

Rami Niiranen

**SUORARUISKUTTEISEN AHDETUN OTTOMOOTTORIN
MOOTTORINOHJAUSJÄRJESTELMÄN PARAMETRISOINTI**

SUORARUISKUTTEISEN AHDETUN OTTOMOOTTORIN MOOTTORINOHJAUSJÄRJESTELMÄN PARAMETRISOINTI

Rami Niiranen
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, auto- ja kuljetustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Rami Niiranen

Opinnäytetyön nimi: Suoraruiskutteisen ahdetun ottomoottorin moottorinohjausjärjestelmän parametrisointi

Työn ohjaaja: Mauri Haataja

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2016 Sivumäärä: 42 + 0 liitettä

Työn tavoitteena oli mitata ja määrittää suoraruiskutteisen ahdetun ottomoottorin perusparametrit. Tavoitteena oli saada moottori toimimaan jälkiasenteisen ohjelmoitavan moottorinohjausyksikön avulla.

Parametrien määrittämiseen käytettiin Motecin toimittamaa parametrisointiohjetta suoraruiskutusmoottorille ja moottorin alkuperäisiä huolto-ohjeita. Ensisijaisesti määritettiin parametrit, jotka ovat pakollisia moottorin käynnistämiseksi. Näihin kuuluvat polttoainepumpun ja suuttimien ohjaukseen liittyvät parametrit. Mittauksissa hyödynnettiin Oulun ammattikorkeakoulun autolaboratorion mittalaitteita, kuten moottorijarrua ja tiedonkeruujärjestelmää. Osa parametreista voitiin päätellä suoraan moottorin huolto-ohjeiden perusteella ja osa mitattiin moottorista.

Tuloksena työstä saatiin Motecin ohjainlaitteen ohjelmistopaketti, joka sisältää tarpeelliset parametrit moottorin käynnistämistä varten. Niitä ovat tarvittavat tiedot korkeapainepumpun, suuttimien ja nokka-akseleiden ohjaukseen. Pakettia voidaan sellaisenaan käyttää opetuskäytössä ja sen pohjalta voidaan edelleen kehittää suoraruiskutteisen moottorin ohjausta.

Moottori tulee jäämään autolaboratorioon, jossa sitä käytetään opetukseen ja suoraruiskutteisen moottorin ominaisuuksien testaukseen. Pakettia tullaan myös käyttämään tulevien suoraruiskutusmoottoreiden ohjelmistojen pohjana.

Asiasanat: Motec, suoraruiskutus, Hyundai, turbo

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	6
2 POLTTOAINEEN JA ILMAN SEOKSEN MUODOSTUS	7
2.1 Muodostus imusarjan alussa	8
2.2 Muodostus imusarjan lopussa	8
3 POLTTOAINEEN SUORARUISKUTUS	10
3.1 Historia	11
3.2 Ruiskutustavat	12
3.3 Saavutettavat hyödyt	14
3.4 Haasteet	15
4 SUORARUISKUTUSJÄRJESTELMÄN OHJAUS	17
4.1 Korkeapainepumppu	17
4.2 Korkeapainesuuttimet	19
5 HYUNDAI G4FJ -MOOTTORI	21
6 TYÖSSÄ KÄYTETTY MOOTTORINOHJAINJÄRJESTELMÄ	23
6.1 Motec M182 ECU	23
6.2 Motec LTCD	24
7 PARAMETRISOINTI	25
7.1 Suuttimien ohjaukseen vaadittavat parametrit	25
7.2 Korkeapainekiskon paineanturin parametrit	27
7.3 Korkeapainepumpun ohjaukseen vaadittavat parametrit	28
7.3.1 Perusparametrit	29
7.3.2 Pumpun ennakko (Delivery angle)	30
7.3.3 Pumpun maksiminoston kohta (Offset)	33
7.3.4 Ohjauspulssin pituus (Peak pulse ja hold angle)	34
7.3.5 Aktivointiraja (Limit angle)	36
7.4 Käynnistyksen jälkeen säädetyt parametrit	37
7.4.1 Pumpun ennakko (Delivery angle)	37

7.4.2 Suuttimien lineaarisuuden määrittäminen (Dead time)	39
8 YHTEENVETO	41
LÄHTEET	42

1 JOHDANTO

Työn lähtökohtana oli Hyundai Velosterin 1,6-litrainen suoraruiskutteinen turboahdettu ja välijäähdytetty bensiinimoottori. Moottori on saatu laboratorioon irrallisena ilman täydellistä johtosarjaa. Alkutilanteessa valmiina oli vain moottorin kiinnityspukki moottorijarrussa ja osa jäähdytys- ja imuilmaputkistosta.

Ensimmäisessä vaiheessa moottoria yritettiin käynnistää alkuperäisellä moottorinohjainlaitteella, mutta puuttuvien ohjain- ja turvalaitteiden takia käynnistäminen osoittautui mahdottomaksi. Alkuperäisen ohjauslaitteen parametrien mittaaminen päätettiin toteuttaa autoliikkeestä lainatusta autosta. Samantyyppisellä moottorilla varustettuja autoja ei kuitenkaan saatu järjestettyä mittaukseen, joten mittaukset jäivät suorittamatta.

Mittaustietojen puuttuessa päätettiin aloittaa moottorin käynnistäminen Motecin toimittamien yleisohjeiden perusteella. Koska suurin osa moottorin sähköliittimistä oli huonosti saatavilla, päätettiin Motecin ohjainlaite liittää suoraan alkuperäisen ohjainlaitteen liittimeen, jolloin voitiin käyttää alkuperäistä johtosarjaa.

Tavoitteina oli saada moottori käynnistymään ja säädettyä niin, että sitä voidaan käyttää laboratorio harjoituksissa. Samalla tutustuttiin suoraruiskutus moottorin parametreihin ja ominaisuuksiin. Kolmannessa vaiheessa moottorin ominaisuuksia testattiin mahdollista kilpailukäyttöä silmälläpitäen.

Tärkeimpänä osana työssä keskitytään korkeapainepumpun ohjauksen toimintaan ja ruiskutuksen ajoituksen vaikutuksiin. Näiden parametrien osalta on tällä hetkellä olemassa hyvin vähän tarkkaa tietoa.

Työssä tutustutaan myös suoraruiskutuksen toimintaan ja sen säätämiseen sekä Motecin ohjainlaitteen suoraruiskutuksen ohjauksen ominaisuuksiin ja vaa-dittaviin parametreihin. Työn aikana opittua tietoa pyritään hyödyntämään tulevaisuudessa suoraruiskutus moottorien säätämisessä.

2 POLTTOAINEEN JA ILMAN SEOKSEN MUODOSTUS

Seoksenmuodostus on polttomoottorin toiminnan kannalta yksi tärkeimmistä vaiheista. Seoksenmuodostuksessa voidaan vaikuttaa moottorin käyttäytymiseen, käynnistymiseen, tehoon, päästöihin ja polttoainetalouteen. Periaatteessa yksinkertainen toimenpide, jossa polttoaine sekoitetaan imuilmaan, muuttuu todellisuudessa huomattavan vaikeasti hallittavaksi prosessiksi. (1, s. 498.)

Prosessin peruslähtökohtana on moottoriin imetyn ilmamäärän mittaaminen ja polttoaineen annostelu niin, että saavutetaan haluttu seossuhde (1, s. 499). Kaasuttimissa mittaamiseen käytetään kaasuttimen kurkkuun tehtyä kavenusta (1, s. 501). Imusarja ruiskutuksessa voidaan käyttää liikkuvaan läppään perustuvia määrittämiä tai jäähdytysvaikutukseen perustuvia massamittareita (1, s. 513–515). Ilman massa voidaan myös määrittää laskennallisesti imusarjan alipaineen ja moottorin VE-kartan avulla.

Pelkkä ilmamassan mittaus ei kuitenkaan vielä riitä sillä seoksenmuodostuksen täytyy myös reagoida muuttuviin olosuhteisiin ja moottorin kuormituksen muutoksiin sekä moottorissa tapahtuvaan kulumiseen. Yleisimmät lisätoiminnot ovat kylmärikastus, kiihdytysrikastus ja syötönkatkaisu moottorijarrutuksessa. Nämä perustoiminnot ovat yhteisiä kaikille seoksenmuodostustavoille. (1, s. 506.)

Seoksenmuodostukseen on aikojen saatossa käytetty kolmea perustekniikkaa, kaasutinta, imusarjaruiskutusta ja palotilaan ruiskutusta. Kaasutin oli ajoneuvojen peruskomponentti ensimmäiset 100 vuotta.

Päästöjen seurannan aloittamisen jälkeen polttoaineen ruiskutus on ollut hallitseva ja lähes ainoa käytetty tapa, sillä kaasuttimien käyttö loppui erittäin nopeasti päästömääräysten astuttua voimaan (1, s. 499). Muutamien vuosien ajan perinteisen imusarjaruiskutuksen rinnalle on tarjottu suoraa palotilaan ruiskutusta. Muutos ei ole ollut yhtä nopeaa kuin kaasuttimen tapauksessa, ja on odotettavissa, että imusarjaruiskutus tulee säilymään ajoneuvokäytössä vielä pitkään.

2.1 Muodostus imusarjan alussa

Perinteisesti bensiinimoottoreissa seoksenmuodostus on tapahtunut ennen palotilaa. Vanhemmissa ratkaisuissa käytettiin kaasuttimia, jolloin seos muodostui heti imusarjan alussa. Kaukana palotilasta muodostettu seos ehtii sekoittua ja polttoaine höyrystyä hyvin ennen palotapahtumaa. Toisaalta seoksen siirtäminen imusarjassa aiheuttaa myös suuria ongelmia etenkin moottorin ollessa kylmä, sillä kylmässä imusarjassa polttoaine pyrkii tiivistymään imusarjan seinille ja seosta joudutaan rikastamaan.

Kaasuttimella toteutetulla seoksenmuodostuksella EURO 1 -normien saavuttaminen 1990-luvulla kävi jo lähes mahdottomaksi. Pakokaasun puhdistuslaitteiden vaatiman tarkan stökiometrisen seossuhteen saavuttaminen kaikissa ajotilanteissa vaatii toteutuneen seossuhteen tarkkailemista ja seoksen nopeaa säätömahdollisuutta, joiden toteuttaminen kaasuttimella ei ollut enää taloudellisesti kannattavaa. (1, s. 499.)

2.2 Muodostus imusarjan lopussa

Yleisin ajoneuvoissa nykyään käytetty seoksenmuodostustapa on polttoaineen ruiskutus imukanavaan. Imukanavaan ruiskuttamalla päästään lähes kokonaan eroon pitkän imusarjan tiivistymisongelmista ja lisäksi seoksen säätäminen on erittäin helppoa ja nopeaa.

Tulevaisuudessa päästörajojen kiristyminen ja polttoainetalouden parantaminen asettaa entistä suurempia vaatimuksia seoksenmuodostukselle. Imusarjaruiskutusta on pyritty kehittämään, uusilla suutintekniikoilla sekä paremmalla imusarjan suunnittelulla seoksenmuodostusta voidaan edelleen kehittää. Järjestelmän yksinkertaisuus ja edullisuus tulevat pitämään sen markkinoilla vielä useiden vuosien ajan. (2, linkit Powertrain -> Gasoline port fuel injection.)

