadituista toiminnoista, muista ominaisuuksista ja rajoituksista [7 s. 38–40]. Tässä työssä vaatimusmäärittelyn pohjana käytetään kaasuläpän ohjauksen aiemman toteutuksen määrittelyä. Määrittely tuotetaan AGCO Powerin tarpeiden mukaiseksi, eikä siihen sisällytetä asiayhteydessä itsestään selvinä pidettyjä vaatimuksia. Nämä listauksesta pois jätetyt vaatimukset – jotka liittyvät kohdejärjestelmän (moottorinohjaimen) erityispiirteisiin – esitellään kuitenkin tässä opinnäytetyössä erikseen luvuissa 3.2 ja 3.3.

### 3.1 Sovelluksen vaatimusmäärittely

Toteutettavan ohjaussovelluksen tavoitteena on korvata aiempi AGCO Powerin moottoreissa käytetty C-kielellä toteutettu kaasuläpän ohjaussovellus. Toteutettavan sovelluksen on täytettävä samat vaatimukset, jotta aiempi toteutus voitaisiin korvata tekemättä suuria muutoksia muuhun moottorinohjausohjelmistoon. Nämä vaatimukset on listattu taulukossa 1 suomeksi käännettynä ja täydennettynä puuttuneilla vaatimuksilla, jotka tunnistettiin analysoimalla aiempaa toteutusta.

*Taulukko 1. Ohjaussovelluksen vaatimukset*

| <b>Vaatusmus</b>                              | <b>Ominaisuuden Kuvaus</b>  |
|---|---|
| <b>1. Kaasuläpän asentosäätö</b>              | Kaasuläpän asentoa tulee säätää PI-säätimellä käyttäen kaasuläpän moottorin asentomittausta.  |
| <b>2. Ohjauksen suunta ja alue</b>            | Kaasuläpän ohjauksen suunnan ja alueen tulee täyttää seuraavat ehdot:<br><br>0 % = Läppä täysin auki<br><br>100 % = Läppä täysin kiinni |
| <b>3. Sisääntulojen ohitus testi-käytössä</b> | Ohjaussovelluksen tulee tarjota rajapinnan sisääntulosignaalien ohitusmahdollisuus testaus- ja tutkimuskäyttöön.                        |
| <b>4. Kaasuläpän vikakoodit</b>               | Kaasuläpän ohjauksen tulee tuottaa moottorinohjausjärjestelmälle vikakoodit toimilaitteen vioista.                                      |

|  |  |
|--|--|
| <b>5. Kaasuläpän itsekalibrointi</b>                                   | Kaasuläpän ohjauksen tulee kyetä kalibroimaan kaasuläpän liikealueen rajat pyydettäessä.   |
| <b>6. Kaasuläpän dynamiikka</b>  | Kaasuläpän ei tule ylittää liikealueen rajoja (0 ja 100 %). Läpän asennonmuutokset tulee olla nopeita erikseen parametrisoitavan ala- ja ylärajan (esimerkiksi 20–100 %) välillä. Rajojen ulkopuolella asettumisajat voivat olla suhteellisen hitaita. |
| <b>7. Pulssinleveysmodulaation tuottaman virran rajoitus</b>           | Moottorinohjain ei voi tuottaa mielivaltaisen isoja virtoja. Siksi kaasuläpän ohjauksen tulee rajoittaa ohjauksen virran suuruutta.  |
| <b>8. Kaasuläpän avoimen silmukan ohjaus</b>                           | Kaasuläpän ohjauksen tulee käyttää avoimen silmukan ohjausta läpän asennolle läpän ollessa avatussa asennossa.   |
| <b>9. Kaasuläpän ohjauksen ECU:n H-sillan huomioiva lineaarisointi</b> | Kaasuläpän ohjauksen tulee kyetä korjaamaan ECU:n pulssinleveysmodulaattorin H-sillasta johtuvat epälineaarisuudet.  |

Vaatusmäärittelyn kohta 1 on lisätty tämän työn osana selventämään ohjaussovelluksen tarkoitusta. Kohtaa 3 muutettu käsittämään muitakin kuin vain asentosäätöön liittyviä signaalien ohituksia testikäytössä.

Listatuista vaatimuksista kohta 9 on lisätty tämän työn osana perustuen edelliseen toteutukseen tehtyihin määrittelemättömiin muutoksiin. ECU:n pulssinleveysmodulaattorissa on pieni viive vaihdettaessa tuotetun jännitteen merkkiä. Tämän takia pulssinleveyspyynnin ylittäessä nollan tulee pyyntiin lisätä sopivansuuruinen termi kumoamaan viiveen vaikutusta.

### 3.2 Yhteensopivuus muuhun moottorinohjausohjelmistoon

Taulukon 1 vaatimusten lisäksi toteutettavan sovelluksen muulle ohjelmistolle tarjoaman rajapinnan täytyy olla mahdollisimman identtinen vanhan toteutuksen kanssa, jotta sen integrointiin vaadittava työmäärä olisi mahdollisimman pieni. Tähän pääsemiseksi toteutettavan ohjaussovelluksen tulee käyttää toimintansa virittämiseen ja käytössä olevien ominaisuuksien kytkemiseen samoja parametreja, ja tarjottava muille sovelluksille käytettäväksi samat mittakanavat, kuin aiempi toteutus.

Sovelluksen kalibrointityön helpottamiseksi uuden sovelluksen tulisi myös tulkita käytetyt parametrit samalla tavalla, ja toimia mahdollisimman samalla tavoin samoilla

parametrien arvoilla. Tästä poiketaan vain, mikäli sillä voidaan korjata jokin aiemmassa toteutuksessa oleva virhe tai toteutusmenetelmän asettamat rajoitteet niin edellyttävät.

### 3.3 Muut vaatimukset

Edellä esiteltyjen vaatimusten lisäksi ohjaussovelluksen on toteutettava myös yleiset moottorinohjauskomponentin vaatimukset. Esimerkiksi reaaliaikaisuusvaatimuksena on kova reaaliaikaisuus. Kova reaaliaikaisuus tarkoittaa, että sovelluksen tulee kyetä tuottamaan vaste syötteelleen (edistää ohjausta yhdellä määrättyllä aikayksiköllä) riittävän nopeasti, määrättyyn aikarajaan mennessä. Tämä on ehdottoman tärkeää, jotta moottorinohjausjärjestelmä kokonaisuutena pystyy toimimaan isokroonisesti, eli tuottamaan vasteen määrätyn aikaikkunan aikana. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että moottorinohjausjärjestelmä ajaa erilaisia tehtäviä määrääjain, esimerkiksi 10 tai 1000 ms välein, ja sen on saatava kyseiset tehtävät valmiiksi ajoissa, jotta se voi aloittaa niiden suorituksen uudelleen tarkalleen oikeaan aikaan.

Kovan reaaliaikaisuuden aikarajaa on vaikea määritellä tarkasti sovelluskohtaisesti. Koska moottorinohjaimella on käytettävissä vain rajallinen määrä suoritusaikaa ja -tehoa, aikaraja riippuu osaltaan myös ECU:n muusta kuormituksesta. Käytännössä ohjaussovellus on siis syytä toteuttaa suhteellisen nopeaksi.

Suorituskykyyn ja toiminnallisuuksiin liittyvien vaatimusten lisäksi sovelluksen tulee täyttää myös testattavuuteen liittyviä vaatimuksia. Sovelluksen tulee tarjota luvussa 3.2 vaadittujen mittakanavien lisäksi myös mittakanavat kaikille sovelluksen sisääntuloille ja sellaisille sovelluksen sisäisille arvoille, joita ei muista mittakanavista pysty yksiselitteisesti päättelemään. Jokaiselle sovelluksen sisääntulosignaali on myös tarjottava erikseen käyttöön kytkettävä ohitussignaali järjestelmätestausta varten.

## 4 TOTEUTUS

Säädön suunnittelua varten kaasuläpän oletetaan tässä työssä olevan liikeradaltaan rajoitettu jousi-massa-vaimennin -systeemi, jolla on vain yksi vapausaste. Liikerataa käsitellään yksiulotteisena käyttäen napakoordinaatistoa. Käytetty akseli vastaa siis kaasuläpän todellista kiertoakselia. Käytettäessä karteesisista koordinaatistoa läpän asennon määrittelyyn tarvittaisiin yhden sijaan kaksi ulottuvuutta. Tämä monimutkaistaisi säädön toteutusta tarpeettomasti.

### 4.1 Käytetyt ohjelmistot

Ohjaussovelluksen toteutukseen käytetään Mathworksin MATLAB-ohjelmointiympäristöä, sen lohkokaavio-ohjelmointiin kehitettyä Simulink-lisäosaa ja tilakoneiden luomiseen tarkoitettua Stateflow-lisäosaa. Toteutetun sovelluksen ohjelmakoodi on tehty lähes täysin Simulinkillä ja Stateflowlla, jotka ovat molemmat graafisia ohjelmointikieliä. Stateflow:n tilojen sisäiseen toteutukseen on käytetty MATLAB-kieltä.

