

Gera Knuutinen

Dieselmoottorin säätö Nira i7r -ohjainlaitteella

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinööriytyö

29.4.2013



Tekijä(t) Otsikko	Gera Knuutinen Dieselmoottorin säätö Nira i7r -ohjainlaitteella
Sivumäärä Aika	39 sivua + 1 liite 29.4.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Projektipäällikkö Harri Santamala Koulutuspäällikkö Heikki Parviainen
<p>Syksyllä 2010 Metropolia Ammattikorkeakoulu aloitti Tekes-rahoitteisen ConceptCar-hankkeen, jonka lopputuloksena valmistuu demonstraatioajoneuvo. Ajoneuvo on tarkoitettu esitellä Geneven autonäyttelyssä keväällä 2014. Ajoneuvo tulee olemaan moderni kaupunkiauto, joka valmistetaan mahdollisimman ekologisesti auton koko elinkaari huomioon ottaen. Eräiden tutkimusten mukaan 60–80 prosenttia nykyaikaisen auton koko elinkaaren aikaisista päästöistä syntyy ajon aikana, minkä vuoksi tulevaisuudessa on syytä keskittyä pienentämään nimenomaan ajon aikana syntyvien päästöjen muodostumista.</p> <p>Tässä työssä perehdytään Nira i7r -ohjainlaitteen toimintaperiaatteisiin ja säätölogiikkaan, jotka pitävät sisällään varsin monipuoliset säätömahdollisuudet. Tutkimuksessa tarkastellaan moottorin ohjausta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Työssä selvitetään myös tiettyjen moottorin laitteiden toimintaperiaatteita, kytkentää ja niiden ohjausta. Lisäksi tutkimuksessa esitellään vastaan tulleita haasteita, ongelmia ja niiden ratkaisuja.</p>	
Avainsanat	Moottorin ohjaus, ohjainlaite

Author(s) Title	Gera Knuutinen Diesel Engine Control with Nira i7r Management Unit
Number of Pages Date	39 pages + 1 appendix 29 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Harri Santamala, Project Manager Heikki Parviainen, Head of Degree Programme
<p>In autumn 2010 Helsinki Metropolia University of Applied Sciences initiated a project called "Concept Car" which will result in making a demonstration vehicle. The vehicle will be introduced at the Geneva Motor Show in spring 2014. The vehicle will be a modern city car that is manufactured as ecologically as possible taking into account the whole life span of the car. According to research, approximately 60-80 percent of the emissions of the car during its whole life span are produced during driving. Therefore, in the future it is extremely important to focus on reducing the emissions that develop during driving.</p> <p>This Bachelor's thesis introduces the operational principles and control logic of Nira i7r management unit, which includes rather versatile adjustment possibilities. Control of the engine and the factors affecting it are focused on. Certain operational principles, coupling and control of the certain parts of the engine are also introduced. In addition, some challenges, problems and solutions that have arisen during the research are presented.</p>	
Keywords	Engine management system, engine control

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Taustaa	1
1.2	Työn tarkoitus	2
1.3	Rakenne	2
1.4	Tutkimusmenetelmä ja työn kulku	3
2	Dieselmoottorin perustoimintaperiaatteet	3
2.1	Peruskäsitteet	3
2.2	Dieselmoottoreiden ryhmittely	4
2.3	Mäntämoottorin peruskäsitteitä	6
2.4	Toimintatapa	8
2.4.1	Palaminen	8
2.4.2	Työkierto	11
2.4.3	Kaasunvaihto	11
2.4.4	Ahtaminen	12
2.4.5	Polttoainejärjestelmä	13
3	Moottori	13
3.1	Nira i7r -ohjainlaite	15
3.1.1	Yeistä	15
3.1.2	Polttoaineen massa	18
3.1.3	Ruiskutuksen ajoitus ilman esiruiskutusta	19
3.1.4	Esiruiskutus	20
3.1.5	Ruiskutuksen ajoitus käyttämällä esiruiskutusta	22
3.1.6	Polttoainepaineen säätö	23
3.2	Turboahdin	25
3.3	Jäähdytinneste	26
3.4	Polttoaine-linja	27
3.4.1	Polttoaineen korkeapainepumppu	28
3.4.2	Polttoaineen paineen säätöventtiili	30
4	Kytkentä	32
4.1	Moottorin johtosarja	32
4.2	Moottorin käyttölaitteet	33



4.2.1	Pyörreläpät	33
4.2.2	Kaasuläppä	34
4.3	Moottorin anturit	35
4.3.1	Lambda	35
4.3.2	Ilmamassamittari	36
4.4	KytKentäkaava	37
5	Yhteenveto ja pohdinta	37
	Lähteet	39
	Liitteet	
	Liite 1. Moottorin johtosarjan päivitetty kytKentäkaavio	