Imusarjaruiskutuksen suurin etu on pitkä seoksenmuodostusaika (3, s. 4). Polttoainetta voidaan ruiskuttaa käytännössä koko moottorin syklin ajan. Polttoaineella on kaikissa tilanteissa riittävästi aikaa sekoittua ja höyrystyä. Käytettävät komponentit ovat myös edullisia ja toimintavarmoja.

Kuvassa 1 on esitetty polttoaineen ruiskutuksen periaate. Seos muodostuu palotilan ulkopuolella, ja polttoainesuihku kohdistetaan imuventtiileihin, jotta polttoaineen kertyminen imusarjan seinämiin olisi mahdollisimman vähäistä.



KUVA 1. Imusarjaruiskutuksen periaate (2, linkit Powertrain -> Gasoline port fuel injection)

3 POLTTOAINEEN SUORARUISKUTUS

Uusin suuntaus ajoneuvoteollisuudessa on hiilidioksidipäästöjen (CO₂) vähentäminen. Useat maat ovat muuttaneet verokäytäntönsä CO₂-päästöistä riippuvaiseksi. CO₂-päästöjen vähentäminen ei onnistu perinteisillä puhdistusmenetelmillä, koska hiilidioksidi on palamisen lopputuote, jonka määrä riippuu vain poltetun hiilen määrästä. Hiilidioksidipäästön vähentäminen onnistuu vain polttoaineen kulutusta pienentämällä. (2, linkit Powertrain -> Gasoline direct injection)

Kulutuksen pienentäminen onnistuu käytännössä joko moottorin hyötysuhdetta kasvattamalla tai tarvittavaa tehoa eli ajoneuvon vastuksia pienentämällä. Ajoneuvon massalla on suurimerkitys vastusvoimiin, joten myös ajoneuvon massan pienentämiseen kiinnitetään nykyään enemmän huomiota.

Moottorin hyötysuhde on parhaimmillaan maksimiväännön kohdalla. Normaalissa ajotilanteessa moottori kuitenkin toimii tällä alueella vain harvoin. Tätä tilannetta on pyritty parantamaan niin sanotun downsizingin avulla. Downsizing tarkoittaa käytännössä moottorin sylinteritilavuuden pienentämistä ja sylinterimäärän vähentämistä. Pienempi moottori joutuu luonnostaan toimimaan suuremman kuormituksen alla, joten se toimii paremmalla hyötysuhdealueella.

Samaan aikaan asiakkaat vaativat parempaa suorituskykyä ja hyvää ajokäyttämistä. Hyvän suorituskyvyn saavuttaminen pienestä moottorista vaatii litratehon nostamista. Litratehovaatimusten kasvaminen on aiheuttanut ahtamisen yleistymisen henkilöautomooottoreissa.

Ajoneuvoa ei kuitenkaan voida suunnitella niin, että moottori toimisi koko ajan suurella kuormituksella. Normaalissa käytössä moottori toimii suuren osan ajasta osakuorma-alueella, missä hyötysuhde on ollut huono. Tähän ongelmaan saadaan parannus suoraruiskutuksen avulla. Suoraruiskutus mahdollistaa moottorin vääntömomentin säätämisen polttoaineen määrää säätämällä (1, s. 949).

Kuvassa 2 on esitetty polttoaineen suoraruiskutuksen periaate. Seos muodostetaan palotilan sisälle ulottuvan suuttimen avulla. Polttoaine ei muodosta filmiä imukanaviin, joten seoksen säätö voi reagoida nopeammin moottorin kuormitus muutoksiin.



KUVA 2. Suoraruiskutuksen periaate (2, Linkit Powertrain -> Gasoline direct injection)

3.1 Historia

Polttoaineen ruiskuttaminen suoraan palotilaan on ollut käytössä puristussytytteisissä moottoreissa jo yli sata vuotta. Puristussytytteisissä moottoreissa ruiskutus tapahtuu palotapahtuman aikana, mutta kipinäsytytteisissä moottoreissa se tapahtuu aina ennen varsinaisen palotapahtuman alkua.

Bensiinimoottoreiden suoraruiskutusta on käytetty joissakin erikoistapauksissa jo 80 vuotta sitten (3, s. 3). Nykyisen elektroniikan ja materiaalitekniikan kehittyminen on vasta viime vuosina mahdollistanut suoraruiskutuksen yleistymisen.

Ennen bensiinin suoraruiskutus on toteutettu samalla tavalla kuin puristussytytteisissä moottoreissa. Bensiini on ruiskutettu erillisen ruiskutuspumpun avulla

palotilaan imutahdin aikana. Tämän tyyppisissä ratkaisuissa voidaan käyttää vain yhtä ruiskutusta ja ajoituksen säätäminen ajon aikana on erittäin rajoitunutta.

Näilläkin ruiskutusjärjestelmillä saavutettiin hyviä tuloksia ahdetuissa moottoreissa. Ensimmäinen suoraruiskutteinen bensiinimoottori oli Daimler-Benzin 1930-luvulla kehittämä DB-601-lentokone moottori (3, s. 3). Lentokonekäytössä suurimpia hyötyjä oli seoksen pysyminen hyvänä kaikissa lentotilanteissa.

Ajoneuvokäytössä ensimmäinen suoraruiskutusta käyttänyt sarjatuotantoauto oli Mercedes 300SL vuonna 1952. Tässäkin tapauksessa käytettiin täysin mekaanista bensiinin ruiskutusjärjestelmää. (3, s. 3.)

Mekaanisten ruiskutuslaitteiden epäluotettavuus, komponenttien korkea hinta ja imusarjaruiskutuksen kehitys pitivät bensiinin suoraruiskutuksen poissa markkinoilta kymmeniä vuosia. Nykyaikainen moottorinohjauselektronikka on mahdollistanut entistä edullisemmän ja yksinkertaisemmän suoraruiskutustekniikan kehityksen.

3.2 Ruiskutustavat

Polttoaineen ruiskutukselle palotilaan on kaksi perustapaa. Ensimmäinen tapa on ruiskuttaa polttoaine nestemäisenä palotilaan (3, s. 33). Tämän tavan hyötyjä ovat yksinkertainen sylinterikannen rakenne ja hyvä seoksenmuodostuksen hallinta.

Toinen perustapa on ruiskuttaa palotilaan polttoaineen ja ilman esiseos. Esiseos on erittäin rikas. Polttoaine on suurimmaksi osaksi höyrystyneessä muodossa, joka nopeuttaa seoksenmuodostumista merkittävästi. Esiseosruiskutuksessa ei tarvita suurta polttoaineen painetta tai erikoissuuttimia. Se onkin löytänyt käyttökohteensa pienistä ja halvoista kaksi- tai nelitahtimoottoreista. (3, s. 33.)

Esiseosta varten tarvitaan kuitenkin erillinen kammio, jossa esiseos muodostetaan ja josta se ruiskutetaan palotilaan. Tarvittavien sekoitus kammioiden ja

venttiili rakenteiden toteuttaminen on hankalaa eteenkin monisyylinterisissä moottoreissa. Kammiorakenne on helpompi toteuttaa yksinkertaisemman kansirakenteen ansiosta kaksitahtisen moottoriin. Kaksitahtisessa moottorissa on aina myös huuhtelupumppu, josta on helpommin saatavana tarvittava korkea-paineinen ilma. (3, s. 33.)

Nestemäisen polttoaineen ruiskuttamiseen on kehitetty useita erilaisia ratkaisuja. Aikojen saatossa on kokeiltu paineaaltoihin ja mekaanisiin pumppusuuttimiin perustuvia ratkaisuja. Nykyisin tekniikaksi on vakioitunut dieselmoottoreihin kehitetyn common rail -järjestelmän tyyppinen rakenne. (3, s. 37 - 39.)

Yhteispainejärjestelmä, nopeasti toimivat uudet suuttimet sekä kehittyneet ohjainlaitteet ovat mahdollistaneet ruiskutuksen käyttämisen aivan uusilla tavoilla. Ruiskutusta voidaan jakaa osiin, ajoitusta voidaan muuttaa lähes ilman rajoituksia sekä paineen avulla säätää myös ruiskutuksen pituutta.

Käytettäessä nestemäisen polttoaineen ruiskutuksessa on käytössä kaksi perustapausta. Ensimmäisessä ruiskutustavassa pyritään mahdollisimman tasaiseen seokseen, toisessa tavassa pyritään saamaan kaksijakoinen seos, jossa palava osa on vain tulpan läheisyydessä (3, s. 7).

Homogeenisessä ruiskutuksessa polttoaine ruiskutetaan palotilaan imutahdin aikana. Tällä tavalla saadaan mahdollisimman pitkä seoksenmuodostusaika ja tasaisesti sekoittunut seos. Seos ja palotapahtuma ovat hyvin samanlaiset kuin imusarjaruiskutteisessakin moottorissa. (3, s. 17.)

Jaetun seoksen ruiskutustavassa pyritään saamaan aikaan mahdollisimman selkeästi kahteen osaan jakautunut seos. Sytytystulpan läheisyyteen pyritään muodostamaan mahdollisimman homogeeninen ja stökiometrinen seos. Tämän palavan seoksen ympärille jätetään puhtaasta ilmasta ja edellisen palotapahtuman palojäänteistä koostuva palamaton alue. (3, s. 17.)

Jaetun seoksen idea on välttää seoksen määrän rajoittamisen aiheuttamat ongelmat. Jaetun seoksen tilassa kaasuläppä pidetään täysin avattuna, jolloin vältetään pumppaushäviöitä ja saadaan sylinteriin suurempi täytös ja korkeampi puristuksen alku paine. Polttoaine ruiskutetaan puristuksen loppuvaiheessa, jolloin polttoaine ei ehdi sekoittua koko ilmamäärään, vaan palavan seoksen alue on suhteellisen pieni ja seoksen ympärillä on puhdasta ilmaa. (3, s.17.)

Pienellä seostilavuudella saavutetaan pieni vääntömomentti, mutta korkeampi puristuksen loppupaine. Puhtaan ilman lämmöneristysvaikutus ja ilman laajeneminen parantavat termistä hyötysuhdetta merkittävästi. (3, s. 8.)

Seos on pienellä alueella lähes stökiometrinen, mutta ympärillä oleva puhdas ilma tekee seoksesta kokonaisuudessaan erittäin laihan. Suuri happylimäärä aiheuttaa suuret typpioksidipäästöt, joiden takia joudutaan käyttämään erillistä typenoksidikatalysaattoria.

Lisäksi voidaan myös käyttää näiden tapojen yhdistelmää, jossa osa bensiinistä ruiskutetaan imutahdin aikana ja osa puristustahdin aikana. Jälkimmäinen ruiskutus voi myös tapahtua työtahdin aikana palotapahtuman alkamisen jälkeen.

Osittain jaetulla seoksella voidaan vaikuttaa pakokaasupäästöjen kehittymiseen ja puhdistuslaitteiden toimintaan. Ruiskuttamalla imutahdin aikana vain pieni määrä polttoainetta saadaan hitaasti palava laiha seos. Ruiskuttamalla tähän palavaan seokseen lisää polttoainetta työtahdin loppuvaiheessa saavutetaan korkeat pakokaasun lämpötila. Korkean lämpötilan avulla katalysaattori saadaan toimimaan nopeammin kylmäkäynnistyksen jälkeen (3, s. 72).