Simulink ja Stateflow työkaluilla ja MATLAB-kielellä tehdyistä ohjelmista voidaan generoida C-koodia käyttäen MATLAB:n MATLAB Coder, Simulink Coder- ja Embedded Coder-lisäosia [8-10]. C-koodi taas käännetään sopivalla C-kääntäjällä, kuten GCC:llä, edelleen suoritettavaksi konekieliseksi ohjelmaksi moottorinohjaimelle. Simulinkillä ja Stateflowlla tehtyjä ohjelmia voidaan kuitenkin suorittaa kehitysympäristöissään kääntämättä niitä ja siten esimerkiksi testata mallinnettua toimilaitetta vasten [8, 11].

Simulink Coderilla tehty käänнос tuottaa ohjelmistokomponentin, jota ei voida suorittaa itsenäisenä, vaan sitä täytyy kutsua jollakin toisella alemman tason ohjelmointikielellä toteutetulla ohjelmalla. Käytännössä moottorinohjaimella ajetaan kevyttä reaaliaikakäyttöjärjestelmää, joka suorittaa useita eri tehtäviä määrätyn väliajoin. Tällainen tehtävä voi olla esimerkiksi tässä työssä toteutetulle ohjelmalle tehtävä kutsu, joka edistää mallin tilaa yhdellä askeleella. Kutsuva ohjelma on siis vastuussa reaaliaikaisuudesta kutsujen ajoituksen osalta. Simulink ja Stateflow koodin vastuulle jää siis riittävän nopea suoritus kutsuttaessa. Kutsuva ohjelma myös huolehtii tiedonsiirrosta käännetyn mallin ja muun ohjelmiston välillä. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitellä tämänkaltaisen ohjelman tekoa.

### 4.2 Sovelluksen rakenne

Toteutettu sovellus on kahden päävaatimuksen, säätö- ja kalibrointikyvyn, mukaisesti jaettu kahteen selkeään kokonaisuuteen. Nämä erottuvat selkeästi tarkasteltaessa ohjelman ylimmän tason lohkokaaaviota (Liite A: ZIZU\_THROTTLEVALVEACTUATOR), jossa kalibrointisekvenssi on toteutettu ylhäällä keskellä olevassa calibration-lohkossa ja säätömeen liittyvät toiminnallisuudet control-lohkossa. Liitteen kuvassa sisääntulosignaalien



ohitus (vaatimus 3) on rajattu kuvan ulkopuolelle. Ylimmän tason lohkokaaviosta löytyy myös lohkot checkFaults, joka tuottaa vikakoodin mittaussignaalin ollessa sallitun alueen ulkopuolella (vaatimus 4), ja BattUFallback, jonka sisältämä toiminnallisuus esitellään luvussa 4.3.2.

### 4.2.1 Säättö

Kaasuläpän ohjauksen tärkein ominaisuus on läpän asentosäättö (vaatimus 1). Asentosäädin on algoritmi, joka laskee asennon tavoitearvon ja toteutuneen arvon erotuksen perusteella ohjaussignaalin, jolla asento saadaan asettumaan halutuksi. Tällaiseen säätöön voidaan käyttää esimerkiksi sarjamuotoista PID-säädintä

$$u(t) = k_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right), \quad (4.1)$$

jossa  $e$  on mittauksen ja asetusarvon erotus eli erosuure ja  $u(t)$  säätimeltä lähtevä ohjaus. Säätimen viritysparametrit ovat säätimen kaikille termeille yhteinen vahvistuskerroin  $k_p$ , integrointitermin *integrointiaika*  $T_i$ , ja D-haaran *derivointiaika*  $T_d$ . [12 s. 293–294]

Säädin voidaan myös esittää rinnakkaisessa muodossa

$$u(t) = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_p \frac{de}{dt}, \quad (4.2)$$

josta erottuvat paremmin säätimen nimen kirjaimia vastaavat P-termi

$$k_p e, \quad (4.3)$$

joka tuottaa suoraan erosuureeseen verrannollisen ohjauksen, I-termi

$$k_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (4.4)$$

joka integroi erosuuretta ajan yli, ja D-termi

$$k_d \frac{de}{dt}, \quad (4.5)$$

joka laskee erosuureen derivaattaa ja käytännössä siis pyrkii ennustamaan erosuureen tulevia arvoja lineaarisella ekstrapoloinnilla [12 s. 297]. D-termin voi siis ajatella tuottavan ennustetun tulevan erosuuren arvon ja P-termin tuottaman ohjauksen erotukseen verrannollisen ohjauksen.

Rinnakkaismuotoisessa säätimessä (4.2) I- (4.4) ja D-termien (4.5) viritysparametreina ovat *integrointivahvistus*  $k_i = \frac{k_p}{T_i}$  ja *derivointivahvistus*  $k_d = \frac{k_p}{T_d}$ . Kaasuläpän asentosäätöön käytetään PI-säädintä, joka sisältää vain P-termin (4.3) ja I-termin (4.4)

$$u(t) = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (4.6)$$

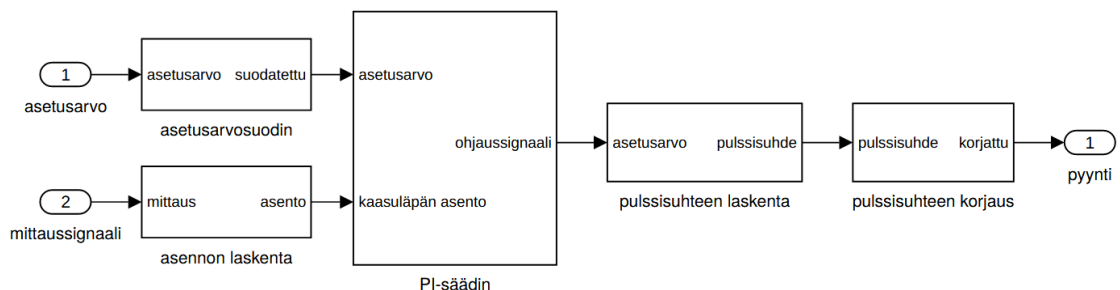
Säädin voidaan esittää myös Laplace-muunnettuna [13 s. 58–59] muodossa

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s}, \quad (4.7)$$

missä  $s$  on Laplace-muuttuja.

Säätimen rakenteeksi on valittu – PID-säätimen sijaan – PI-säädin ensisijaisesti ohjelmiston parametrien pitämiseksi yhteensopivina aiemman toteutuksen kanssa. D-termin lisäys ohjelmistoon vaatisi myös derivointisuodattimen lisäyksen säätimeen, jotta mitauskohina ei aiheuttaisi suuria kaasuläpälle haitallisia vaihteluita ja piikkejä. Tällaisen lisäyksen toteuttaminen ei olisi vaativaa, mutta se vaikeuttaisi säätimen viritystä. Jo PI-säätimellä saavutetaan tarpeeksi nopea kaasuläpän toiminta. Jotta säätöpiirin dynamiikka vastaisi vaatimusta 6, suodatetaan säätimelle tulevaa asetusarvoa alipäästösuotimella, joka kytkeytyy käyttöön vain asetusarvon ollessa lähellä liikealueen rajoja.

Muu säätimelle tulevien ja siltä lähtevien signaalien käsittely on esitetty kuvassa 4, josta on jätetty pois kalibrointiin, ja mittakanaviin liittyvät toiminnallisuudet. Kuvasta on myös jätetty pois kytkentä, jolla kalibroitisekvenssiä ajettaessa ohitetaan PI-säätimeltä tuleva signaali kalibroititilakoneen tuottamalla signaalilla ja asetetaan säädin seuraamaan tätä signaalia windup-ilmion välttämiseksi.



**Kuva 4.** Kaasuläpän ohjaus yksinkertaistettuna lohkoaviona ilman kalibrointitoiminnallisuutta

Todellisessa toteutuksessa (Liite A: ZIZU\_THROTTLEVALVEACTUATOR/control) on myös huomattavasti enemmän lohkojen välisiä signaaleja, joista kuvan 4 yksinkertaistetussa kaaviossa näytetään vain asetusarvoon, mittaukseen ja ohjaukseen liittyvät. Säätimien kuvan 4 mukaisten lohkojen toiminnallisuudet on esitelty tarkemmin taulukossa 2.