Lyhenteet

Csd	Crankshaft degrees, kampiakselin kulma
EGR	Exhaust Gas Recirculation, pakokaasujen takaisinierrätysjärjestelmää, jossa palaneet pakokaasut johdetaan imusarjaan ja sitä kautta takaisin palotilaan
FMSP	Fuel mass setpoint, polttoaineen määrän arvo
Fpc	Fuel pressure control, polttoaineen paineen säätö
Closed-loop	säätöjärjestelmä, joka tarkkailee säädön suoraa vaikutusta johonkin arvoon ja säätää arvoon vaikuttavaa toimilaitetta sen mukaisesti
Open-loop	järjestelmä, jossa tarkkaillaan muita ulkoisia arvoja ja säädetään säädintä niiden perusteella, mutta ei kuitenkaan tarkkailla sitä arvoa, johon säätö suoraan vaikuttaa
PCV	Pressure control valve, polttoaineen paineen venttiili
SOI	Start of injection, ruiskutuksen alku
VCV	Volume control valve, polttoaineen annostusventtiili



1 Johdanto

1.1 Taustaa

Syksyllä 2010 Metropolia Ammattikorkeakoulu aloitti Tekes-rahoitteisen ConceptCar-hankkeen, jonka lopputuloksena valmistuu demonstraatioajoneuvo. Ajoneuvo on tarkoitettu esitellä Geneven Autonäyttelyssä keväällä 2014. Ajoneuvo tulee olemaan moderni kaupunkiauto, joka valmistetaan mahdollisimman ekologisesti auton koko elinkaari huomioon ottaen. Eräiden tutkimusten mukaan 60–80 prosenttia nykyaikaisen auton koko elinkaaren aikaisista päästöistä syntyy ajon aikana, minkä vuoksi tulevaisuudessa on syytä keskittyä pienentämään nimenomaan ajon aikana syntyvien päästöjen muodostumista.

ConceptCar-hanke päätettiin linjata siten juuri nykyaikaisen auton suunnitteluun: polttoaineeksi valittiin sellainen tuote, jolle on jo olemassa paitsi infrastruktuuri, myös tekniikka, joka kykenee hyödyntämään sitä tehokkaasti. Käytännössä tämä tarkoittaa sellaisen nestemäisen polttoaineen käyttöä, joka toimii nykyaikaisessa polttomoottorissa.

Bensiinin ekologisuuden lisäämisellä tarkoitetaan tällä hetkellä etanolin osuuden lisäämistä seoksessa. Lisäämällä etanolia saavutetaan yleisesti vertailtavien CO-, HC-, ja NOx-päästöjen arvoja, joka ovat lähellä normaalin bensiinin päästötasoja lämpimällä moottorilla. Ongelmana ovat kuitenkin olleet kohoavat päästöt silloin, kun moottori on kylmä. Lisäksi testeissä on havaittu aldehydien määrän kasvavan merkittävästi.

Metropolian ConceptCar-hankkeen demonstraatioajoneuvoon päätettiin asentaa niin kutsuttu toisen sukupolven biodieseliä käyttävä moottori. Huolimatta siitä, että henkilöautojen dieselmoottorit toimivat kyseisellä polttoaineella sellaisenaan jo nykypäivänä, haluttiin demonstraatioajoneuvon moottorilla tutkia, kuinka paljon moottoriin tehtävillä muutoksilla olisi mahdollista saavuttaa hyötyä verrattuna normaalille dieselille suunniteltuun moottoriin. Tätä tarkoitusta varten päätettiin suunnitella ja valmistaa erillinen testauslaitteisto, jolla moottorin toiminta voitaisiin optimoida toisen sukupolven biodieselille. Tämä onnistuu parhaiten sellaisissa luotettavissa laboratorio-olosuhteissa, jotka myös Metropolialla on käytössään. Erillisen testauslaitteiston avulla voidaankin arvioida kokeiden tulosten perusteella kulutuksen ja päästöjen muutoksia tilanteissa, jossa au-

toon asennetaan kyseinen moottori. Nämä arvioinnit soveltuvat mihin tahansa autoon. Loppuvaiheessa – kun moottori on jo asennettu demonstraatioajoneuvoon – on tarkoitus päästä suorittamaan testejä moottorilla myös käytännön ajotilanteissa. (1)

Käsillä olevan opinnäytetyön lähtökohtana on ollut Teemu Tiaisen opinnäytetyö (1) ”Uusiutuvan dieselpolttoaineen testauksen suunnittelu ja testimoottorin valmistaminen”. Tiaisen työ käsittelee tämän tutkimuksen kohteena olevaa moottoria, mutta lähtökohta on ollut testauslaitteiston suunnittelu, kun taas käsillä oleva työ keskittyy laitteiston säätöjen tarkasteluun ja tutkimukseen.

1.2 Työn tarkoitus

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka tutkimuksen kohteena olevaa laitteistoa voidaan säätää asianmukaisella ohjainlaitteella ilman käyttöohjeita. Alkuvaiheessa insinööriyön tavoitteeksi asetettiin moottorin säädöt Super Flow -moottoridynamometrissa saadan sellaisiksi, että ne vastaavat vähintään samoja tehoja ja vääntöarvoja kuin vakiomoottorissakin sekä pakokaasujen osalta tehtaalta annettuja päästöarvoja. Työn raportissa keskitytään kuitenkin Nira i7r -ohjainlaitteen säätölogiikan toimintaperiaatteen tarkasteluun.