3.3 Saavutettavat hyödyt

Suoraruiskutuksella saavutetaan sekä suoria että epäsuoria hyötyjä. Suoria hyötyjä saavutetaan paremman seoksen hallinnan avulla. Tarkemman seoksen hallinnan avulla saadaan moottorin hyötysuhdetta parannettua ja päästöjä pienennettyä.

Suoraruiskutuksen avulla seoksenmuodostusta voidaan ohjata aina sytytyskipinään asti. Palotilan muotoilun avulla seoksen muodostuminen ja liikkeet palotilassa voidaan ennakoida, jolloin on mahdollista muodostaa jaettu seoksia. Venttiilien ajoituksesta riippumaton seoksenmuodostus mahdollistaa myös laajemmat venttiilien säätöalueet ilman vaaraa siitä, että palamatonta polttoainetta pääsisi poistumaan palotilasta. (3, s. 5.)

Moottorin hyötysuhdetta voidaan myös nostaa käyttämällä ahtamista tai korkeampia puristussuhteita. Suurin ongelma puristussuhdetta nostettaessa tai moottoria ahtaessa on moottorin taipumusnakutukseen. Polttoaineen höyrystyminen vasta palotilassa alentaa seoksen lämpötilaa ja nakutusherkkyyttä. Myös mahdollisuus muodostaa seos juuri ennen sytytystä pienentää nakutusherkkyyttä (3, s. 68).

Epäsuorasti ruiskutuksen siirtäminen palotilan sisään mahdollistaa venttiilien ajoituksen säätämisen vapaammin ja lisäksi myös imukanavien suunnittelu voidaan tehdä vapaammin. Imukanavat voidaan suunnitella niin, että saavutetaan mahdollisimman hyvä täytös. Ennen imukanavien suunnittelussa täytyi ottaa huomioon myös polttoaineen siirtyminen ja sekoittuminen, mutta nyt voidaan keskittyä täysin täytöksen maksimointiin. (3, s. 8.)

Myös virtausta vastustavat suuttimet poistuvat imukanavasta ja sisäistä EGR-toimintoa voidaan hyödyntää vapaammin, kun polttoaine ei pääse pakokanavaan ja paremman seoksenhallinnan avulla voidaan käyttää suurempia EGR-suhteita (4, s. 163).

3.4 Haasteet

Suoralla palotilaan ruiskutuksella on myös joitakin haittapuolia. Seoksen hallinta sylinterissä on huomattavasti vaikeampaa kuin seoksen hallinta imusarjassa. Moottorin kierrosnopeuden ja kuormituksen muutokset aiheuttavat muutoksia seoksen käyttäytymiseen palotilassa. Erityisesti kuormitustilanteiden muuttuessa moottoriohjaukselta vaaditaan suurempaa tarkkuutta ja monimutkaisempia säätöalgoritmeja. (3, s. 9–10.)

Jaetun seoksen tilanteessa ongelmat korostuvat pienillä moottorin kuormitustasoilla, koska pienillä kuormitustasoilla tarvitaan vain vähän polttoainetta ja palavan seoksen alue muodostuu hyvin pieneksi. Pieni palavan seoksen alue on vaikea saada osumaan hyvin tarkasti juuri sytytystulpan kohdalle juuri sytytysketkellä. Pienikin virhe ajoituksessa aiheuttaa seoksen huonoa palamista tai täydellisen palamattomuuden. Tästä on seurauksena epätasainen käynti, huono polttoainetalous ja suuret hiilivetypitoisuudet pakokaasuissa. (4, s. 163.)

Tilannetta voidaan osittain helpottaa jakamalla ruiskutus kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa ruiskutetaan pieni määrä polttoainetta imutahdin aikana ja toisessa vaiheessa ruiskutetaan loput tarvittavasta polttoaineesta juuri oikealla hetkellä, puristustahdin aikana. Näin saadussa seoksessa rikas, hyvin syttyvä seos saadaan lähelle sytytystulppaa ja ympärille hieman laihempi seos. Laajemmalle levinnyt seos parantaa syttymisen todennäköisyyttä ja rikkaamman seoksen alue nopeuttaa palamista ja varmistaa laihemman seoksen täydellisen palamisen.

Kahdella ruiskutuksella tehtävää jaettua seosta käytetään etenkin homogeenisen ja jaetun tilan välillä, kun siirrytään tilasta toiseen. Kahden suihkutuksen malli helpottaa siirtymistä ja tekee siitä käyttäjälle huomaamattomamman.

Järjestelmä on myös imusarjaruiskutukseen verrattuna monimutkaisempi. Tarvittavan suuren polttoineen paineen kehittäminen vaatii enemmän energiaa ja käytettyjen komponenttien valmistus on suurempien tarkkuusvaatimusten johdosta kalliimpaa. Tuotekehityskuluihin täytyy myös lisätä pidemmät säätöjaksot parametrien määrän kasvamisen johdosta ja suurempaa tarkkuutta vaativa palotilan suunnittelu.

4 SUORARUISKUTUSJÄRJESTELMÄN OHJAUS

Ruiskutuksen ajoituksen suurentunut tarkkuusvaatimus ja ruiskutuksen pituudensäätö lisäävät vaatimuksia ruiskutuksen ohjaukselle. Myös ohjattavien komponenttien määrä on suurempi suoraruiskutuksen tapauksessa. Ohjainlaitteelta vaaditaan suurempaa laskentakykyä, jotta muuttuviin kuormitustilanteisiin voidaan mukautua nopeasti.

4.1 Korkeapainepumppu

Suoraruiskutuksessa käytetään huomattavasti suurempia polttoaineen paineita verrattuna imusarjaruiskutukseen. 100–200 bar:n välillä olevan polttoaineen paineen kehittäminen sähköpumpulla ei ole enää järkevää, vaan vaaditaan erityinen mäntäpumppu, joka ottaa käyttövoimansa suoraan moottorista.

Korkeiden painetasojen takia järjestelmässä ei yleensä käytetä paluukiertoa. Paluukierron poistaminen yksinkertaistaa polttoainelinjastoja ja pienentää korkeapainepumpun energian tarvetta. Paineen alentaminen ruiskutus paineesta takaisin säiliön paineeseen siirtää paineen alentamisesta vapautuvan energian polttoaineeseen, jolloin polttoaine lämpenee. Lämpeneminen nopeuttaa polttoaineen höyrystymistä ja kasvattaa polttoaine säiliöstä vapautuvien hiilivetyjen määrää.

Suoraruiskutusjärjestelmissä painetta on voitava myös muuttaa nopeasti kuormitustilan muutoksien mukaan. Painetta muuttamalla vaikutetaan suuttimen läpi aikayksikössä virtaavan polttoaineen määrään. Pienentämällä polttoaineen painetta voidaan saman polttoaineannoksen ruiskutusaikaa kasvattaa, jotta sama polttoainemäärä voitaisiin sekoittaa suurempaan ilmamäärään.

Suurilla paineilla saavutetaan parempi polttoaineen pisaroituminen, nopeampi seoksenmuodostus sekä pienemmät hiilivety päästöt. Suurella paineella tehty ruiskutus vaatii kuitenkin riittävän polttoainemäärän, sillä pienillä määrillä ruisku-

tusaika jää lyhyeksi ja seoksen alue pieneksi. Jaetuilla seoksilla ajoitusvaatimusten ollessa suurimmillaan vaaditaan erityisen hyvää paineen säätötarkkuutta.

Korkeapainepumppua käytetään Boschin järjestelmässä nokka-akseliin tehtyjen ylimääräisten nokkien avulla. Polttoainejärjestelmässä ei ole paluuvirtausta tai paineensäädintä, vaan polttoaineen paineensäätö perustuu jakokiskoon pumpattavan polttoainetilavuuden säätöön.

Kuvassa 3 on Boschin HDP 5 -pumppu, joka on myös käytössä Hyundaiin moottorissa. Kuvassa erottuu hyvin pumpun ohjaamiseen käytettävä venttiili, polttoaineen tulo- ja lähtöliitännät sekä pumpun käyttötanko ja palautusjousi.



KUVA 3. HDP 5 -korkeapainepumppu (5)

Moottorinohjainlaitteeseen on ohjelmoitu nokka-akselilla olevien nokkien muoto, ajoitus sekä pumpun pumppaustilavuus. Ohjainlaite laskee oikean pumpun aktiivointihetken edellisessä ruiskutuksessa kulutetun polttoainemäärän perusteella. Mikäli painetta ei tarvitse muuttaa, pyritään pumpulla vain korvaamaan ruiskutuksessa kulunut polttoainemäärä.

Paineen lisääminen toteutetaan pumppaamalla polttoainetta enemmän kuin edellisessä ruiskutuksessa kului, ja paineen pienentäminen toteutetaan pumppaamalla sitä pienempi määrä tai lopettamalla pumppaaminen kokonaan.

Pumpun tilavuuden säätö perustuu magneettiventtiiliohjaukseen, ja jos venttiiliä ei aktivoida ohjausvirran avulla, Boschin järjestelmässä pumppaustilavuus on nolla. On olemassa myös pumppuja, jotka toimivat päinvastoin eli ne vaativat ohjaussignaalin tilavuuden pienentämiseksi.

Pumpuissa on myös mekaaninen paineen rajoitusventtiili, joka rajoittaa paineen asetettuun arvoon ja estää komponenttien vioittumisen vikatilanteissa.

Boschin järjestelmässä ohjausventtiili sulkee pumpun sisäisen paluukanavan. Paluukanava suljetaan pumpun työtahdin aikana. Sulkemisen jälkeen paluukanavaa ei voida avata, ennen kuin pumpun mäntä aloittaa paluuliikkeen. Polttoainetta siirtyy korkeapainekiskoon venttiilin sulkemishetkestä jäljellä olevan iskunpituuden mukainen tilavuus. Mitä suurempi polttoaineen vaadittava tilavuusvirta on, sitä aikaisemmin noston alkaessa ohitusventtiili suljetaan.

4.2 Korkeapainesuuttimet

Hyundain moottorissa käytetään Boschin valmistamia korkeapainesuuttimia. Suuttimien ohjaukseen vaaditaan erityinen ohjauselektroniikka. Perinteinen tapa, jossa käytetään akkujännitettä, ei ole riittävä suoraruiskutus-suuttimille. Suuremman ajoitustarkkuusvaatimuksen johdosta suuttimen avautumisaika on saatava lyhemmäksi kuin perinteisellä tekniikalla on mahdollista.

Kuvasta 4 voidaan havaita, että suuttimen rakenne on selvästi erilainen kuin imusarjaan tarkoitettussa suuttimessa. Rakenteen muutokset helpottavat suuttimen sijoittamista moottorin kanteen.



KUVA 4. HDEV 5 -korkeapainesuutin (6)

Suuttimen ohjaamiseen käytetään kahta erillistä jännitettä. Ensimmäisessä vaiheessa suuttimen solenoidiin ohjataan noin 70 V booster-jännite ja toisessa vaiheessa käytetään akkujännitettä suurivirtaisena piikkinä. Tämän vaiheen jälkeen suutin on auki ja sitä voidaan pitää avoinna matalalla virralla. Koko suuttimen avaus prosessi kestää vain 700–800 us.