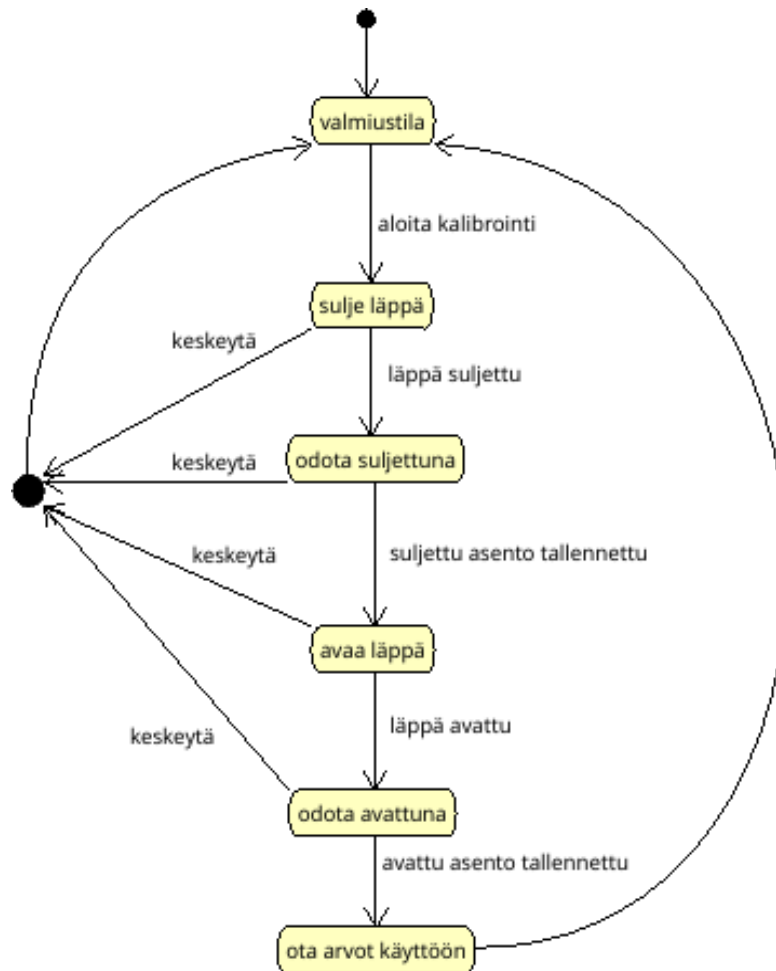
**Taulukko 2.** Säädinosan lohkojen toiminnot

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b>Sisääntulo 1, asetusarvo</b>      | Ulkopuolinen asetusarvo, kaasuläpän tavoiteasento (0 – 100 %)  |
| <b>Sisääntulo 2, mittaussignaali</b> | Kaasuläpän sijainnin mittaus (0,5 – 4,5 V).  |
| <b>Asetusarvosuodin</b>              | Suodattaa asetusarvoa 1. asteen alipäästösuotimella alueen ääripäissä (rajat parametroitavissa).   |
| <b>Asennon laskenta</b>              | Laskee läpän todellisen asennon mittaussignaalista kalibrointitietojen perusteella vaatimuksen 2 mukaisesti.   |
| <b>PI-säädin</b>                     | PI-säädin. Ulostulona suhteellinen osuus suurimmasta sallitusta ohjausvirrasta (vaatimus 7). Sisältää myös logiikan säätimen ohitukseen läpän avoimessa asennossa (vaatimus 8) |
| <b>Pulssisuhteen laskenta</b>        | Muuntaa sisääntulevan ohjauksen pulssisuhteeksi eli päälläoloajan osuudeksi pulssisignaalin. (vaatimus 7).   |
| <b>Pulssisuhteen korjaus</b>         | Laskee korjauksen pyydettävälle pulssisuhteelle, jotta toteutunut pulssisuhde olisi lähempänä haluttua (vaatimus 9).   |
| <b>Ulostulo 1, pyynti</b>            | ECU:n pulssinleveysmodulaattorilta pyydettävä pulssisuhde.   |

Normaalin toiminnan aikana säädin siis laskee kahdesta sisääntulosuureesta – kaasuläpän asennosta ja asetusarvosta – ohjaussignaalin, josta edelleen lasketaan ja rajoitetaan pulssisuhde jolla ECU ajaa kaasuläpän moottoria. Kalibrointisekvenssin aikana tästä kokonaisuudesta on käytössä vain loppuosa, sillä kalibrointisekvenssi tuottaa ohjaussignaalin, joka korvaa PI-säätimeltä lähtevän signaalin ennen pulssisuhteen laskentaa.

## 4.2.2 Kalibrointisekvenssin tilakone

Kaasuläpän kalibrointi (vaatimus 5) on moottorinohjaimen käynnistyksen yhteydessä tehtävä toimenpide, jolla mitataan kaasuläpän toimialueen rajat asennon laskentaa varten. Kalibroinnista vastaa kuvan 5 kaavion mukainen tilakone, joka suorittaa kalibrointisekvenssin ja palauttaa sitten toimilaitteen hallinnan PI-säätimelle.



**Kuva 5.** Kalibrointisekvenssin tilakone

Kalibrointisekvenssin tilakone siirtyy seuraavaan tilaan aina suoritettuaan edellisen tilan toiminnot loppuun. Poikkeuksen muodostavat kalibroinnin aloitus ja keskeytys (kesken sekvenssin), jotka edellyttävät käskysignaalia tilakoneen ja koko kaasuläpän ohjaussovelluksen ulkopuolelta. Vaatimusmäärittelyn mukaisesti kalibrointia ei siis ikinä aloiteta automaattisesti, vaan myös ECU:n käynnistyksen yhteydessä suoritettava kalibrointi käynnistetään tässä työssä toteutettavan ohjaussovelluksen ulkopuolelta. Tilakoneen tilojen toiminnot on esitelty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** *Kalibrointisekvenssin vaiheet*

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>1. Sulje kaasuläppä</b>   | Syöttää kaasuläpälle lineaarisesti nolasta sataan %:in kasvavan ohjaussignaalin.   |
| <b>2. Odota suljettuna</b>   | Odottaa parametrisoidun ajan 100 %:n ohjauksella ja tallentaa sitten asentomittaussignaalin arvon lisättyinä parametrisoidulla vakiolla. |
| <b>3. Avaa kaasuläppä</b>    | Syöttää kaasuläpälle lineaarisesti sadasta nolnaan %:in laskevan ohjaussignaalin.  |
| <b>4. Odota avattuna</b>     | Odottaa parametrisoidun ajan 0 %:n ohjauksella ja tallentaa sitten asentomittaussignaalin arvon vähennettynä parametrisoidulla vakiolla. |
| <b>5. Ota arvot käyttöön</b> | Otaa kohdissa 2 ja 4 tallennetut arvot käyttöön kaasuläpän liikealueen rajoina läpän asennon laskennassa.                                |

Kalibrointisekvenssissä kaasuläppä siis ajetaan vuoron perään kumpaankin ääriasettoonsa, ja lyhyen odotusajan jälkeen tallennetaan mittaussignaalin suuruus kummassakin asennossa. Kaasuläpän asentoa ei kalibroinnin aikana ohjata säätimellä, sillä säädön edellyttämä asentomittaus ei välttämättä ole luotettava ennen kuin kalibrointi on suoritettu. Asentomuutokset suoritetaan kasvattamalla kaasuläpän moottorin ohjausvirtaa lineaarisesti halutun suunnan maksimiarvoon.

Mikäli kalibrointitilakone vastaanottaa keskeytyssignaalin ennen ”Ota arvot käyttöön” -tilaan siirtymistä, ei jo mahdollisesti mitattuja asentoarvoja oteta käyttöön, ja ohjaussovelluksen säädin jatkaa toimintaa keskeytynyttä kalibrointia edeltäneillä arvoilla. Mikäli kalibrointisekvenssiä ei ole tällä ajokerralla suoritettu kertaakaan onnistuneesti loppuun, käytetään muun moottorinohjausohjelmiston antamia alkuarvoja. Alkuarvot ovat joko edellisen käynnistyskerralla kalibrointisekvenssissä muistiin tallennetut arvot tai, mikäli sekvenssiä ei ole ikinä suoritettu onnistuneesti, oletusarvot 500 mV ja 4500 mV.

Alkuarvojen tallentamisesta vastaa Ohjaussovelluksen ulkopuolinen ohjelma, eikä sen toteutus siten ole osa tätä työtä. Tallennuksen ja luvun toiminnan määrittely on kuitenkin tehty tämän työn osana, ja kaasuläpän ohjaussovellukseen on toteutettu sisääntulot kyseisille arvoille.

### 4.3 Vaatimukset ylittävät parannukset

Tämän työn tavoitteena on toteuttaa kaasuläpälle ohjaus, joka vastaa ominaisuuksiltaan hyvin tarkasti aiempaa C-kielistä toteutusta. Työn aikana on kuitenkin havaittu muutamia asioita, joissa poikkeamalla aiemmasta olisi ohjauksen toimintaa mahdollista parantaa tai helpottaa ohjauksen viritystä. Parannusehdotuksien toteutus on jätetty tämän työn

ulkopuolelle, lukuun ottamatta käyttöjännitteeseen liittyvää korjausta, joka ei edellytä muutoksia ohjaussovelluksen parametreihin, ja yksinkertaisempaa jousikorjausta, josta toteutettiin testiversio yksinkertaista koetta varten, jolla varmistettiin konseptin toimivuus.

### 4.3.1 Yksinkertaisempi jousikorjaus

Kappaleessa 2.2.1 tarkasteltiin oletamaa siitä, että toimilaitteen palautusjousen momentti olisi lähes vakio koko liikealueella. Havainnoista käy ilmi, että tämä ei pidä paikkaansa. Jousivoima on mittausten perusteella lineaarisesti riippuva läpän asennosta, joten niin olisi myös jousikorjauksen oltava. Aiemman toteutuksen ja parametriyhteensopivuuden vaatimusten mukaisesti tätä epälineaarisuutta korjataan käyttämällä asentoriippuvaa P-termin vahvistusta ja vahvistuksen lisäkerrointa, jolla pienennetään P-termin vahvistusta negatiivisilla erosuureilla.