1.3 Rakenne

Ensimmäisessä luvussa esitellään työn tausta, tarkoitus, rakenne ja rajaukset sekä käsitellään lyhyesti tutkimusmenetelmää. Toisessa luvussa esitellään tutkimuksen kohteena olevan Nira i7r -ohjainlaitteen toimintaa: aluksi käsitellään polttoaineen massaa, ruiskutusta, polttoainepaineen säätöä, sen jälkeen turboahdinta, jäähdytinnesteeseen liittyviä haasteita sekä polttoainelinjaa.

Työn kolmannessa luvussa tarkastellaan kytkentöjä. Ensimmäisenä kytkennöistä käsitellään moottorin johtosarjaa, minkä jälkeen siirrytään tarkastelemaan moottorin käyttölaitteita, kuten pyörre- ja kaasuläppiä. Tämän jälkeen tarkastelu siirtyy moottorin antureihin (λ ja ilmamassamittari) ja lopuksi kytkentäkaavaan.

1.4 Tutkimusmenetelmä ja työn kulku

Tämän tutkimuksen lähtökohta on yhdistelmä teoriaa ja luonnollisesti käytännön empiiristä tutkimusta. Tutkimuksen suurimmaksi haasteeksi nousi käyttöohjeiden puuttuminen: niiden saapuminen ajoittui opinnäytetyön valmistumisen loppuajankohdaksi. Käytännössä näiden ohjeiden puuttuminen vaati varsin paljon perehtymistä teoriaan sekä lukuisia käytännön kokeita tutkimuksen kohteena olevan laitteiston parissa.

Tutkimusta tehtiin pääosin Metropolia Ammattikorkeakoulun autotekniikan laboratorion tiloissa noin viiden kuukauden ajan täysipäiväisesti vaihtelevin kokoonpanoin. Tutkimuksen alussa projektiin osallistui myös Sampo Kuikka. Työn alkuvaiheessa tiimimme tehtäviin kuuluivat muun muassa tilapäisen polttoainetankin virittäminen ja pakokaasujen poistoputken rakentaminen.

2 Dieselmoottorin perustoimintaperiaatteet

2.1 Peruskäsitteet

Voimakoneiksi kutsutaan koneita, jotka kykenevät muuttamaan luonnosta saatavaa energiaa hyötykäyttöön. Itse luonnon energia on saatavilla erilaisissa muodoissa auringon energiasta. Lämpövoimakoneen tarkoitus on muuttaa polttoaineisiin kemiallisesti sidottua energiaa lämpöenergiaksi palaamisprosessin kautta. Vapautuvalla lämpöenergialla kehitetään painetta, joka puolestaan muutetaan mekaaniseksi työksi.

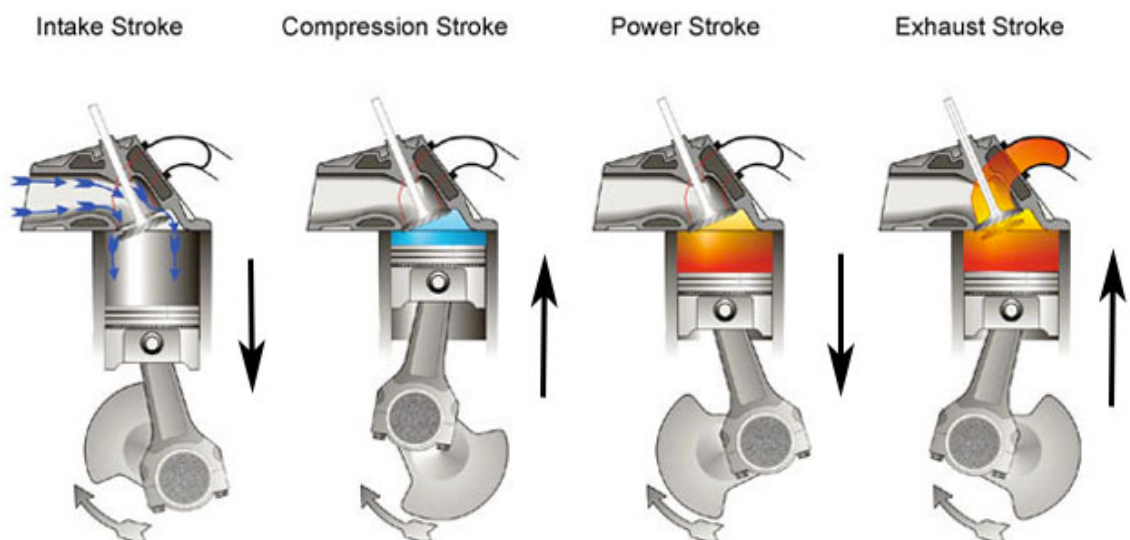
Lämpövoimakoneisiin kuuluvat muun muassa polttomoottorit, joiden alaryhmänä voidaan mainita mäntämoottorit. Dieselmoottorit kuuluvat juuri mäntämoottoreihin.