Nopea suuttimen avautuminen mahdollistaa tarkemman polttoaineen annostelun, koska suutin on lineaarinen myös pienillä virtausmäärillä. Tämä ominaisuus mahdollistaa suurikokoisten suuttimien käyttämisen, jolloin myös suurien polttoainemäärien ruiskuttaminen on riittävän nopeaa.

Suutin on rakenteeltaan sisäänpäin aukeavalla neulalla varustettu monireikäinen suutin. Suuttimen ruiskutuskuvio ja reikien määrä voidaan räätälöidä tarvetta vastaavaksi, ja samoin suuttimen virtaus voidaan sovittaa asiakaskohtaisesti.

Palotilan ja suuttimen ruiskun muodolla on erittäin suuri merkitys järjestelmän toimivuuden kannalta. Ruiskun suunta ja muoto täytyy sovittaa niin, ettei polttoaine osu sylinterin seinämiin tai mäntään vaan sekoittuu hyvin sylinterissä olevaan ilmamassaan.

Tarkkojen vaatimusten takia suuttimet valmistetaan asiakaskohtaisesti. Kaikki suuttimen parametrit voidaan sovittaa ja muokata moottoria vastaaviksi. Esimerkiksi suuttimien ruiskutuskuvion muoto, reikien määrä, ruiskun suunta ja suuttimien virtaus voidaan räätälöidä asiakaskohtaisesti.

5 HYUNDAI G4FJ -MOOTTORI

Työssä käytetty moottori on Hyundain valmistama neljäsynterinen turboahtimella, välijäähdytyksellä ja polttoaineen suoraruiskutuksella varustettu 1,6-litran henkilöauton moottori. Moottori on Hyundain ensimmäinen suoraruiskutteinen turboahdettu moottori, ja se on käytössä myös Kia-henkilöautoissa.

Moottorin yhden sylinterin tilavuus on 397,75 cm³, sylinterin poraus 77 mm, iskun pituus 92 mm ja kiertokangen pituus 131,8 mm. Moottorin puristussuhde on 9,5. Jokaisessa sylinterissä on kaksi imuventtiiliä ja kaksi pakoventtiiliä. Moottorissa on käytössä Hyundain CVVT -tekniikka, joka mahdollistaa sekä imu- että pakoventtiilien ajoituksen säätämisen portaattomasti toisistaan riippumatta (7, s. 23). Moottorin lohko, kansi ja öljypohja ovat alumiinivalua.

Moottori kuuluu Hyundain Gamma-moottoriperheeseen. Perheeseen kuuluu kuusi moottoria. Moottoreista viisi on 1,6-litraisia ja yksi 1,4-litrainen. Moottoreiden perus konstruktio on sama ja suurimmat eroavaisuudet ovat polttoaineen ruiskutuksessa ja ahtamisessa.

Moottorisarjaan kuuluvat muut moottorityypit ovat

- G4FD-moottori, joka on varustettu polttoaineen suoraruiskutuksella ilman turboahdinta
- G4FC- ja G4FG-moottorit, jotka on varustettu imusarja ruiskutuksella ilman turboahdinta
- L4FC-moottori on erikoismalli, joka on tarkoitettu hybridiratkaisuihin, sisältää sähkömoottorin ja on suunniteltu toimimaan LPG-kaasulla.

Polttoaineen ruiskutuksen ohjaus on Hyundain Boschin lisenssillä valmistama Motronic-järjestelmä. Laitteistoon kuuluu neljä suoraan palotilaan ruiskuttavaa korkeapainesuutinta, yksimäntäinen säädettävä tuottoinen korkeapainepumppu, kaikille suuttimille yhteinen polttoaineen jakokisko, polttoaineen paineen tunnistin ja tankkiin sijoitettu siirtopumppu. Järjestelmässä ei ole polttoaineen paluu-kiertoa.

Suuttimet ovat Boschin valmistamat HDEV 5.1 -tyyppiset kuusireikäiset korkeapainesuuttimet. Suuttimet on sijoitettu imuventtiilien alapuolelle 22 asteen kulmaan sylinterikannen tasoon nähden. Ruiskutus tapahtuu sylinterinseinämä ohjautusti mäntään päin. Suuttimille suunniteltu suurin polttoaineen paine on 150 bar ja suurin korkeapainepumpulla saavutettava paine on 200 bar.

Korkeapaine pumpun suojaventtiili aukeaa 200 bar paineessa ja estää paineen nostamisen korkeammalle. Suojaventtiilin avulla estetään hallitsematon paineen nousu vikatilanteessa.

Ahdin järjestelmään kuuluu Koreassa valmistettu, jaetulla pakopesällä varustettu ns. Twin Scroll -turboahdin. Turbiinikotelo ja pakosarja on valettu samaksi kappaleeksi. Ahtopaineen säätöön käytetään sähköpneumaattisesti ohjattua turbiinikoteloon rakennettua hukkaporttia. Järjestelmä sisältää myös alumiinisen ilmasta ilmaan välijäädyttimen, jonka yhteyteen on rakennettu ahtopaineen mittausta ja sähköpneumaattinen bypass-venttiili.

6 TYÖSSÄ KÄYTETTY MOOTTORINOHJAINJÄRJESTELMÄ

Tässä työssä moottorin ohjaamiseen käytettiin Motecin valmistamia ohjainlaitteita. Moottorinohjainlaitteena oli Motecin M182 ECU ja lambda-anturin ohjaukseen käytettiin Motecin LTCD-lambda-ohjainta.

6.1 Motec M182 ECU

M182 kuuluu Motecin M1-ohjainlaitesarjaan ja se on Motecin monipuolisin suoraruiskutuksen ohjaamiseen tarkoitettu ohjainlaite. Laitteella voidaan myös tietyn rajoituksen ohjata normaalia imusarjuiskutteista moottoria.

Ohjainlaite mahdollistaa ilman lisälaitteita suoraruiskutussuuttimen ohjaamisen, ja se sisältää myös tarvittavat lähdöt ja tulot korkeapaine pumpun ohjaamiseen. Laitteessa on lisäksi useita vapaasti ohjelmoitavia lähtöjä sekä tuloja, joita voidaan käyttää moottorin oheislaitteiden ja antureiden ohjaamiseen.

Moottorinohjain on saatavana kolmella erilaisella ohjelmistoversiolla:

- Locked-tason ohjelmistolisenssi mahdollistaa ohjaimen käytön vain yhdessä moottorityypissä. Käyttäjän on mahdollista säätää joitakin parametreja, mutta toimintojen muuttaminen ei ole mahdollista.
- Standard-lisenssi mahdollistaa saman ohjainlaitteen käyttämisen useissa erilaisissa moottoreissa. Ohjaimen voidaan ladata valmiita eri moottoreille tarkoitettuja paketteja.
- Open-lisenssi mahdollistaa kaikki edelliset ominaisuudet, ja lisäksi käyttäjä voi vapaasti muokata saatavilla olevia valmiita paketteja mieleisekseen.

Tässä työssä käytettävissä oli Open-tyyppinen lisenssi, jolloin ohjelmistoa voitiin myös muokata tarpeen mukaan. Vapaan lisenssin avulla voitiin käyttää pohjana valmista suoraruiskutusauton ohjelmaa ja muokata se sopivaksi käytetyn moottorin ominaisuuksiin. Muokkaaminen oli välttämätöntä, koska kyseiselle moottorille ei ollut saatavana valmista pakettia.

6.2 Motec LTCD

Motecin M1-sarjan moottorinohjaimissa ei ole sisäistä laajakaista lambda-anturin ohjainta. Laajakaista lambda-anturia varten tarvitaan erillinen ohjain, joko LTC tai PLM.

LTCD on Motecin valmistama laajakaista lambda-ohjain Boschin LSU4.9-tyyppisille lambda-antureille. Ohjaimesta on kaksi versiota: LTC yhdelle anturille ja LTCD kahdelle anturille.

Laite kytketään moottorinohjaimen CAN-väylään, ja se lähettää anturin mittaus-tuloksen väylää pitkin moottorinohjaimelle. Kahden anturin versio näkyy väylällä yksinkertaisesti kahtena eri anturina.

Laajakaista lambda-anturi on välttämätön mittalaite moottoria säädettäessä. Anturin avulla voidaan nopeasti nähdä pakokaasun happipitoisuuden muutokset, jotka kertovat seossuhteen muutoksista. Laajakaistainen anturi pystyy näyttämään lambda-arvot 0,65–10.

Anturia käytetään myös varsinaisen säätötoimenpiteen jälkeen pitämään seos haluttuna ympäristömuuttujista huolimatta. Moottorinohjaimen laaditaan lambda aim -kartta, jonka perusteella moottorinohjain automaattisesti korjaa seosta, jos se ei ole kartan mukainen.

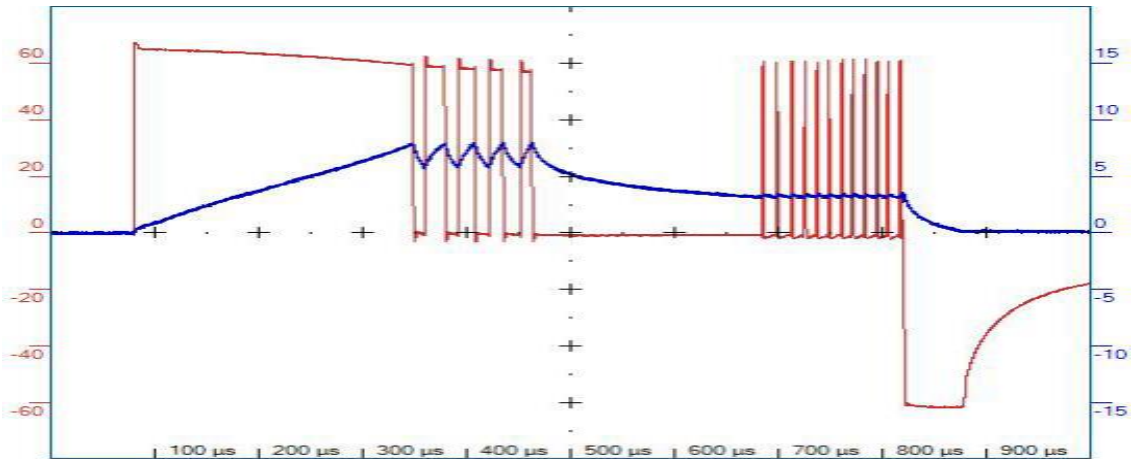
7 PARAMETRISOINTI

Suoraruiskutusmoottorin ohjaamiseen tarvitaan joitakin parametreja, joita ei välttämättä tarvita imusarjaruiskutteisessa moottorissa. Tämän osion tarkoituksena on selventää tärkeimpiä arvoja, jotka tarvitaan ennen kuin moottoria voidaan alkaa säätämään. Osa parametreista täytyy selvittää ennen moottorin käynnistämistä, mutta osa voidaan säätää kohdalleen vasta kun moottori on saatu käynnistymään.

7.1 Suuttimien ohjaukseen vaadittavat parametrit

Korkeapainesuuttimien ohjaamiseen vaaditaan erityinen avausjännitepulssi. Jännitepulssin virta- ja jännite-arvot täytyy asettaa ennen kuin moottoria voidaan käynnistää. Väärät parametrit voivat aiheuttaa ongelmia säädön aikana tai rikkoa suuttimen.