Yksinkertaisempi tapa huomioida asentoriippuvainen jousivoiman momentti on lisätä jousikorjaukseen asennosta riippuva termi, jolloin jousikorjaus on muotoa

$$Y_k = a + b\theta, \quad (4.8)$$

jossa  $\theta$  on kaasuläpän asento ja  $a$ ,  $b$  ovat korjauksen viritysparametrit. Toteutuksen kannalta yksinkertaisempi vaihtoehto on käyttää jousikorjauksena skalaarin sijaan kaavan (4.8) mukaan valmiiksi laskettua vektoria, josta poimitaan läpän asentoa vastaava arvo. Simulinkissä tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi Lookup Table -lohkolla. Lookup Table on siis parametri, jonka toiminnallinen arvo riippuu jostakin toisesta signaalista. Lookup Table sisältää muunnostaulukon jonka perusteella toiminnallinen arvo valitaan – tarvittaessa interpoloimalla taulukon arvojen välistä. Tämä taulukko, eli muunnoskartta, voi olla kaksiulotteinen tai suurempidimensioinen. Taulukossa 4 on esiteltynä esimerkki tällaisen lohkon arvoista kaasuläpän asennon suhteen.

**Taulukko 4.** Esimerkki jousikorjauksen Lookup Table:n arvoista

| Asento:              | <u>0 %</u> | <u>20 %</u> | <u>40 %</u> | <u>60 %</u> | <u>80 %</u> | <u>100 %</u> |
|----------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>Jousikorjaus:</b> | 15 %       | 22 %        | 29 %        | 36 %        | 43 %        | 50 %         |

Arvot voidaan määrittää haarukoimalla kullekin asennolle korjaus, jolla integraattorin tila on liki nolla. Ääripäiden arvoja haarukoitaessa käytetään esimerkiksi asentoja 10 % ja 90 %, jotta liikealueen raja ja avoimen silmukan ohjaus eivät vääristäisi tuloksia. Asetettujen pisteiden välissä käytetään korjauksen laskemiseen lineaarista interpolaatiota, joten esimerkiksi 10 % asennolla jousikorjaus on 0 % ja 20 % korjauksien keskiarvo. Jatkossa

tällaisesta jousikorjauksesta käytetään nimitystä karttapohjainen korjaus (Lookup Tablen muunnoskartan mukaan).

Karttapohjaisen korjauksen isoin etu on se, että jousikorjaukselle ja säätimelle on tällöin täysin erilliset parametrit. Tämä mahdollistaa säätimen dynamiikan ja jousikorjauksen virityksen toisistaan erillään. Esimerkiksi mikäli jousikorjaus täytyy virittää uudelleenlaiselle toimilaitteelle, ei sitä tehtäessä tarvitse muuttaa säätimen viritysparametreja.

### **4.3.2 Järjestelmän käyttöjännitteestä riippuva oletusjännite**

Ohjaussovelluksen säädin tarvitsee pulssisuhteen laskentaan tiedon pulssinleveysmodulaattorin käyttämästä jännitteestä. Jännite vastaa järjestelmän käyttöjännitettä, jolle moottorinohjaimesta löytyy mittaussignaali. Mikäli mittausta ei ole käytettävissä, käytetään laskentaan oletusjännitettä. Aiemmassa toteutuksessa tämä oletusjännite oli toteutukseen kovakoodattu vakio, 13,5 V. AGCO Powerin valmistamia dieselmoottoreita voidaan kuitenkin käyttää sekä 12 V:n että 24 V:n järjestelmillä.

Pulssinleveysmodulaattorin tuottama virta on suoraan verrannollinen sekä käytettyyn pulssisuhteeseen että jännitteeseen. Aiemmalla toteutuksella oli siis mahdollista, että jännitemittauksen vikaantuessa virran laskennassa siirryttiin käyttämään 12 V:n oletusjännitettä 24 V:n järjestelmällä, jolloin tuotettu todellinen ohjausvirta olisi kaksinkertainen haluttuun nähden ylittäen suurimman moottorille sallitun virran. Tämän estämiseksi tämän työn toteutus käyttää oletusjännitteenä moottorinohjausohjelmiston ilmoittamaa järjestelmän suunnittelujännitettä, jonka pitäisi vastata paremmin todellista jännitettä.

## 5 OHJAUSSOVELLUKSEN TESTAUS

Polttomoottorien ohjausjärjestelmät täytyy testata ja validoida huolella, sekä turvallisuussyistä, että kalliiden takaisinkutsujen välttämiseksi. Ohjelmiston testaus oikeilla moottoreilla kohdeajoneuvoissa tai jarrupenkissä on kallista ja aikaa vievää. Suurinta osaa ohjelmiston toiminnoista voidaan kuitenkin testata myös simuloituilla toimilaitteilla ja yksikkötesteillä. Moottorien käyttöä järjestelmätestauksessa ja jopa virityksessä taas voidaan vähentää hyödyntämällä HIL-simulaattoreita [14].

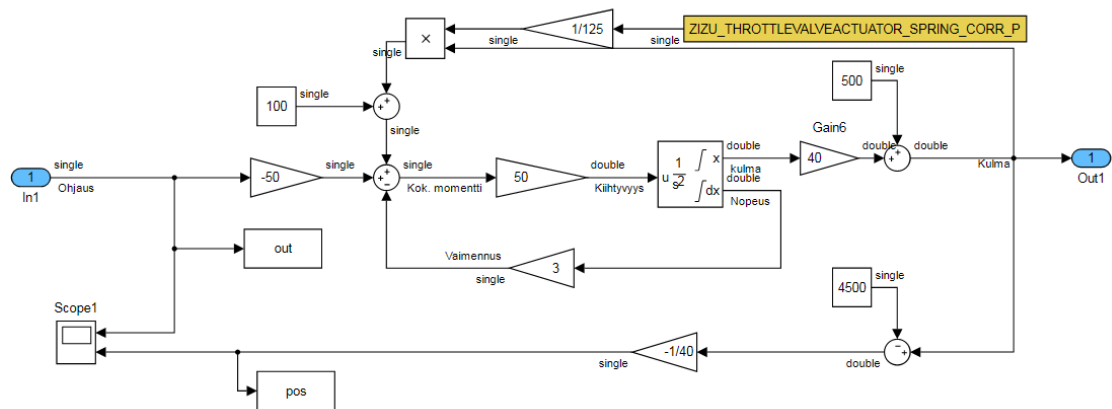
HIL-simulaattori (engl. Hardware-In-Loop simulator) on mallipohjainen simulaattori, jossa on simulaation osana myös oikeita toimilaitteita, kuten esimerkiksi suorasuihkutusjärjestelmä, ahtimen hukkaportti, urearuiskutusjärjestelmä tai tässä työssä käsitelty kaasuläppä, ja ECU. Kaasuläpän ohjaussovelluksen HIL-simulaattorilla ajettuja testejä käsitellään aliluvussa 5.2.

Ennen HIL-testausta ohjaussovellusta testattiin myös yksikkötestein. Yksikkötestejä käytettiin tässä työssä, kuten ohjelmistotuotannossa yleensäkin, yksittäisten ohjelmistokomponenttien regressiotestaukseen sekä testaukseen kehitystyön aikana. Yksikkötestit toteutettiin MATLAB-koodilla ajaen ohjaussovellusta suoraan Simulink-ympäristössä. Osassa yksikkötestejä käytetään testisyötteiden tuottamiseen simuloitua toimilaitetta, jolla tehtyjä manuaalitestejä esitellään aliluvussa 5.1.

### 5.1 Testaus simuloitulla toimilaitteella

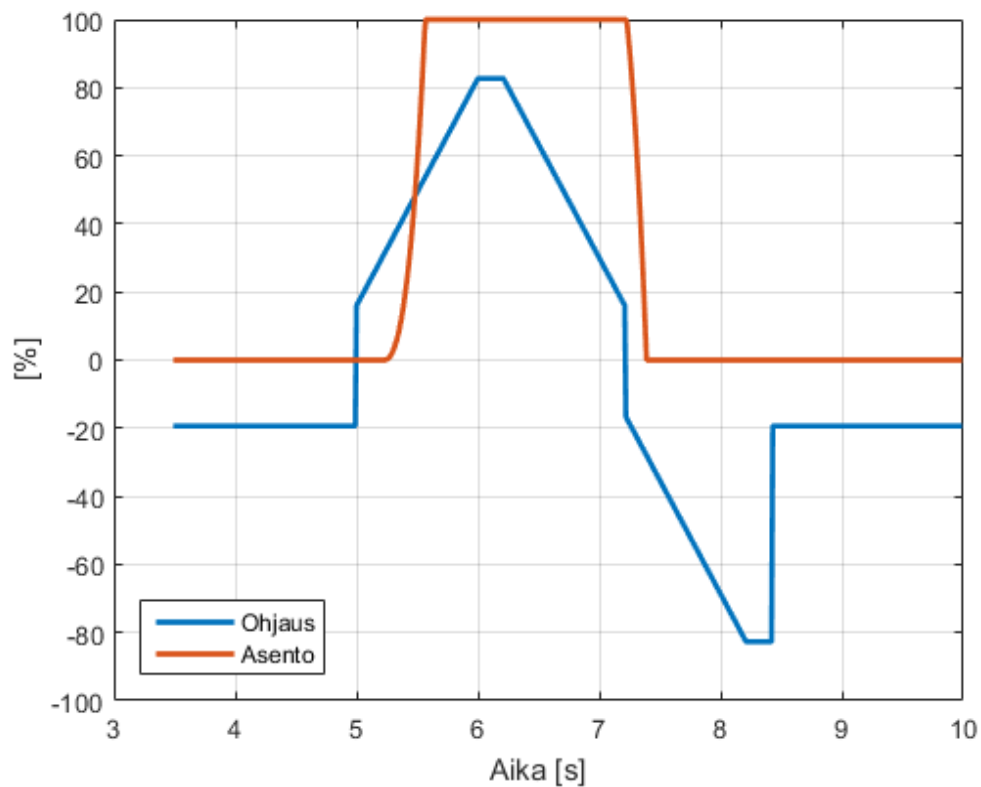
Kaasuläpän ohjauksen – ja etenkin kalibrointisekvenssin – toimintaa testattiin Simulink-ympäristössä simuloitulla toimilaitteella. Toimilaitemallia ei käytetä säädön virittämiseen, vaan ohjauksen logiikan toiminnan varmistamiseen. Mallia ei siis ole viritetty tarkasti todellisen toimilaitteen mukaiseksi. Malli olettaa toimilaitteen olevan yksinkertainen massa-jousi-vaimenninsysteemi. Käytetty Simulinkmalli on esitelty kuvassa 6.