Sekoittamalla polttoainetta ilmaan dieselmoottoreissa muodostetaan palaamisen tarvittava seos. Se muodostetaan moottorin sylinterissä tai siihen liittyvässä tilassa. Polttoaineen ja ilman seos syttyy itsestään moottorin männän aiheuttavasta puristuslämmöstä. (2)

2.2 Dieselmootoreiden ryhmittely

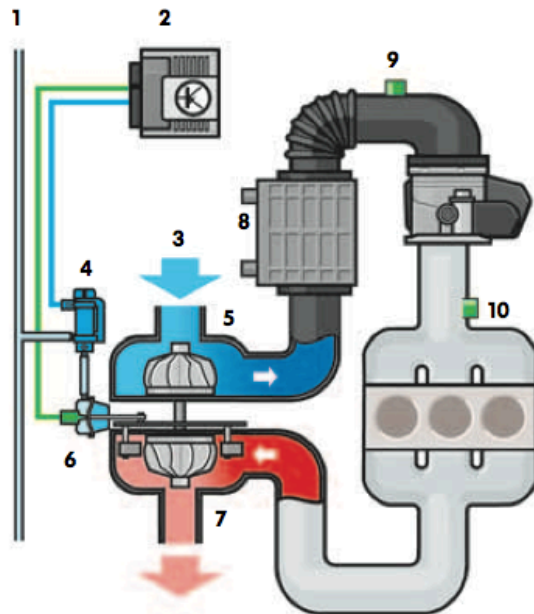
Dieselmootorit jakaantuvat niiden toiminnan ja rakenteen mukaan useampaan ryhmään. Tästä eteenpäin esitellään tässä insinööriyössä käsitellyn tyyppiseen moottoriin liittyviä käsitteitä sekä toimintaperiaatteita. Näin lukijalle muodostuu selkeämpi kuva kyseisen insinööriyön moottorista.

Nelitahtidieselmoottorissa yhdellä työkierrolla tarkoitetaan kahta kampiakselikiertoa eli 720:tä astetta kampiakselin pyörähdyskulmana. Ensimmäisen tahdin aikana moottorin sylinteri täytetään ilmalla. Toisen tahdin tarkoituksena on puristaa kokoon sylinteriin saatua ilmaa. Kolmannella tahdilla sylinteriin syntyy muodostuneen palaamiskelpoisen seoksen palaminen ja palamiskaasujen paisuminen. Tässä vaiheessa kaasut tekevät paisuessaan töitä ja näin saavutetaan männän päähän muodostuva mekaaninen työ. Neljännen tahdin aikana palaneen seoksen muodostamat jäännöskaasut poistetaan sylinteristä (kuva 1).



Kuva 1. Moottorin neljä tahtia (3).

Ilmuilma tuodaan moottorin sylinteriin paineella ilmapumpun eli turboahtimen avulla. Turboahdin käyttää pakokaasujen virtausta, josta se saa voimaa aiheuttaakseen ilma-virtausta paineella sylinteriin (kuva 2).



Osaluettelo

- 1 - alipainejärjestelmä
- 2 - moottorin ohjainlaite J623
- 3 - imuilma
- 4 - ahtopaineen rajoittimen magneettiventtiili N75
- 5 - turboahtimen ahdin
- 6 - alipainerasia, jossa ahtopaineensäätimen asentoanturi G581
- 7 - pakokaasuturbiini ohjaussiipien säätömekanismilla
- 8 - ahtoilmajäähdytin
- 9 - imuilman lämpötila-anturi G42
- 10 - ahtopaineanturi G31

Kuva 2. Turboahtimen toiminta (4).

Polttoainetta tuodaan korkeapainepumpun avulla ruiskutussuuttimiin, joista sitä sitten paineella ruiskutetaan sylinteriin. Kyseessä on näin ollen siis pelkkäsyöttöinen dieselmoottori.

Tutkimusta tehdessä käytössä on monisylinterinen rivipystymoottori. Monisylinterisissä moottoreissa (enemmän kuin yksi sylinteri) on tasaisempi käynti. Pystymoottoreissa sylintereiden asento on nimenomaan pystysuorassa tai ainakin lähes pystyssä. Pystymoottorit vievät enemmän korkeustilaa ja vähemmän tilaa sivusuunnassa verrattuna makaavaan moottoriin. Rivimoottorin sylintereiden sijainti on peräkkäinen toisiinsa nähden. Rivimoottorin sylintereiden luku ajoneuvoissa vaihtelee yleensä kahden ja kuuden välillä. (Kuva 3.)



S465_031

Kuva 3. Kolmesylinterisen rivipystymoottorin lohko (4).

Yksitoiminen dieselmoottori tarkoittaa sitä, että palaminen tapahtuvan ainoastaan männän toisella puolella. Tutkimuksen kohteena oleva moottori kuuluu myös nopeakäyntisten moottoreiden joukkoon. (2).

2.3 Mäntämoottorin peruskäsitteitä

Moottorin iskupituudella tarkoitetaan männän kulkemaa matkaa ääriasennosta ääriasentoon. Iskutilavuudeksi puolestaan kutsutaan tilavuutta, joka muodostuu männän tekemästä liikematkasta ääriasennosta toiseen ja sylinterin poikkipinta-alan tulosta.