Kuvassa 5 nähdään suuttimelta mitattu ohjauspulssi. Suutinta avattaessa sinne johdetaan ensin Booster-jännite, jolloin suuttimen virta lähtee nopeasti nousemaan. Toisessa vaiheessa Booster-jännitettä katkomalla pidetään suuttimen virta halutuissa raja-arvoissa jotka määritetään peak current -parametreilla. Virta pidetään peak-arvossa peak time -parametrilla määritellyn ajan. Tämän jälkeen siirrytään hold-tilaan, jossa suutinta pidetään auki halutun ruiskutusmäärän saavuttamiseksi. Vaiheiden välillä suutin pidetään maadoitettuna, kunnes virta laskee hold current -parametrin alapuolelle.



KUVA 5. Suuttimen jännite (punainen) ja virta (sininen)

Motecin ohjainlaitteen parametrit on määritelty hieman eri tavalla verrattuna Boschin ilmoittamiin suositusarvoihin. Peak- ja booster-virtojen määrittämiseen käytetään samaa peak current -parametria. Booster-aikaa ei voida erikseen säätää vaan booster- ja peak-vaiheet on yhdistetty peak time -parametriin.

Kuvasta 5 voidaan myös havaita, ettei Motec käytä hold-tilassa akkujännitettä vaan booster-jännitettä. HDEV 5.1-suuttimen ohjearvoissa mainitaan hold-tilan käyttöjännitteeksi 12 V. Tällä ei ole vaikutusta suuttimen toimintaan, koska virta on joka tapauksessa rajoitettu ohjearvoihin.

Taulukossa 1 on esitetty Boschin HDEV -suuttimelle ilmoittamat arvot ja käytetyt Motecin parametrit. Motecin parametrit perustuvat Motecilta saatuihin suositusarvoihin. Motecin ohjauspulssin toteutuksesta johtuen arvoja ei voida suoraan siirtää suuttimen data lehdeltä ohjainyksikköön.

TAULUKKO 1. Suuttimien Boschin ilmoittamat ja käytetyt parametrit (6; 8)

Parametri	Bosch	Motec	
		min	max
Booster jännite	65 - 90 V	65 V	
Booster virta	8,5 - 12 A		
Peak virta	4,8 - 7,1 A	6 A	8 A
Hold virta	2,5 - 3,1 A	3,0 A	3,1 A
Booster aika	355 - 440 µs		
Peak aika	145 - 160 µs	340 µs	

Toinen suuttimen ohjaukseen tarvittava arvo on suuttimen virtaus. Koska käytävä kiskopaine ei ole vakio, tarvitaan moottorinohjaimen virtausarvon lisäksi myös tieto siitä, millä paineella kyseinen virtausarvo on saavutettu. Moottorinohjain osaa laskea suuttimen tuoton muutoksen paineen muuttuessa, joten tarvitaan vain virtausarvo yhdessä pisteessä.

Tässä tapauksessa suuttimien tietoja ei löydetty, joten käynnistyksessä käytettiin arvioitua 15 ml/s ja 10 MPa arvoa. Lopullinen virtausarvo voidaan selvittää mitatun ja lasketun ilmamassan erosta.

Mittaus suoritetaan ajamalla moottoria noin 60 % kuormituksella ja tarkkailemalla moottorinohjaimen ilmoittamaa laskennallista ilmamassaa ja ilmamassamittarilla mitattua ilmamassaa. Jos arvot eivät ole samat, on suuttimen virtausarvo virheellinen.

Laskennallisen ilmamassan arvon ollessa suurempi kuin mitattu täytyy suuttimien kokoarvoa pienentää ja vastakkaisessa tapauksessa suurentaa. Kokeilemalla haetaan arvo, jossa ilmamassat ovat yhtä suuret. Mittaamalla lopulliseksi suuttimen virtausarvoksi saatiin 18 ml/s 10 MPa:n paineella.

7.2 Korkeapainekiskon paineanturin parametrit

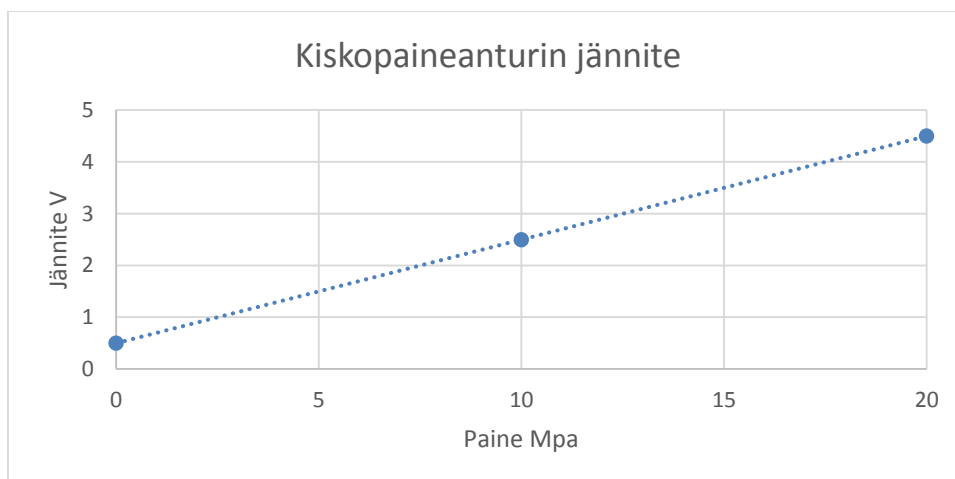
Ennen kuin moottoria voidaan alkaa käynnistämään tai korkeapainepumppua säätämään, täytyy korkeapainekiskoon sijoitetun paineanturin lähettämä jänniteviesti muuttua painetiedoksi. Paine tieto on suoraruiskutusmoottorissa erittäin tärkeässä roolissa, ja koko korkeapainepumpun ohjaus perustuu tämän arvon tarkkailuun. Suuttimien tuotto riippuu myös merkittävästi kiskopaineesta.

Yleensä imusarjuiskutteisessa moottorissa kiskopaine pyritään pitämään vakiona, koska se helpottaa ruiskutettavan polttoainemäärän laskemista. Suoraruiskutusmoottorissa ruiskutusmäärän lisäksi myös ruiskutukseen kuluvalle ajalle on suuri merkitys. Ruiskutusaikaa voidaan säätää muuttamalla kiskopainetta, jolloin suuttimien tuotto muuttuu. Suuremmalla paineella suuttimesta virtaa enemmän polttoainetta samassa ajassa ja ruiskutusaikaa voidaan lyhentää.

Suuttimien aukioloaika lasketaan joka ruiskutukselle sen hetkisen kiskopaineen ilmoitetun virtausarvon ja halutun ruiskutusmäärän perusteella. Jos painetietoa ei ole, tarvittavaa ruiskutusaikaa ei voida laskea.

Moottorinohjaimen tarvitaan käyrä, jonka perusteella ohjain muuttaa mitatun jännitearvon painearvoksi. Tämä käyrä voidaan mitata, jos käytössä on käyvä moottori ja sopivat kiskopaineen mittausräätit tai se voidaan ottaa paineanturin datalehdeltä, jos sellainen on saatavilla.

Tässä tapauksessa käytettävissä oli Hyundain huolto-ohjekirja, josta tarvittava tieto löytyi. Huolto-ohjeessa on ilmoitettu anturin signaalijännite kolmella eri paineen arvolla, joiden perusteella tarvittava käyrä voidaan piirtää. Kuvassa 6 on esitetty paineanturin lähtöjännitteen riippuvuus paineesta.



KUVA 6. Kiskopaineanturin lähtöjännitteen riippuvuus paineesta (9)

Koska käyrä on lineaarinen, voidaan se syöttää moottorin ohjaimen kahden pisteen avulla. Tarvittavat pisteet ovat 0 Mpa 0,5 V ja 20 Mpa 4,5 V.

7.3 Korkeapainepumpun ohjaukseen vaadittavat parametrit

Korkeapainepumpun ohjaamiseen tarvitaan useita parametreja. Tärkeimpiä tietoja ovat pumpun tuotto iskua kohti, pumpun ajoitus, pumpun ohjaustapa ja pumppua käyttävän nokan muoto.

Osa arvoista vaatii hienosäätöä moottorin käynnistämisen jälkeen, ja osaa arvoista ei voida mitata riittävällä tarkkuudella ennen moottorin käynnistämistä. Arvojen hienosäätämistä käynnistyksen jälkeen käsitellään viimeisessä kohdassa.

7.3.1 Perusparametrit

Perusparametreihin kuuluvat sellaiset arvot, jotka voidaan selvittää yksiselitteisesti, eikä niihin tarvitse tehdä muutoksia säädön aikana. Perusparametrit ovat kuitenkin erittäin tärkeitä, ja moottorin käynnistäminen tai pumpun muiden arvojen säätäminen on mahdotonta ennen näiden parametrien asettamista.

Parametrit voidaan jakaa moottorista riippuviin ja korkeapainepumpusta riippuviin parametreihin. Osa parametreista riippuu myös siitä, miten pumpun ohjaus on kytketty moottorinohjaimen.

Moottorista riippuvia parametreja ovat

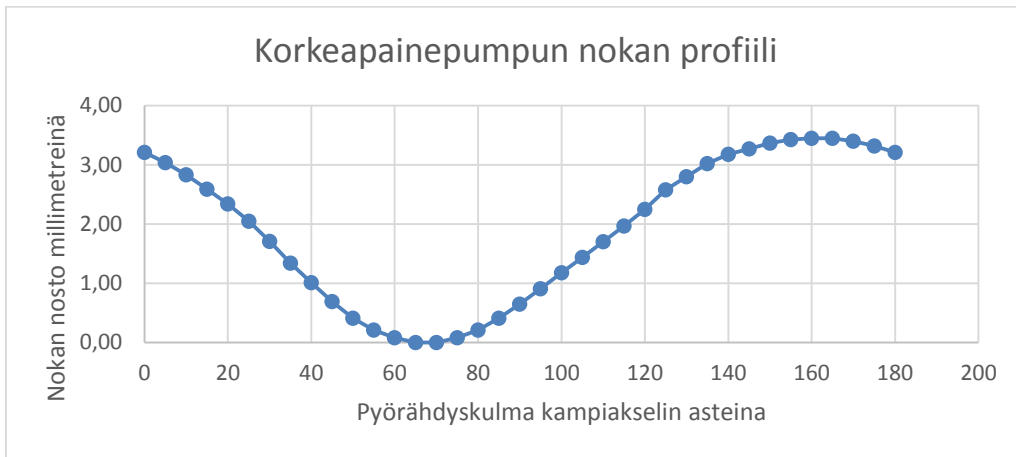
- Nokkien määrä (camshaft lobes) -parametrilla ilmoitetaan moottorinohjaimelle, kuinka monta nokkaa pumppua käyttävässä akselissa on. Arvon perusteella moottorinohjain laskee tarvittavien ohjauspulssien määrän.
- Nokkien välinen kulma (camshaft lobe pitch) -parametria voidaan käyttää nokkien määrän ilmoittamisen sijaan ilmoittamaan nokkien välinen kulma-arvo. Jos nokkien määrä -parametri on annettu, ei tätä parametria tarvita ja arvo voidaan asettaa nolaksi.
- Korkeapainepumpun käyttöakseli (camshaft phase source) -parametri ilmoittaa moottorinohjaimelle, mistä korkeapainepumppu saa käyttövoimansa. Vaihtoehtoja ovat ensimmäisen tai toisen lohkon imu- tai pakonokka-akseli, erillinen käyttöakseli tai kampiakseli. Arvo on erittäin tärkeä, koska sen perusteella valitaan signaali, johon pumpun toiminta tahdistetaan.
- Polariteetti (polarity) -parametrin avulla ilmoitetaan moottorinohjaimelle, mihin tilaan valittu lähtö täytyy asettaa, jotta pumppu aktivoituu. Lähes

kaikissa tapauksissa valitaan normal-asetus, mutta inverting-asetusta voidaan tarvita, jos käytetään erillistä pumpunohjausvahvistinta.