**Kuva 6.** Kaasuläpän Simulink-malli

Mallin rakenne ja siinä esiintyvät viritysparametrit on siis tehty siten, että mallin vaste on samansuuntainen ja saman kaltainen kuin oikean toimilaitteen. Tämä riittää ohjaussovelluksen toimintalogiikan testaukseen. Testausmallissa ei ole mallinnettu ECU:n pulssinleveysmodulaattorin epälinearisuuksia vaihdettaessa ohjauksen suuntaa, mutta tämän vaikutus mallin käytökseen on pieni, sillä ohjauspyynti ylittää nollan – ja siten aktivoi korjauksen – käytännössä vain kalibrointisekvenssin aikana tai hyvin lähellä auki-asentoa, jolloin läppää ohjataan muutenkin avoimen silmukan säädöllä.

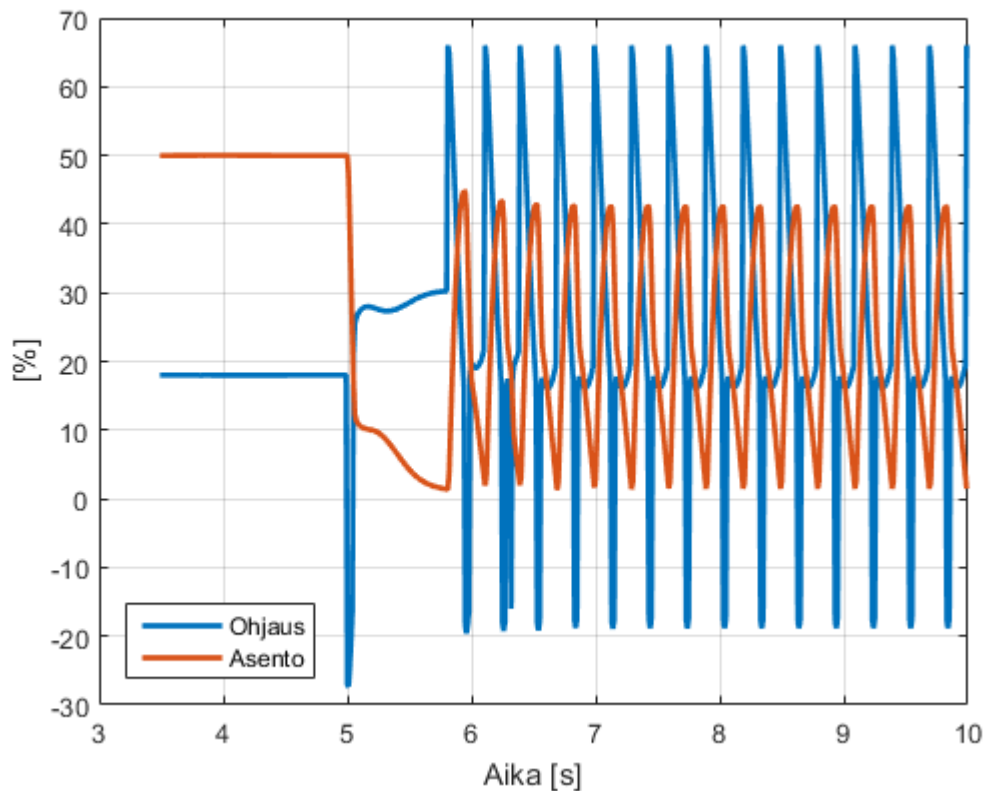


**Kuva 7.** Kalibrointisekvenssi testausmallilla.

Toimilaitteen mallia käytetään esimerkiksi kalibrointisekvenssin testaukseen. Mittaus tällaisesta testistä on kuvassa 7 Kuvassa esiteltyyn kalibrointisekvenssin perusteella ohjaussovellus tuottaa oikeanlaisen ohjaussignaalin kalibroitaessa. Tämä on varmistettu myös myöhemmin esiteltävillä oikealla toimilaitteella suoritetuilla testeillä (luku 5.2).

Vaikka mallinnetun toimilaitteen vasteesta ei voida tehdä johtopäätöksiä oikean kaasuläppän vasteesta kalibroinnin aikana, pystytään kuvan 7 mukaisella testillä varmistamaan, että ohjaussovellus kykenee tallentamaan ja ottamaan käyttöön oikein mitatut arvot toimilaitteen ääriarvoille. Tämä onkin yksi sovelluksen yksikkötestien testitapauksista.

Mallia käytetään tässä työssä myös ohjaussovelluksen toimintatilojen testaukseen. Kuvassa 8 on esiteltynä koe, jossa tarkistetaan, että avoimen silmukan säätö kytkeytyy käyttöön asetusarvon ja asentomittauksen ollessa lähellä auki-asentoa.

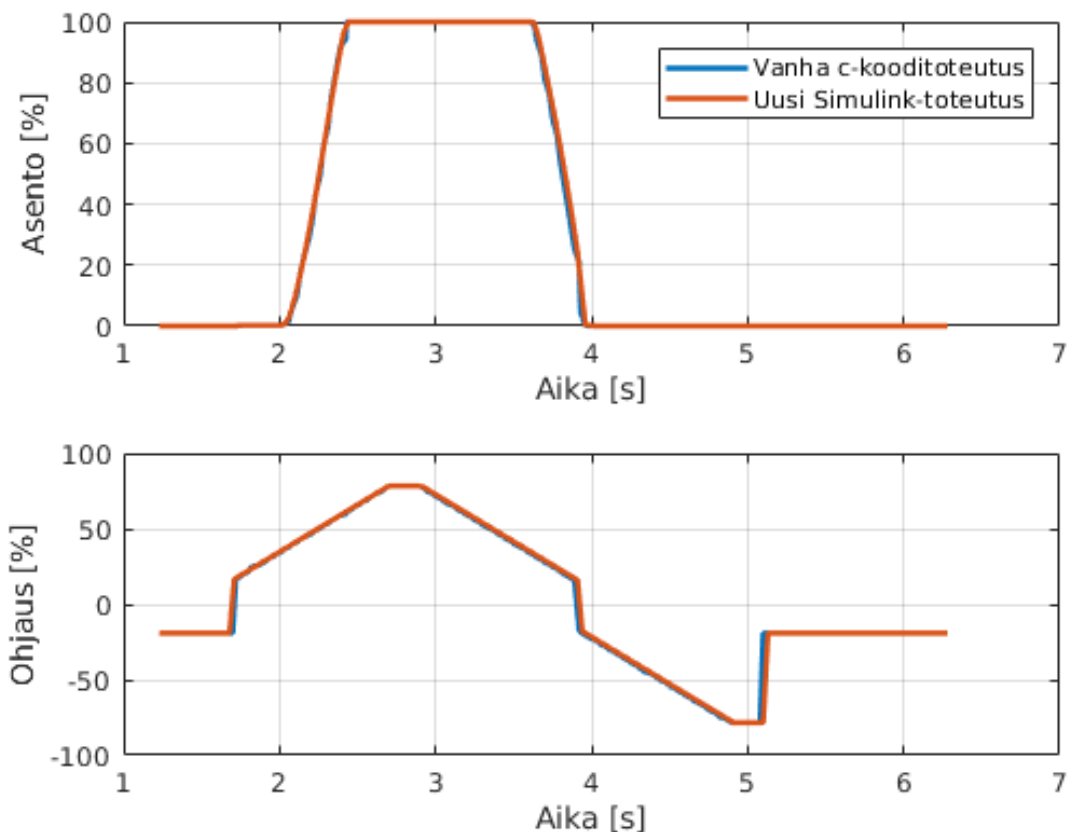


**Kuva 8.** Virheellinen avoimen silmukan säätö testausmallilla

Kuvasta 8 Huomataan, että avoimen silmukan ohjaus on tässä testiajossa ohjannut kaasuläppää väärään (kiinni-) suuntaan saaden asentosäädön värähtelemään. Avoimen silmukan säätö on tämän testiajon jälkeen korjattu vaatimuksen 7 mukaiseksi. Näinkin karkean mallin avulla on siis mahdollista löytää toteutuksesta virheitä.