Iskusuhde tarkoittaa iskunpituuden suhdetta sylinterin halkaisijaan (s/D). Iskusuhde vaikuttaa moottorin rakennekokoon. Suurempi iskusuhde vaatii korkeamman moottorin rakennekoon ja pienen tehon rakennetilavuuden suhteen. Pienempi iskupituus vaatii suuremman männän koon iskupituuteen nähden. Käytännössä männän paino kasvaa.

$$V_i = \frac{\pi \times D^2}{4} \times s$$

V_i – yhden sylinterin iskutilavuus (cm^3)

D – sylinterin halkaisija (cm)

s – iskunpituus (cm)

Männän yläpuolelle saavuttaessa yläkuolokohtaan jää tilaa, jota kutsutaan *puristustilavuudeksi*. Puristus- ja iskuutilavuuden summaksi saadaan *sylinteritulavuus*. Sylinteri- ja puristustilavuuden suhteena saavutetaan *puristussuhde*.

Moottorin käyntinopeudella tarkoitetaan kampiakselin pyörähdyksen määrää tietyssä aikayksikössä. Se ilmoitetaan yleensä yksikkönä *1/s* tai *r/min*. Monesti juuri iskunpituus ja moottorin käyntinopeus määräävät *männän keskinopeuden*.

$$C_m = 2 \times s \times n$$

C_m – männän keskinopeus (*m/s*)

s – iskunpituus (*m*)

n – pyörimisnopeus (*r/s*)

Kampiakselin pyörimisnopeuden on oltava määrättyssä suhteessa iskupituuteen, jolloin männän keksinopeus pysyy kohtuullisena. Turhan voimakas männän keskinopeus aiheuttaa ylimääräistä männän ja sylinterin kulutusta.

Tehoksi kutsutaan työmäärää suoritettua tietyssä aikayksikössä.

$$P_e = \frac{0,2}{T} \times z \times V_i \times n \times p_e$$

P_e – moottorin hyötyteho (*kW*)

T – moottorin toimintaperiate, tahtiluku 2 tai 4

z – moottorin sylinteriluku

V_i – yhden sylinterin iskuutilavuus (*dm²*)

n – kierrosnopeus (*1/s*)

p_e – tehollinen keskipaine (*bar*)

Tehollinen keskipaine on keskimääräinen hyötypaine, joka vaikuttaa mäntään työtahdin aikana. Mitä suurempi määrä polttoainetta saadaan poltettua sylinterissä työtahdin aikana, sitä korkeampi paine ja suurempi teho saadaan aikaan. Tehollinen keskipaine on myös riippuvainen moottorin pyörimisnopeudesta, koska sylinterin täytös huonenee pyörimisnopeutta nostaessa. Näin tapahtuu koska korkeampi pyörimisnopeus laskee sylinteritäyttöön menevä aikaa.

Turboahdetulla moottorilla saavutetaan korkeampi täytösaste ja voidaan polttaa enemmän polttoainetta työiskua kohti. Vastaavasti maksimipaine nousee ja se vaatii dieselmoottorista vahvempaa rakennetta. Vahvemman moottorin rakenteen saavutus vaikuttaa suoraan moottorin valmistuskustannuksiin. Maksimipaineen noustessa moottoria rasittavan korkealle tasolle voidaan rajoittaa sitä pitkittämällä palaamistapahtumaa sylinterissä ruiskuttamalla polttoainetta hitaammin.

Tehonimitykset voivat poiketa toisistaan erilaisissa yhteyksissä. *Hyötyteholla* tarkoitetaan akselitehoa, jonka moottori kykenee suorittamaan tietyssä aikayksikössä. *Kestoteholla* tarkoitetaan jatkuva tehoa, eli moottorin jatkuvasti kehittämää suurinta hyötytehoa. *Huipputeholla* puolestaan tarkoitetaan moottorin kehittämää maksimitehoa ilman hetkellisiä moottorin osien yllirasitusta. Kyseinen teho ei ole välttämättä moottorin suurinta pyörimisnopeutta vastaava teho, vaan saattaa olla sitä huomattavasti suurempi. *Litrateholla* tarkoitetaan moottorin hyötötehoa sen iskuilavuuden litraa kohti. Käytännössä kyseessä on moottorin teho verrattuna sen rakennekokoon. *Ominaisteholla* tarkoitetaan hyötytehoa, jonka moottori kehittää painonsa yksikköä kohti. Sekä litratehon että ominaistehon arvon suuruus kasvaa moottorin pyörimisnopeuden kasvaessa. (2)