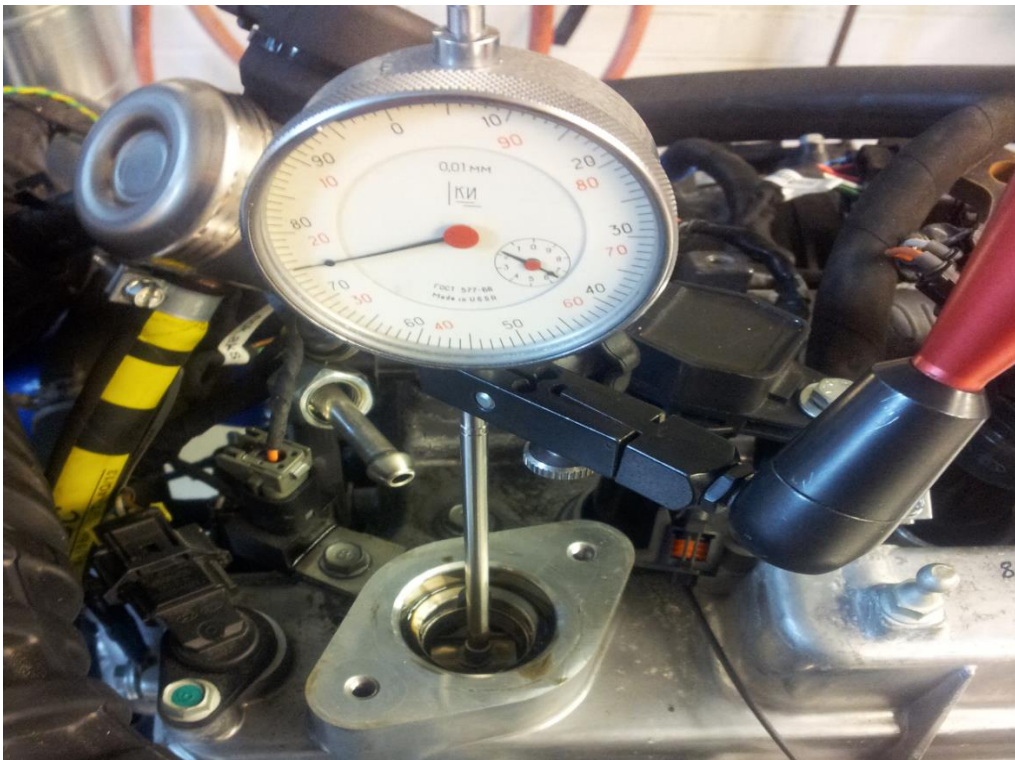
- Pumpun tyyppi (type) -parametrilla ilmoitetaan moottorinohjaimelle käytettävän pumpun toimintatyyppi. Vaihtoehtoina ovat normaalisti avoin (normaly open) tai normaalisti suljettu (normaly closed). Normaalisti avoin pumppu vaatii ohjaussignaalin korkeapaineen tuottamiseen ja normaalisti suljettu pumppu vaatii ohjaussignaalin tuoton lopettamiseksi. Väärin valittu tyyppi saattaa rikkoa pumpun, koska signaali saattaa jumitua aktiiviseen tilaan ylipaineen takia.
- Matalapaineen aikakatkaus (low pressure timeout) -parametri asettaa maksimiajan, jonka pumpunohjauslogiikka pysyy matalapainetilassa käynnistyksen yhteydessä. Matalapainetilassa ohjaussignaali on jatkuvasti aktiivisessa tilassa, jotta kiskopaine nousisi mahdollisimman nopeasti. Matalapainetilasta poistutaan, jos paine saavuttaa tavoitearvon tai maksimiaika ylittyy. Aika-arvolla suojellaan pumppua jos järjestelmään tulee vika, joka estää paineen normaalin nousun.

7.3.2 Pumpun ennako (Delivery angle)

Ensimmäisessä vaiheessa täytyy mitata pumppua käyttävän nokan muoto. Nokan muoto vaikuttaa pumpun ajoituksen säätöön ja pumpusta saatavaan tuotoon. Kuvassa 7 on esitetty moottorista mitattu nokan profiili ja kuvassa 8 mittausjärjestely. Mittauksessa käytettiin lisäksi apuna astelevyä, jonka avulla kampiakselia pyöritettiin 5 astetta jokaisen mittauksen välillä.



KUVA 7. Mitattu korkeapaineumpun nokan profiili



KUVA 8. Korkeapaineumpun nokan profiilin mittaus

Mittausten perusteella nokan kokonaisnosto on 3,45 mm. Boschin HDP5-umpun männän halkaisija on 9 mm, joten yhden nokan maksimituotto voidaan laskea kaavalla 1 (8).

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * h = \pi * \left(\frac{9\text{mm}}{2}\right)^2 * 3,45\text{mm} = 219,5\text{mm}^3 \quad \text{KAAVA 1}$$

V = pumpun tuotto yhdellä nostolla (mm^3)

d = pumpun männän halkaisija (mm)

h = maksiminoston pituus (mm)

Seuraavaksi laaditaan pumpunohjaukseen vaadittava delivery angle -käyrä. Käyrä kertoo moottorinohjaimelle nokan profiilin muodon ja moottorinohjain laskee sen perusteella pumpun aktivointihetken.

Käyrään tarvitaan kampiakselin astekulma ja sitä vastaava pumpun noston pituus prosentteina kokonaisnostosta. Mitatut arvot vaativat siis hieman käsitteilyä, ennen kuin ne voidaan siirtää moottorinohjaimen. Ensin mitattu nosto muutettiin absoluuttiseksi nostoksi eli mitatuista arvoista vähennettiin pienimmän mittaustuloksen arvo. Seuraavaksi mittaustuloksista etsittiin profiilin nouseva reuna pienimmän mittaustuloksen kohdasta suurimpaan mittaustulokseen.

Pumpun nokkia on nokka-akselissa neljä kappaletta, joten jokaiselle moottorin kierrokselle tulee kaksi nostoa. Tästä ja mittaustuloksista voidaan päätellä, että yksi nokka on 180 astetta ja nouseva reuna 90 kampiakselin astetta. Mittaustuloksia katsottaessa on helppo huomata, että arvojen muutos 0–3,45 mm tapahtuu 90 asteen pyörähdysten aikana.

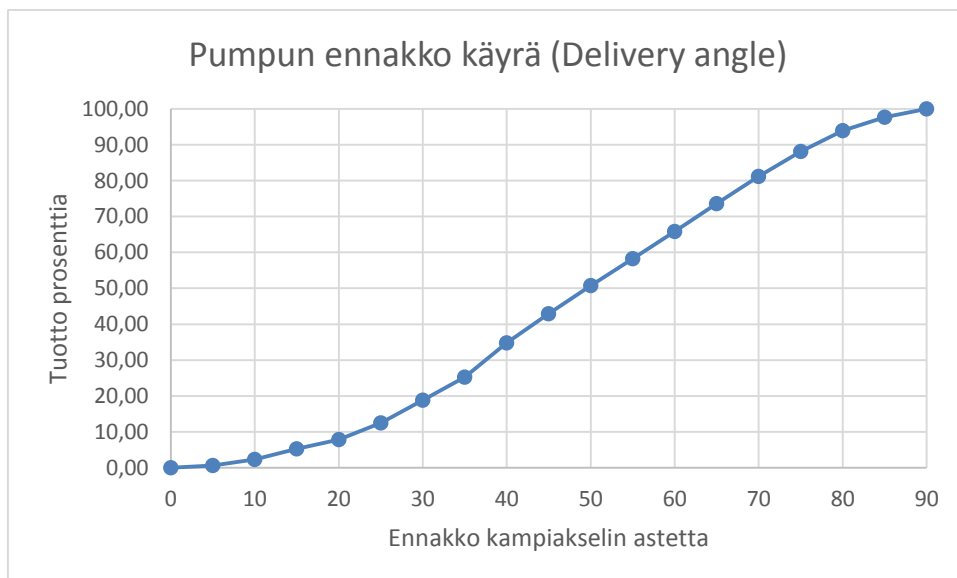
Alkuperäinen mittausdata on toteutettu mittaamalla nokan nosto moottorin ensimmäisen sylinterin yläkuolokohdasta lähtien. Kuvasta 9 voidaan havaita, että tässä pisteessä pumpun nokka on ollut lähes maksiminoston asennossa. Seuraava nouseva reuna alkaa 70 asteen kohdasta ja päättyy 160 asteen kohdalle. Tämä alue valittiin taulukon tekemiseen.

Nostoarvoja käsiteltäessä täytyy tietää, miten moottorinohjain käsittelee saatuja arvoja. Ohjaimelle annetaan offset-arvona pumpun nokan maksiminoston piste. Delivery angle -taulukko on ennakkotaulukko, jonka perusteella säädetään

pumpun aktivointiennakko ennen maksiminoston kohtaa. Maksimituotto saavutetaan mahdollisimman suurella ennakkolla, jolloin pumppu aktivoidaan lähellä miniminoston kohtaa.

Mittaus on suoritettu moottorin normaaliin pyörimissuuntaa, joten suurimman tuoton ennako arvo (90 asteen ennako, 100 % tuotto) on ensimmäinen mitta-arvo 0,00 mm 70 asteen kohdalla. Tämän perustiedon pohjalta voidaan rakentaa lopullinen taulukko.

Kuvassa 9 on esitetty mittaustuloksien perusteella generoitu Delivery angle -käyrä ja tätä käyrää käytettiin moottorin säädön alkuvaiheessa. Lopullinen käyrä saatiin moottorin säädön yhteydessä.



KUVA 9. Laskemalla saatu delivery angle -käyrä

7.3.3 Pumpun maksiminoston kohta (Offset)

Toinen ajoitukseen liittyvä arvo on ennakon offset-arvo. Offset-arvolla kerrotaan moottorinohjaimelle pumpun nokan maksiminoston paikka. Tämä arvo voi olla vaikea mitata, koska se ei ole suhteessa kampiakselin asentoon, vaan pump-

pua käyttävän nokka-akselin asentoon. Offset-arvo kertoo siis kampiakselin as- teina matkan pumpun maksiminoston pisteestä seuraavaan nokka-akselin pat- tern lock -pisteeseen.

Pattern lock -piste on nokka-akselin asentoanturin signaalin nouseva tai laskeva reuna riippuen valituista moottorin tahdistusparametreista. Koska offset-arvo on kohtalaisen vaikea mitata, on se helpompi selvittää kokeilemalla.