## 5.2 Testaus HIL-simulaattorilla

Ohjausjärjestelmää testattiin oikean kaasuläpän kanssa käyttäen AGCO Powerin tuotekehitysosaston HIL-simulaattorijärjestelmiä. Toteutettua sovellusta verrattiin aiempaan toteutukseen ajamalla kummallakin sovelluksella samat testit vastaavilla parametreilla. Toteutusten parametrien tietotyypeissä on pieniä eroja, erityisesti enumeraatiotyypisissä parametreissa, mutta näissä tapauksissa valittiin vastaavat arvot. Erityisesti sovelluksista verrattiin kalibrointisekvenssiä (kuva 9) ja askelvasteita (kuvat 10 ja 11).

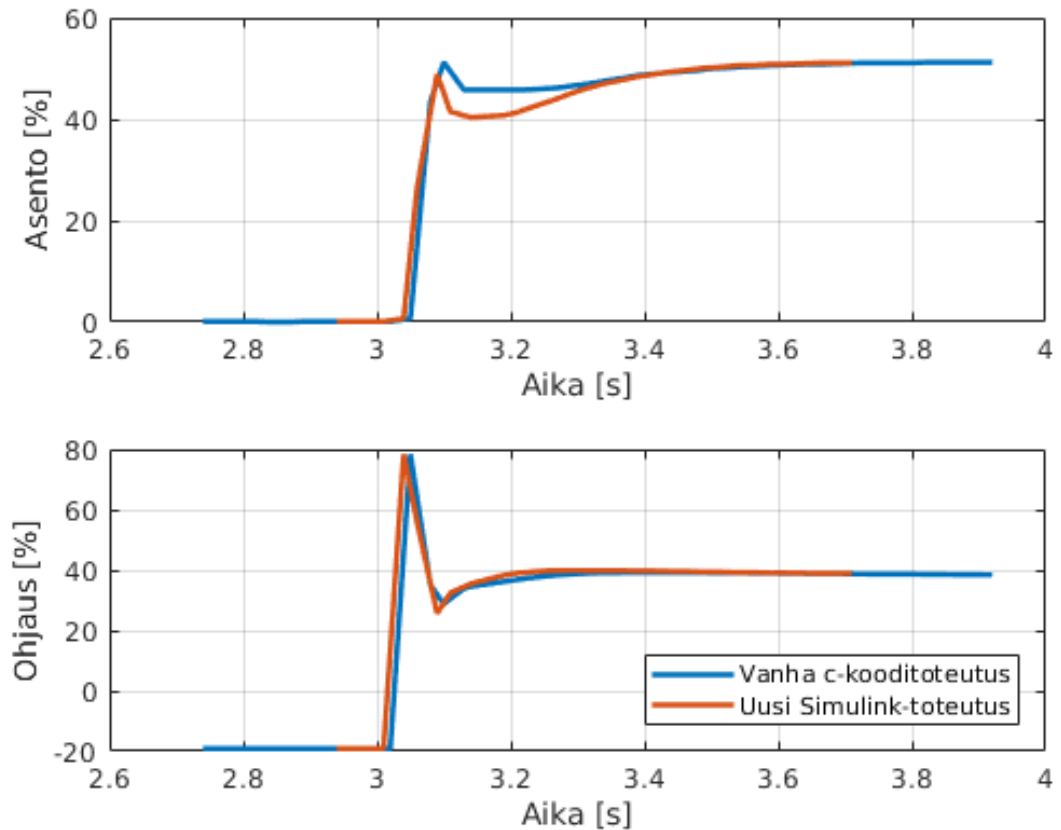


**Kuva 9.** Kalibrointisekvenssi HIL-simulaattorissa

Kalibrointitestistä mitattiin ohjaukselta lähtevä pulssisuhdepyynti ja ohjaussovelluksen laskema kaasuläpän asento. Kalibrointisekvenssi suoritettiin myös kerran ennen mitausta, jotta tallennettu asentosignaali olisi luotettava. Kuvassa 9 uuden ja vanhan toteutuksen kalibrointisekvenssit on asetettu alkamaan samasta ajanhetkestä. Eri toteutusten sekvenssit ovat siis identtiset lukuun ottamatta uuden toteutuksen muutamaa kymmentä millisekuntia pidempiä odotusaikoja. Näin pieni ero on kuitenkin merkityksetön sovelluksen toiminnan kannalta, ja johtuu luultavasti hieman erilaisista arvojen tallennuksen tai odotusajan laskennan toteutuksista. Sovellus siis täyttää vaatimuksen 4 ehdot.

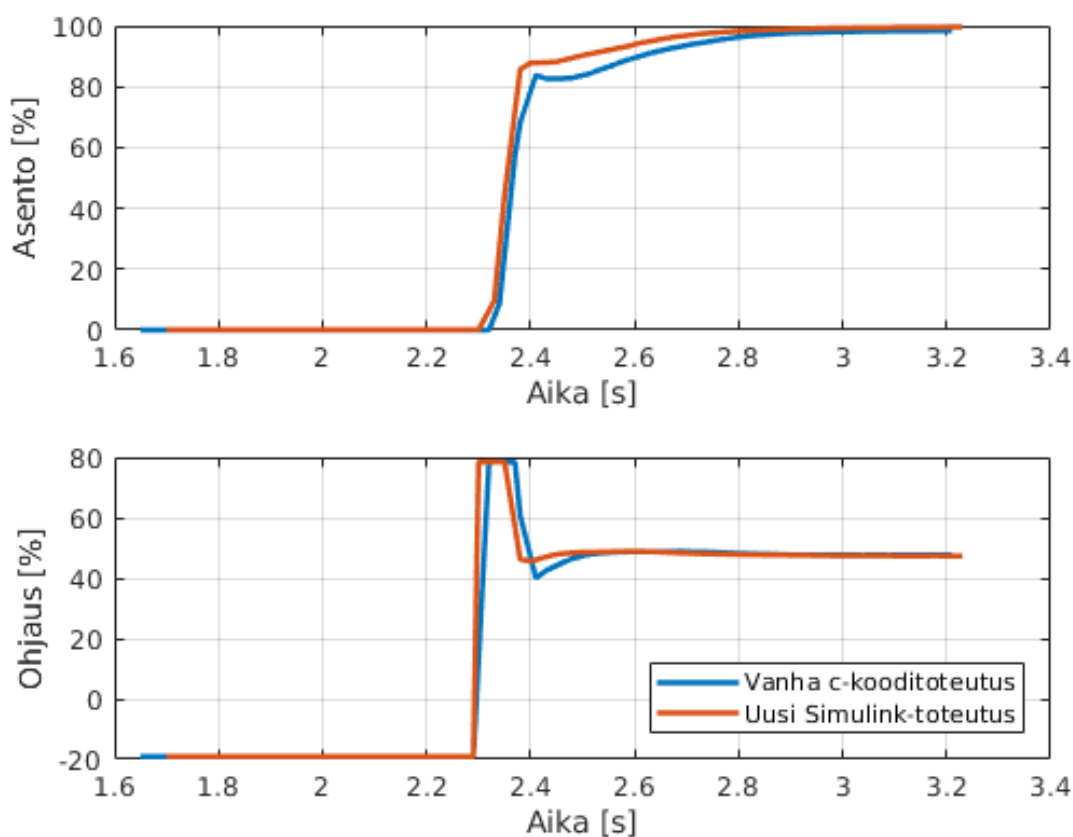
Kuvasta 9 nähdään myös, että ohjauksen ylittäessä nollan on ohjaussignaali epäjatkuva. Tämän aiheuttaa pulssinleveyspyyntiin vaatimuksen 9 mukaisesti tehtävä korjaus.

Ohjattaessa kaasulämpen asentoa säätimellä on ohjaussignaalin suuruus lähes aina positiivinen. Ainoan poikkeuksen tähän voi muodostaa suuri ja nopea asetusarvon lasku. Siten voidaan olettaa, että tämä epäjatkuvuus ei vaikuta säätimen regulontikykyyn. Lisäksi, mikäli korjaus on oikein kalibroitu, on toteutuva pulssinleveyssignaali jatkuva – toisin kuin ilman korjausta.



**Kuva 10.** Askelvastekokeet 0–51 % HIL-simulaattorilla

Kummallakin kaasulämpen ohjauksen versiolla mitattiin askelvasteet 0–51 % (kuva 10) ja 0-100 % (kuva 11) Molemmissa tapauksissa kumpikin toteutus asettuu nopeasti haluttuun asetusarvoon, ja askelvasteet ovat molemmissa tapauksissa likimain samanlaiset. Suuri osa eroista selittyy mittauksen epätarkkuudella, sillä etenkin näytteistystaajuus on liian alhainen vasteen nopeuteen nähden. Suurempitaajuksinen näytteistys ei kuitenkaan ole mahdollinen mitattaessa arvoja moottorinohjausohjelmiston mittakanavista.