2.4 Toimintatapa

2.4.1 Palaminen

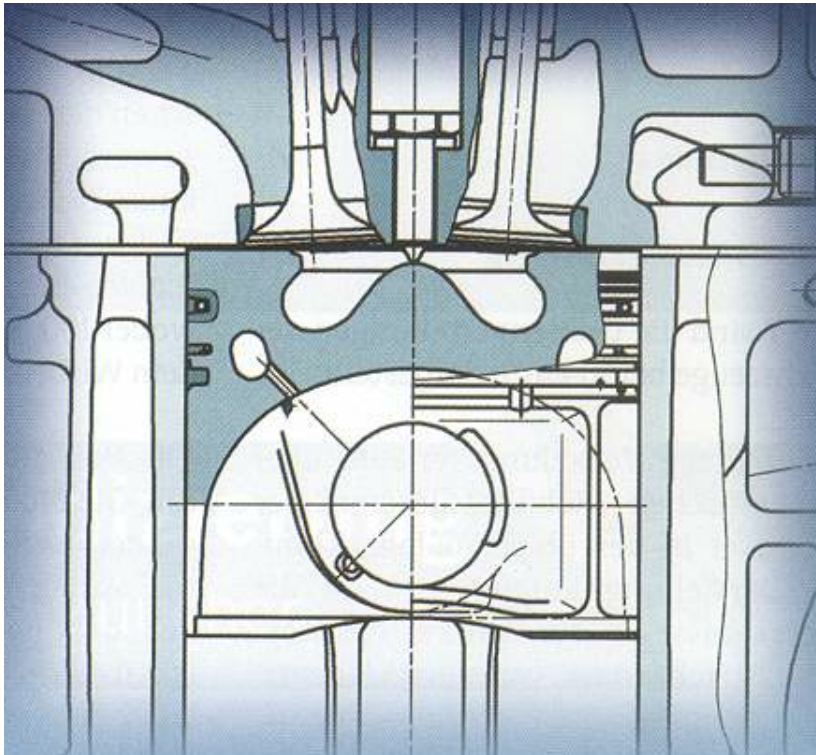
Täydellisesti poltetun polttoaineen määrän energia vastaa suunnilleen vapautuvaa teoreettista energian arvoa. Mitä suurempi polttoainemassa poltetaan kerralla sylinterissä, sitä suurempi määrä lämpöenergiaa muuttuu mekaaniseksi työksi.

Dieselmoottoriin on syötettävä vähintään niin paljon ilmaa kuin sylinteriin syötetty polttoaineen määrä vaatii täydelliseen palamiseen. Tarkoituksena on saada savuttoman palamisen ja epätäydellisen seoksen muodostumisesta aiheutuva ylimääräinen ilmantarve. Moottorin kuormitusta säädetään muuttamalla sylinteriin ruiskutettua polttoaineen määrää. Palamiskerroin, joka kuvaa imuilman ja ruiskutetun polttoainemassan palamiseen tarvittavaa suhdetta, määritellään dieselmoottorin täydelle kuormitukselle.

Epätäydellisen palamisen tuloksena on moottorin päästöjen savutus. Yleensä syynä on huonosti muodostettu seos esimerkiksi sylinterin eri nurkissa. Toisaalta homogeeninen

seos voi johtaa nopeaan itsesyttymiseen, joten seurauksena on iskumainen palaminen. Kyseinen palaminen aiheuttaa äänekkästä moottorin käyntiä ja voi johtaa moottorin vaurioitumiseen. Sen takia palamiseen tarvittavaa seosta pitää syntyä hallitusti.

Polttoaineen ruiskutus tapahtuu korkealla paineella sylinteriin. Palotilaan ruiskutettu polttoaine höyrystyy ja siten sekoittuu ilmapyörteisiin, kun ruiskutussuihke osuu kuumentuneisiin ilmapyörteisiin ja sylinterin kuumiin seinämiin. Syttyminen alkaa höyrystyvän polttoainepisaran ympärillä. Syttyvä liekki rintama kiihdyttää pisaroiden höyrystymisprosessia. Dieselmoottorissa polttoaineen ja ilman sekoittumiseen on käytössä vähemmän aikaa kuin ottomoottorissa, koska ruiskutus alkaa männän lähestyessä yläkuolokohtaa. Ottomoottorissa sekoittumiseen voi mennä koko kampiakselin kierros moottorista riippuen. (Kuva 4.)



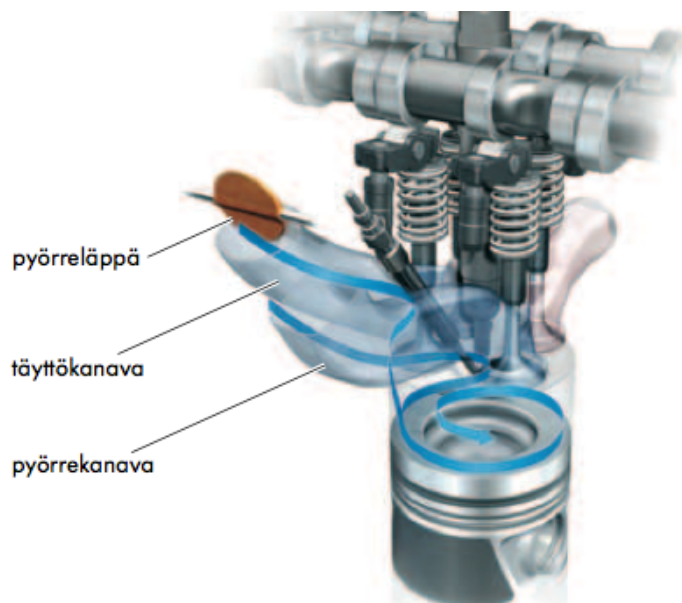
Kuva 4. Suoraruiskutuksen suutin palotilassa (5).