Offset-arvo vaikuttaa merkittävästi pumpun toiminnan vakauteen, mutta sen osuminen johonkin kohtaan nokan nousevaa reunaa riittää moottorin käynnistä- miseen. Moottorin käynnistyttyä arvo haetaan kohdalleen tarkkailemalla toteutu- nutta ja tavoiteltua kiskopainetta. Kun toteutunut paine pysyy mahdollisimman tasaisena ja lähellä tavoitepainetta, on arvo riittävän lähellä. Lopullinen hieno- säätö voidaan suorittaa, kun moottori on muilta osin saatu säädettyä.

7.3.4 Ohjauspulssin pituus (Peak pulse ja hold angle)

Pumpulle lähetettävän ohjauspulssin pituuteen voidaan vaikuttaa kahdella para- metrilla. Pulssi muodostuu kahdesta osasta, joista ensimmäisessä ohjausvirta pidetään kytkettynä tietyn ajanjakson ajan ja toisessa osassa virtaa pyritään ra- joittamaan katkomalla ohjaussignaalia.

Ensimmäisen osan pituuden määrittää peak pulse -parametri (taulukko 2). Tä- män osan tarkoitus on kasvattaa ohjausvirta mahdollisimman nopeasti ja akti- voida ohjausventtiili. Pulssin pituutta säädetään akkujännitteen perusteella. Ak- kujännitteen pienentyessä pulssin pituutta täytyy kasvattaa, jotta saavutetaan riittävä virta pumpun aktivoimiseksi. Suuremmalla akkujännitteellä pulssi on ly- hempi, ettei virta kasvaisi liian suureksi.

TAULUKKO 2. Korkeapainepumpun Peak pulse -arvot (8)

Akkujännite V	6,0	10,8	12,0	14,0	18,0
Pulssin pituus ms	2,6	1,6	1,4	1,3	1,0

Ensimmäisen pulssin pituus vaikuttaa pumpun aktivoitumiseen. Moottorinohjain olettaa pumpun aktivoituvan vasta ensimmäisen osan lopussa, joten signaalin pituus vaikuttaa myös pumpun ajoitukseen.

Toisen osan ominaisuuksiin vaikuttaa kaksi parametria, hold angle ja hold duty cycle. Hold angle -parametrilla (taulukko 3) säädetään pumpun aktiivisena pitopulssin pituutta. Pituusarvo annetaan millisekuntien sijasta kampiakselin asteina, joten todellinen pulssin pituus riippuu myös kierrosluvusta. Kierroslukuriippuvuutta on myös mahdollista säätää, koska parametri ilmoitetaan kaksiakselisena karttana, jonka toinen akseli on kierrosluku ja toinen akkujännite. Pituu-teen lasketaan mukaan myös ensimmäinen osa, eli jos ensimmäisen osan kiinteä pulssi on jollakin kierroslukuarvolla pidempi kuin hold angle-arvo, ei pitopulssia muodosteta ollenkaan.

TAULUKKO 3. Korkeapainepumpun hold angle -arvot (8)

	0 RPM	6000 RPM
16 V	40°	10°
10 V	40°	10°

Hold duty cycle -arvolla (taulukko 4) määritetään pitopulssin pulssisuhde. Pitopulssissa signaali ei ole kokoajan aktiivinen vaan sitä katkotaan virran kasvaminen estämiseksi. Pulssisuhteen arvolla voidaan säätää pitopulssin aikana vaikuttavaa virtaa. Liian pienellä pulssisuhteella virta ei riitä pitämään pumppua aktiivisena ja liian suuri arvo kuumentaa pumppua turhaan. Myös akkujännite vaikuttaa virransuuruuteen, joten pulssisuhteen arvoa säädetään akkujännitteen muutosten mukaan.

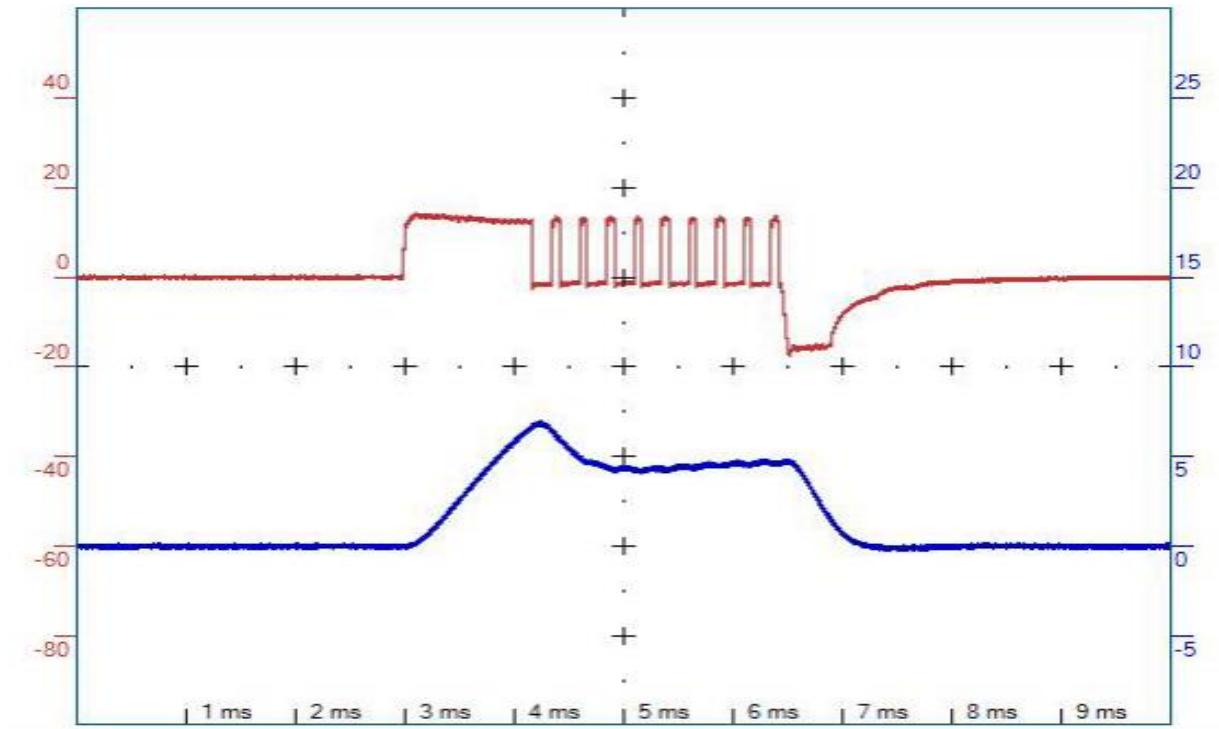
TAULUKKO 4. Korkeapainepumpun Hold duty cycle -arvot (8)

Akkujännite V	6,0	10,8	12,0	14,0	18,0
Pulssisuhde %	50,0	38,0	35,0	30,0	23,0

Kaikissa edellä mainituissa parametreissa käytettiin Motecin tälle pumpputyypille suosittelemia arvoja. Arvot todettiin mittausten aikana toimiviksi eikä niihin

nähty tarvetta puuttua. Erityyppistä pumppua käytettäessä parametreja joudutaan muuttamaan.

Kuvassa 10 on esitetty mitattu ohjauspulssi ja pumpun ohjausvirta. Jännite on ylempänä punaisella ja virta alhaalla sinisellä. Pulssista erottuu pidempänä aloituspulssi, jonka aikana ohjausvirta nousee maksimiarvoonsa, ja hold-osa, jossa ohjauspulssia katkotaan, jotta virta rajoittuu matalampaan arvoon.



KUVA 10. Mitattu korkeapainepumpun ohjauspulssi

7.3.5 Aktivointiraja (Limit angle)

Aktivointiraja-parametrilla voidaan rajoittaa pumpun aktivointikulmaa. Arvolla ilmoitetaan pienin mahdollinen ennakko, jolla pumppu vielä aktivoidaan. Jos laskennallinen ennakon arvo jää tätä pienemmäksi, pumppua ei aktivoida ollenkaan.

Arvosta on hyötyä pumpun säädön alkuvaiheessa. Hieman virheellisten parametrien aiheuttamaa kiskopaineen vaihtelua voidaan pienentää pienellä rajoitusarvolla, jolloin pumpun toiminta loppuu kokonaan paineen noustessa lähelle tavoitepainetta.

Alkuvaiheessa voidaan käyttää Motecin suosittamaa 6 asteen arvoa, ja kun pumpun lopullinen säätö on suoritettu, voidaan arvoa pienentää. Liian suuri rajoitusarvo aiheuttaa paineen vaihtelua pienillä kuormituksilla, koska pumppua ei voida aktivoida riittävän pienille tuottoarvoille.

7.4 Käynnistyksen jälkeen säädetyt parametrit

Joitakin parametreja ei voitu tarkasti säätää ennen moottorin käynnistämistä. Tässä osiossa perehdytään niihin parametreihin, joihin on tehty muutoksia moottorin käynnistämisen jälkeen. Muutettujen arvojen lisäksi pyritään kertomaan mahdollisimman tarkasti, millä mittaustavalla kyseiset parametrit on säädetty ja mikä on niiden vaikutus moottorin toimintaan.

7.4.1 Pumpun ennako (Delivery angle)

Pumpun ennako määritettiin aluksi mittaamalla pumppua käyttävän nokan muoto. Mittauksessa on aina hieman virhettä, ja pumpun lopulliseen tuottoon vaikuttavat myös monet muut pumpun, nokka-akselin ja nostimen ominaisuudet.

Mittauksen tarkoituksena on vain selvittää nokan perusmuoto, jolloin pumppu toiminta saadaan riittävän hyväksi moottorin käynnistämiseksi. Lopullinen pumpun ennakkokäyrä saadaan haettua kohdalleen moottorin käydessä.

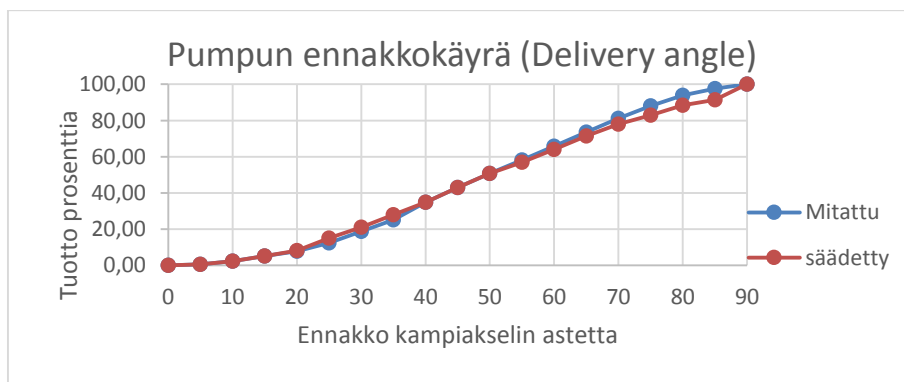
Pumpun ennakon säätäminen perustuu perusennakkokarttaan, josta saatuja arvoja korjataan PID-säätimen avulla. Korjaus perustuu halutun ja saavutetun polttoaineen paineen vertailuun.