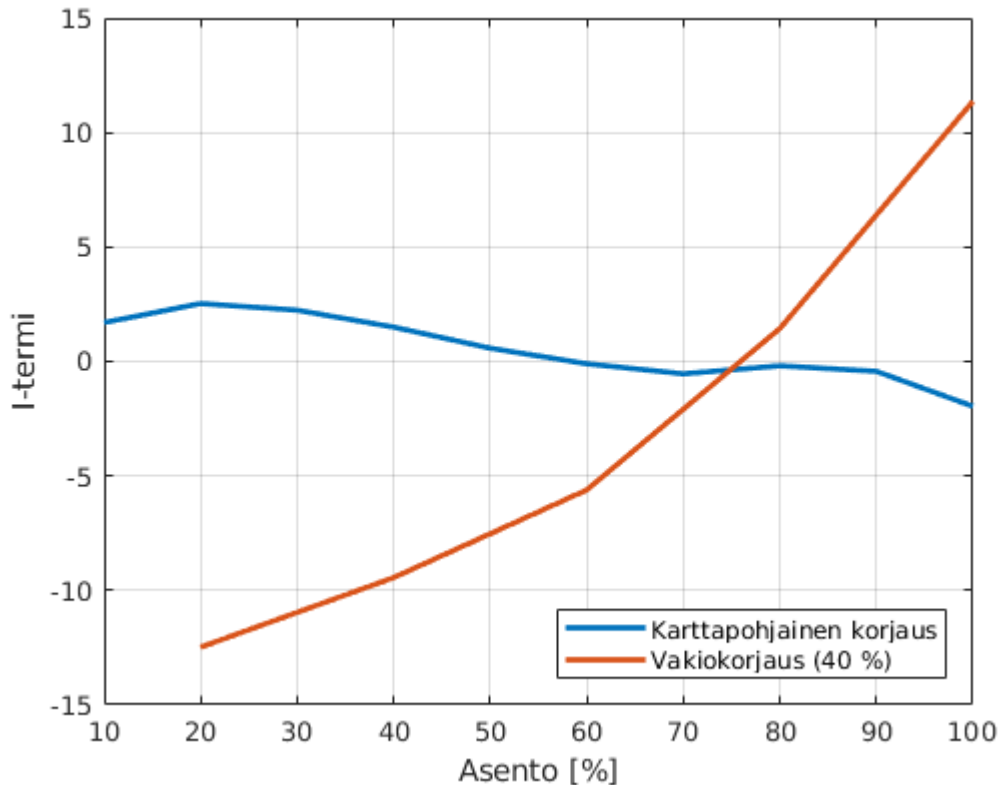
**Kuva 11.** Askelvastekokeet 0–100 % HIL-simulaattorilla

Askelvastekokeista (kuvat 10 ja 11) huomataan, että säätösilmukan tuottama vaste on asetettujen vaatimusten (2 ja 6) mukainen niin suunnaltaan, mittaussignaaliltaan kuin dynamiikaltaankin. Erityisesti 0–100 % kokeessa (kuva 11) havaitaan kuinka asetusarvosuodatus pehmentää kaasuläpän liikettä lähellä kiinni-asentoa. Mittaussignaalin oikeellisuus ääripäissä varmistettiin kokeilemalla käsin, että kaasuläppä todella on painautuneena liikealueen ääripäitä vasten. 0–100 % askelvasteesta huomataan myös, että sovelluksen tuottama ohjaus ei ylitä suurinta sallittua arvoa, vaan rajoittuu n. 80 % täydestä pulssi-suhteesta testissä käytetyllä jännitteellä (vaatimus 7).

Kummankin askelvastekokeen perusteella uuden toteutuksen säätö vaikuttaa aavistuksen kireämmäksi viritetyltä, vaikka molemmissa toteutuksissa käytettiin samoja viritysparametreja. Pieni ero voi selittyä mittausvirheiden ja satunnaisvaihtelun lisäksi toteutusten mahdollisesti hieman eroavilla viiveillä ja diskreetointimenetelmillä.

Luvussa 4.3.1 esiteltiin paranneltu jousikorjaus, josta toteutettiin erillinen testiversio parannuksen jatkokehitystä ja validointia varten. Tätä testattiin kokeella, jossa vertailtiin alkuperäisen ja parannellun jousikorjauksen säätimen integraattorin sisäisen tilan loppuarvoa vakioasetusarvolla muutamilla eri asennoilla. Integraattorin sisäinen tila on ajan yli integroitu erosuure kerrottuna integrointivahvistuksella, eli I-säätimen (4.4) tuottama ohjaus.

Jousikorjauskokeen mittaustulokset ovat kuvassa 12 Vakiokorjauksella mittaukset suoritettiin 20 % välein samoilla pisteillä, joita käytettiin karttapohjaisen korjauksen virittämiseen. Karttapohjaisella korjauksella mittausten asentoväli oli 10 % liikealueesta, jotta voitaisiin varmistua, että korjaus toimii oikein myös korjauskartan arvopisteiden välillä, missä korjaus lasketaan lineaarisesti interpoloimalla viereisistä arvoista. 0 % asento on jätetty pois tuloksista, sillä silloin aktiivisena oleva avoimen silmukan säätö määrää integraattorin arvon.



**Kuva 12.** Jousikorjauskokeen mittaus. Eri versioiden säätimien Integraattoreiden loppuarvot vakioasetusarvolla eri asennoissa.

Jousikorjauskokeen tuloksista havaitaan, että karttapohjaisella korjauksella PI-säätimen integraattorin loppuarvo vakioasetusarvolla pysyy lähempänä nollaa ja etenkin muuttuu vähemmän toimialueen eri pisteissä. Karttakorjaus viritettiin luvussa 4.3.1 esitellyn menetelmän mukaisesti. Muut parametrit pidettiin samoina eri versioiden välillä.

Koetta tehdessä havaittiin, että samallakin jousikorjauksen arvolla integraattorin loppuarvo vaihtelee hieman uusittaessa koetta – erityisesti lähestyttäessä asetuservoa eri suunnista. Luultavasti tämä hystereesi selittyy kaasuläpän akselin kitkalla, joka aiheuttaa lievää takeltelua. Suuri osa kuvassa 12 näkyvästä karttapohjaisen korjauksen virheestä selittyy kuitenkin virityksen epätarkkuudella. Viritystä voitaisiin edelleen parantaa keskiarvottamalla luvun 4.3.1 viritysmenetelmän mittauksia useista mittauksista.

Jousikorjauksen muutoksien vaikutuksia säädön suorituskykyyn ei tämän työn puitteissa tutkittu. Mahdollisten hyötyjen selvittäminen vaatii säätimen virittämisen uudelleen jousikorjauksen muutokset huomioiden. Vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi eri versioiden virittämiseen tulisi käyttää samaa menetelmää.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä toteutettiin dieselmoottorin kaasuläpän ohjaus Simulink-ohjelmistolla. Toteutuksen tavoitteena oli kyetä korvaamaan aiempi C-kielinen toteutus aiheuttaen mahdollisimman vähän muutoksia muuhun moottorinohjausohjelmistoon. Tämän vaatimuksen mukaisesti määriteltiin, että uuden toteutuksen tulisi olla parametreiltaan ja mittakanaviltaan mahdollisimman hyvin aiempaa toteutusta vastaava, sisältää samat toiminnallisuudet ja saavuttaa vähintään yhtä hyvä säädön suorituskyky samoilla parametreilla.

Ohjaussovellus toteutettiin kahdessa osassa: Sääto toteutettiin Simulink-lohkokaaviona ja toimilaitteen asentomittauksen kalibrointi Stateflow-tilakoneena. Sääto-osio sisältää PID-säätimen lisäksi kaasuläpän (kalibroidun) asentosignaalin laskennan, asetusarvosuodatuksen, pulssisuhteen laskennan ja ohjausvirran rajoituksen. Sääto- ja kalibrointiosien lisäksi malliin toteutettiin myös kaasuläpän mittaussignaalin vikadiagnostiikka, sisääntulosignaalien ohitus ja tärkeimmistä signaaleista tehtiin mittakanavat. Ohjaussovelluksesta toteutettiin lisäksi kaksi versiota – tarkasti vaatimusten mukainen versio ja testiversio parannusehdotuksien tutkimiseksi.

Ohjaussovellus osoittautui HIL-simulaattorilla tehdyissä kokeissa asetetut vaatimukset täyttäväksi. Mitattaessa säätöpiirin askelvasteita ja kalibrointisekvenssin toimintaa havaittiin, että uusi toteutus vastaa toiminnaltaan hyvin aiempaa toteutusta. Toteutetun uuden sovelluksella on kuitenkin merkittävänä etuna huomattavasti parempi testattavuus, sillä se sisältää jokaisen sisääntulosignaalin mittaus- ja ohitusmahdollisuudet ylittäen vaatimuksen 2 ehdot, ja sitä voidaan testata myös jo Simulink-ympäristössä tekemättä ensin uutta käännöstä koko moottorinohjausohjelmistosta.

Ohjaussovellusta toteutettaessa havaittiin myös joitakin puutteita ja parannusmahdollisuuksia, niin vanhassa toteutuksessa kuin myös ohjaussovelluksen vaatimuksissa. Vanhassa toteutuksessa pulssisuhteen laskenta mahdollisti ylivirran syötön toimilaitteelle 24 V järjestelmillä jännitesignaalin vikaantuessa. Tämä korjattiin uuden toteutuksen molempiin versioihin. Ohjaussovelluksen testiversiolla kokeiltiin yksinkertaisempaa jousikorjausta, jolla – tehtyjen kokeiden perusteella – pystytään kumoamaan jousivoiman momentti huomattavasti tarkemmin kuin aiemman toteutuksen mukaisella korjauksella. Ominaisuus vaatii kuitenkin vielä jatkotutkimuksia, sillä suurimmat hyödyt ovat saavutettavissa vain virittämällä säädin uudelleen uusi jousikorjaus huomioiden.