Polttoainepisaroiden höyrystyminen vaatii palotilan ilmasta saatavaa lämpöä sen höyrystymiseen ja sittemmin syttymiseen oikealla hetkellä. *Syttymisjättämällä* tarkoitetaan tiettyä aikaa, jossa seos ei ehtinyt syttyä. Mitä lyhyemmäksi syttymisjättämä jää hallitussa palamisprosessissa, sitä parempi. Paineen ja lämpötilan korotus vähentää syttymisjättämää.

Vakiotilavuuspalamisessa on nopea paineen nousu. Paineen ja sen nousujyrkkyys sylinterissä polttoaineen syttymisen jälkeen riippuu syttymisjättämän pituudesta, moottorin pyörimisnopeudesta, puristuksen loppupaineesta ja -lämpötilasta sekä ilmapyörtelyistä.

Polttoaineen nopean syttymisen parantamiseksi on mahdollista esilämmittää imuilmaa ja nosta puristussuhdetta. Imuilman esilämmityksen haittapuolena on tiheyden lasku kyseisessä ilmassa, joka myös johtaa tehon laskuun. Yleensä pyritään tuottamaan sylinteriin viileämpää ilmaa tehon nostamiseksi. Mikäli puristussuhde nostetaan liian korkealle, moottorin mekaaninen hyötysuhde huononee.

Suoraruiskutuspalotiloissa on yleensä vähäinen ilman liike, joka aiheuttaa seoksen epämääräisen muodostumisen. Tutkimuksessa apuna käytettiin erikoista imusarjaa ja moottorin kantta, jotka sisälsivät kaksoiskanaviston. Yksi kanavoista aiheuttaa kovia pyörtelyitä sylinteriin tasaisella kuormituksella. Suorasuihkutusmenetelmillä saavutetaan tarkan ja taloudellisen polttoaineen annostus. Kyseinen menetelmä asettaa suuttimille ominaisuudeltaan korkeat tavoitteet. Palotapahtuman aiheuttavat paloprosessit ja sylinteristä poistuvat päästöt voivat aiheuttaa suuttimille toimintahäiriöitä esimerkiksi suutinkärjettä tukkeutumalla. Tuloksena voi olla vääristynyt ruiskutuksen sumun muoto, joka puolestaan aiheuttaa huonon seoksen laadun.



Kuva 5. Moottorikannen pyörrekanavat (4).

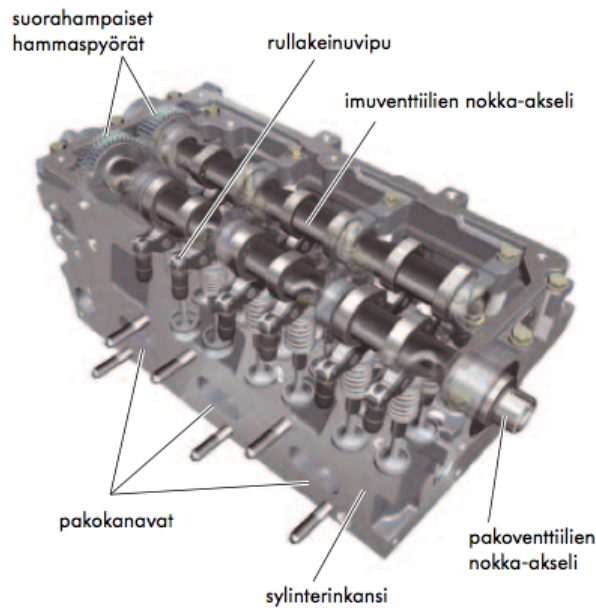
Suoraruiskutusmenetelmä yksinkertaistaa moottorin rakennetta ja tekee siitä kompaktimman. Palotilaan seinämiin syntyvät pienemmät lämpöhäviöt, joten on parempi kylmäkäynnistys. Lisäksi kyseinen menetelmä vaatii matalamman puristussuhteen, mikä johtaa parempaan mekaaniseen hyötysuhteeseen ja moottorin tasaisempaan käyntiin. Suorasuihkutusmenetelmän haittana pidetään tarvittavasta korkeasta ruiskutuspainesta aiheutuvia polttoainelaitteiston korkeita kustannuksia. Monireikäsuuttimet ovat herkempiä tukkeutumaan ja kulumaan verrattuna yksireikäsuuttimiin. (2)

2.4.2 Työkierto

Dieselmootoreissa päästään parhaaseen termiseen hyötysuhteeseen vakiotilavuudessa eli männän olleessa yläkuolokohdassa tapahtuvassa poltossa. Nykyaikaiset dieselmootorit muistuttavat yhä enemmän työkierroltaan ottoprosessia. Oikea moottori poikkeaa teoreettisesta ihannetyökierron mukaisesta toimintatavasta monien häviöiden takia. Palotilan seinämiin siirtyy kiertoprosessin aikana lämpöenergiaa ja päinvastoin. Kaasun määrä ja koostumus muuttuvat prosessin aikana. Seoksen epätäydellinen palaminen aiheuttavat epämääräisyyttä kiertoprosessiin. (2)