PID-säädin perustuu kolmeen parametriin. P-arvo on hetkellinen tavoitteen ja toteutuneen arvon erotus, I-arvo on edellisten korjausten summa ja D-arvo toteutuman muutokseen perustuva arvo. Tässä tapauksessa seurataan I-arvon muutoksia. I-arvo kertoo mahdollisista kartassa olevista virheistä, tutkittava tapahtuma on niin sanottu integral windup, jossa I-arvo alkaa siirtyä pois päin nolasta.

I-arvon kasvaminen liian suureksi aiheuttaa paineen heilahtelua kuormituksen muuttuessa, koska I-arvolla korjattu virhe ei ole sama kartan jokaisessa pisteessä. Kartan virheet voidaan havaita I-arvon muutoksista pumpun tuoton muuttuessa.

Kartan säätö suoritettiin kuormittamalla moottoria erilaisilla kuormilla ja muuttamalla polttoaine-ilmasuhdetta, jotta riittävä polttoaineen virtaus saadaan aikaan. Polttoaineen virtausmäärää vaihtelemalla käytiin läpi koko pumpun ennakkokartta ja jokaisessa pisteessä pyrittiin säätämään kartan arvo niin, että I-arvo saatiin mahdollisimman lähelle nollaa.

Kuvassa 11 on esitetty mittaamalla ja säätämällä saadut ennakkokäyrät. Käyristä voidaan havaita, että niiden perusmuoto on hyvin lähellä toisiaan ja suurimmat erot ovat aivan nokan huipulla ja noston alussa. Virhe johtuu todennäköisesti näiden alueiden erittäin pienistä noston muutosarvoista, jolloin mittauksen virheet korostuvat.



KUVA 11. Mittaamalla ja säätämällä saadut delivery angle -käyrät

7.4.2 Suuttimien lineaarisuuden määrittäminen (Dead time)

Suuttimen dead time -arvolla tarkoitetaan sitä aikaa, joka kuluu ohjaussignaalin aloituksesta siihen, että suutin aukeaa. Jokaisella suutintyypillä on oma yksilöllinen viiveaika, joka riippuu suuttimen rakenteesta ja suuttimen ohjaustavasta.

Suoraruiskutus-suuttimilla tämä arvo on erittäin pieni. Suuttimet ja niiden ohjaus on suunniteltu erityisesti mahdollisimman lineaarisiksi, koska lineaarisuudella on erittäin suuri merkitys, kun käytetään lyhyitä tai useita ruiskutus-pulsseja.

Viive vaikuttaa jokaisen ruiskutus-pulssin alkuun samalla tavalla, mutta se ei riipu ruiskutus-pulssin pituudesta, jos pulssi on pidempi kuin viiveaika. Tätä tietoa hyväksikäyttäen voidaan arvioida suuttimen viiveaika käyvistä moottorista.

Moottoria käytetään mahdollisimman tarkasti samassa kuormitus-pisteessä ja samalla muutetaan polttoaineen seossuhdetta. Seossuhteen muutos aikaan saa suuttimen avaus-pulssin pituuden muutoksen. Ilmamassan ja toteutuneen seossuhteen perusteella lasketaan toteutunut polttoaineen massavirta. Mittaus suoritetaan useilla seossuhteen arvoilla ja saaduista tuloksista piirretään kuvaaja pulssin pituuden ja massavirran suhteessa. Jos käytettävissä on polttoaineen massavirtausmittari kuten tässä tapauksessa, voidaan virtausarvo mitata suoraan. (8.)

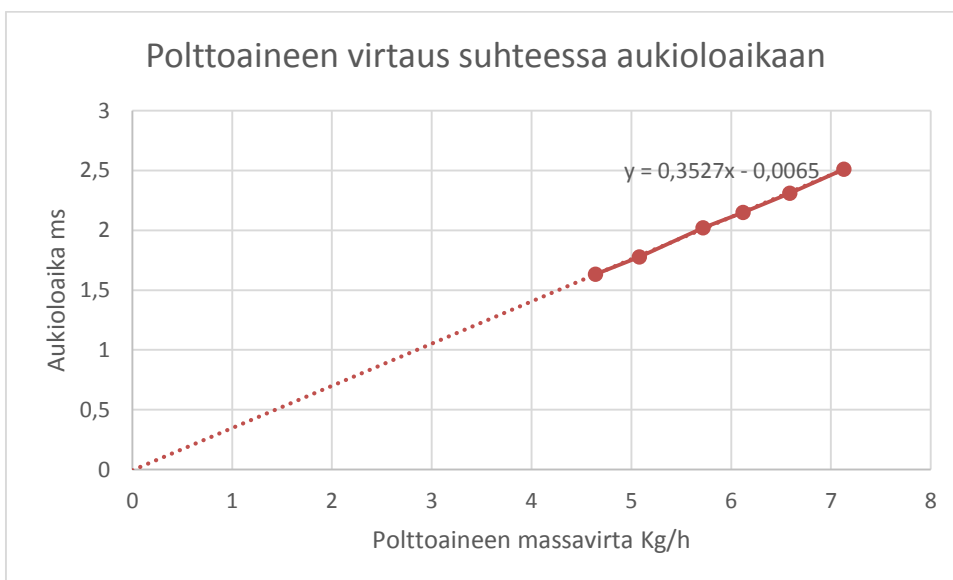
Mittaustulosten tulisi muodostaa suora. Muodostunutta suoraa jatketaan virtausarvoon nolla asti. Näin saadaan pulssin pituusarvo, jolla virtaus on nolla eli suutin ei ole vielä auennut.

Taulukossa 5 on esitetty mitatut polttoaineen ja ilman massavirrat, kuormitus-pisteen tiedot ja käytetty seossuhde. Kuvassa 14 on tuloksista tehty kuvaaja, josta voidaan selvittää suuttimien viiveaika.

TAULUKKO 5. virtausmittauksen tulokset

Ilman massa- virta kg/h	pyörimis- nopeus RPM	lambda	Pulssin pituus	Polttoaineen massavirta kg/h
69,2	2498	1,098	1,632	4,64
67,6	2499	1	1,778	5,08
69,6	2495	0,901	2,021	5,72
69,4	2496	0,851	2,15	6,12
69,4	2499	0,802	2,311	6,59
69,8	2495	0,753	2,511	7,13

Kuten kuvasta 12 voidaan havaita, jatkettu trendiviiva osuu erittäin lähelle nollassa. Ottamalla esille suoran kaava saadaan tarkka arvo $-0,0065$ ms. Arvo tarkoittaa sitä, että suutin on laskennallisesti täysin auki 6,5 us pulssin alkamisen jälkeen. Arvo on erittäin pieni ja kuten kuvaajasta voidaan havaita, mittauspisteet eivät muodosta täysin suoraa viivaa. Tämä tarkoittaa sitä, että mittauksessa on epätarkkuuksia. Epätarkkuuksien lisäksi 6,5 us arvo on niin pieni, että sen merkitys lopullisessa polttoainemäärässä on häviävän pieni. Näistä syistä johtuen voidaan dead time-arvona käyttää 0 ms.



KUVA 12. Polttoaineen virtaus suhteessa aukioloaikaan

8 YHTEENVETO

Työssä päästiin perehtymään kattavasti moottorinohjauksen säätämiseen suoraruiskutusmoottorilla. Aluksi suunnitellulla vakio-ohjainlaitteen mittauksella olisi todennäköisesti saatu lisää informaatiota siitä, miten ruiskutusta muokataan vaihtelevissa kuormitustilanteissa ja miten pitkälle alkuperäiset säädöt on vedetty pakolämpöjen ja vastapaineiden suhteen.

Moottorin ohjaaminen sujuu seinämäohjatussa järjestelmässä hyvin samantapaisesti kuin imusarjaruiskutteisessakin moottorissa. Normaalityössä, jossa polttoaine ruiskutetaan sylinteriin imutahdin aikana, moottori saatiin toimimaan hyvin laboratorioolosuhteissa. Moottoria ei missään vaiheessa onnistuttu käyttämään jaetun seoksen tilassa. Tilojen välillä siirtyminen ja jaetun seoksen tilan vakauttaminen ovat alkuperäistenkin valmistajien suurimmat ongelmat.

Moottori on tätä kirjoitettaessa jo läpäissyt yhden vuosikurssin polttomoottoritekniikan ja säätöteorian laboratoriot ilman ongelmia. Moottorin ohjaukseen joudutaan vielä lisäämään kaasuläpän avulla toimiva kierrosten rajoitin, koska suurilla kierroslukualueilla pakokaasun lämmöt nousevat edelleen liian korkeiksi. Moottorissa kokeiltiin perinteistä ruiskutuksen katkontaan perustuvaa rajoitusta, mutta se aiheutti huomattavan voimakasta nakutusta, eikä näin ollen sovellu käytettäväksi toistuvasti.

Mielestäni tämän tyyppisiä hankkeita voitaisiin tehdä enemmänkin. Laboratoriossa on hyvät välineet tämän tyyppisten töiden tekemiseen. Ainut ongelma on, että moottorijarruja on vain yksi ja senkin käyttäminen vaikeuttaa sähkömoottorin käyttöä. Mielestäni tilanne olisi parempi, jos moottorilaboratoriossa olisi kaksi moottorijarrua, joista toinen olisi kursseihin liittyvässä opetuskäytössä ja toinen projektikäytössä. Näin laboratorion käyttöä saataisiin tehostettua ja projektien määrää voitaisiin kasvattaa. Myös pienempien projektien käyttöä kannattaisi harkita. Näin saataisiin pienemmät ryhmät ja todennäköisesti parempi kiinnostus laboratoriotöihin.

LÄHTEET

1. Bauer, Horst – Crepin, Jürgen – Dietsche, Karl-Heinz – Dinkler, Folkhart. 2003. Autoteknillinen taskukirja. 6. painos. Robert Bosch GmbH. Suom. Jyväskylä: Gummerus Oy.
2. Bosch Mobility Solutions. Bosch. Saatavissa: <http://products.bosch-mobility-solutions.com>. Hakupäivä 18.04.2016
3. Cornell, Stan 1999. Direct injection systems, for spark-ignition and compression-ignition engines. USA: Society of Automotive engineers.
4. Stone Richard 2012. Introduction to internal combustion engines 4th edition. UK: Palgrave Macmillan.
5. HP Injection valve HDEV 5.1. Bosch. Saatavissa: http://www.vaglinks.com/Docs/Catalogues/Bosch-Motor-sport.com_HDEV_5_1_Injector.pdf. Hakupäivä 15.1.2016.
6. HP fuel pump HDP 5. 2016. Bosch. Saatavissa: http://www.bosch-motor-sport.de/media/catalog_resources/HP_Fuel_Pump_HDP_5_Datasheet_51_en_2776592395pdf.pdf. Hakupäivä 11.1.2016.
7. Christopher, Emmerich. 2010. Combustion analysis and optimization of a downsizing-prototype 1.6l turbocharged gasoline direct-injection engine. Thesis. Korea, Korea advanced institute of science and technology. Saatavissa: http://library.kaist.ac.kr/thesis02/2011/2011M020104901_S1Ver2.pdf. Hakupäivä 8.2.2015.
8. Calibration methods for petrol direct injected engines. 2014. Sisäinen dokumentti. Motec.
9. Veloster (FS) Engine ECU Info. Sisäinen dokumentti. Hyundai motor company.