Toinen havaittu parannusmahdollisuus on D-säädön lisääminen kaasuläpän säätimeen. Vaikka pelkällä PI-säädöllä saavutetaan tyydyttävä toiminta, olisi PID-säätimellä todennäköisesti mahdollista saavuttaa vielä nopeampi vaste tai paremmat varallisuusarvot. Tämä perustuu D-säätimen kykyyn ennustaa erosuureen tulevia arvoja lineaarisella ekstrapoloinnilla [12 s. 297], eli tuottaa vaiheenjohtoa. Ohjaussovelluksen nykyinen PI-



säädin on toteutettu käyttämällä valmista derivointisuodattimen sisältävää PID-lohkoa, josta D-haara on sammutettu. D-säädön lisäys sovellukseen vaatii siis vain parametrien lisäyksen derivointitermin vahvistukselle ja suodatukselle – säätimen uudelleenvirityksen lisäksi.

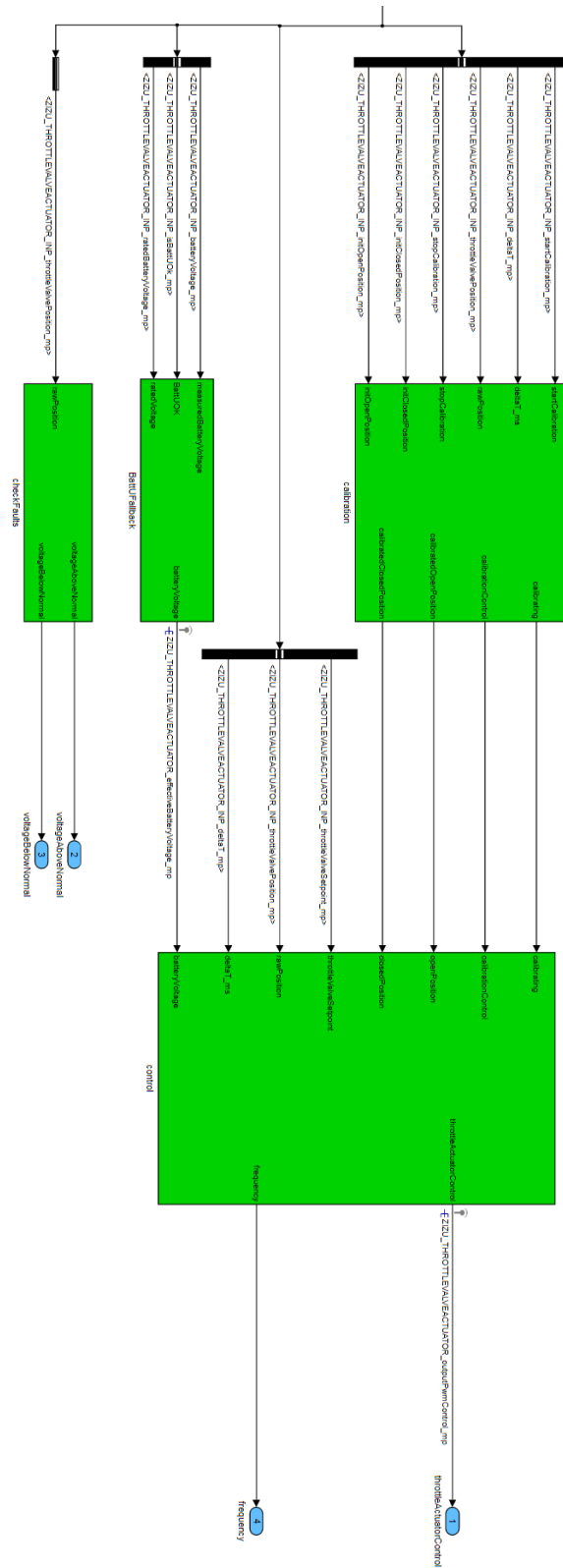
## LÄHTEET

- [1] S. Rostami, M. Kiani Deh Kiani, M. Eslami, B. Ghobadian, The effect of throttle valve positions on thermodynamic second law efficiency and availability of SI engine using bioethanol-gasoline blends, *Renewable Energy*, Vol. 103, Iss. Supplement C, 2017, pp. 208–216.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116310023>.
- [2] K. Reif, *Diesel engine management*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [3] Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery, amending Regulations (EU) No 1024/2012 and (EU) No 167/2013, and amending and repealing Directive 97/68/EC (Text with EEA relevance), (EU) 2016/1628, 2016. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016R1628>.
- [4] I. Friedrich, C. Liu, D. Oehlerking, Coordinated EGR-rate model-based controls of turbocharged diesel engines via an intake throttle and an EGR valve, 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 7–10 Sept. 2009, IEEE, Dearborn, MI, USA, pp. 340–347.
- [5] H.D. Young, *University Physics with Modern Physics*, 14. ed., global ed. ed. Pearson, Harlow, 2015.
- [6] Sonceboz Torque Motor 4256  
 , <http://www.sonceboz.com/medias/Products/PDFs/datasheets%20V2/4256new.pdf>.
- [7] I. Haikala, J. Märijärvi, Ohjelmistotuotanto, Talentum media Oy, Helsinki, 2006, 288 s.
- [8] R. Hul, R. Wagnerova, Fast development of controllers with Simulink Coder, 2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC), 28–31 May 2017, IEEE, pp. 406–411.
- [9] *Simulink Coder™ User's Guide*, Version 8.13 ed. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, 2017.
- [10] Mathworks Embedded Coder, <https://se.mathworks.com/products/embedded-coder.html>.
- [11] *Simulink User's Guide*, The MathWorks Inc, [https://se.mathworks.com/help/pdf\\_doc/simulink/sl\\_using.pdf](https://se.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/sl_using.pdf).
- [12] K.J. Åström, R.M. Murray, *Feedback systems*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2009.

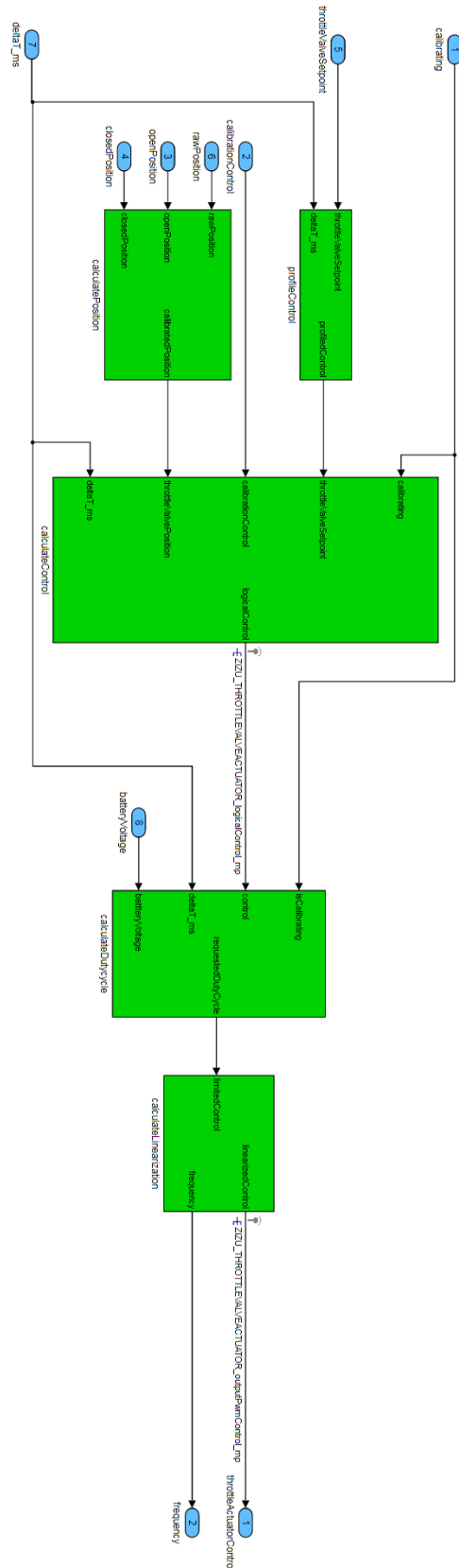
[13] R.C. Dorf, R.H. Bishop, *Modern control systems*, 12. ed., internat. ed. ed. Pearson, Boston [u.a.], 2011.

[14] J. Millet, F. Aubertin, F. Maroteaux, *Air System and Diesel Combustion Modeling for Hardware in the Loop Applications*, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. Transactions of the ASME, Vol. 134, Iss. 4, 2012, pp. 1–12.  
<http://dx.doi.org/10.1115/1.4004597>.

# LIITE A: SIMULINK-MALLIT



**Kuva 1.** ZIZU\_THROTTLEVALVEACTUATOR. Vikadiagnostiikka on toteutettu lohkoissa 'checkFaults' ja laskentajännitteen valinta lohkoissa 'battUFallback', kalibrointi lohkoissa 'calibration' ja säädintoiminnallisuus lohkoissa 'control'.



**Kuva 2.** *ZIZU\_THROTTLEVALVEACTUATOR/control*. Asemen laskenta on lohkoissa 'calculatePosition', asetusravon suodatus lohkoissa 'profileControl', PID-säädin ja jousikorjaukset lohkoissa 'calculateControl', pulssisuhteen laskenta lohkoissa 'calculateDutycycle' ja vaatimuksen 8 mukainen korjaus lohkoissa 'calculateLinearization'