2.4.3 Kaasunvaihto

Kaasun vaihdosta huolehtii moottorin kansi, jossa sijaitsevat pako- ja imuventtiilit. Pakoventtiili avautuu ennen paisuntavaiheen loppua, ja samalla paine sylinterissä laskee. Tästä eteenpäin männän liikkuessa kohti yläkuolokohtaa se huolehtii pakokaasujen poistotyöstä sylinteristä. Ennen kuin mäntä suupuu yläkuolokohtaan, avautuu imuventtiili. Tietyn aikaa molemmat venttiilit ovat auki. Tätä hetkeä kutsutaan *overlapiksi*. Imutahdin ajaksi pakoventtiili sulkeutuu ja sylinteriin syötetään ilmaa imuventtiilin kautta. Sylinteriä saadaan täytettyä imusarjan ja sylinterin paineron avulla. Imuventtiili sulkeutuu männän siirtyessä taas yläkuolokohtaa päin. Tässä vaiheessa tapahtuu ilman puristus ja ennen yläkuolokohtaa polttoaineen ruiskutus. Venttiilien avauksen ja sulkemisen ajoitukset riippuvat moottoreiden tyypistä. *Overlap* eli ristiinmeno on välttämätön toimenpide hyvän sylinterihuuhtelun vuoksi. (2)



Kuva 6. Sylinterinkansi osineen (4).

2.4.4 Ahtaminen

Dieselmoottorin teho riippuu poltetusta polttoainemassasta tietyssä yksikössä. Mitä enemmän poltetaan polttoainetta, sitä enemmän mekaanista energiaa saavutetaan. Jos kuitenkin halutaan polttaa enemmän polttoainetta, tarvitaan enemmän ilmaakin suuremman dieselmäärän polttamiseksi. Jäähdyttämällä imuilma saavutetaan imuilman suuremman tiheyden, eli käytännössä samaan tilavuuteen saadaan mahtumaan enemmän viileää ilmaa kuin lämmintä. Dieselmoottorin ominaistehon kasvun vaikutuksesta saadaan säästettyä moottorin painolla. Myös ulkoilman olosuhteiden muutos vaikuttaa vähemmän ahdetun moottorin tehoon kuin vapaasti hengittävään.

Näin ollen moottori ei joudu enää imemään ilmaa, vaan sitä työnnetään sylinteriin. Ahtamisen seurauksena ovat lisääntyneet moottorin ja sen osien mekaaniset sekä termiset rasitukset. Tämä johtuu korkeammasta paineesta ja lämpötilasta imumoottoriin verrattuna. Ahtamisen taloudelliset ja tekniset edut ovat kuitenkin sen verran merkittäviä, että toistaiseksi markkinoille tulee pelkästään ahdettuja dieselmoottoreita.

Imuilman paineistamiseen käytetään moottorista poistuvien pakokaasujen energiaa. Poistuessaan pakokaasut välittävät energiansa turboahtimen pakosiiville. Pakosiivistä aiheutuva pyörimisliike pyörittää imupuolella samalla akselilla sijaitsevia imusiipiä. Tällöin imupuolelle syntyy paine. (2)

Moottorin saavuttama tehonnousu riippuu pakokaasujen energiasta ja myös turboahtimen hyötysuhteesta. Ahdetut dieselmoottorit toimivat suurella ilmakertoimella hyvällä huuteluilmamäärällä. Ahdin aiheuttaa imupuolelle ilmapaineen. Imuilman lämpötila kasvaa, kun ilmaa puristetaan imupuolelle, se ei ole toivottu ominaisuus ConceptCar-projektin tarkoitukseseen. Turboahtimen jälkeen asennetaan välijäähdytin, jonka tarkoituksena on jäähdyttää imuilmaa. Sillä parannetaan moottorin hyötysuhdetta. Ilmajäähdyttimen tyyppejä on useampia, joista yleisin on niin kutsuttu *ilmasta ilmaan -tyyppi*. Hyvin suunnitellun jäähdyttimen tehokkuusluku on jopa 95 %. (6). Kyseinen tehokkuusluvun määräytymistä voidaan havainnollista seuraavalla esimerkillä: imuilman lämpötila ahtimen ja välijäähdyttimen välillä on 60 °C (ilma on puristettuna turbonahtimen avulla ja sen lämpötila on korkeampi kuin imetyn ulkoilman lämpötila), välijäähdyttimen jälkeen ahdetun ilman lämpötila laskenut ja on 40°C, joten jäähdyttimen tehokkuus luku lasketaan seuraavasti:

$$\frac{40^{\circ}\text{C}}{60^{\circ}\text{C}} \times 100\% \approx 66\%$$

2.4.5 Polttoainejärjestelmä

Polttoainejärjestelmässä on nykyään tyypillisesti korkeapainepumppu, joka saa kehitettyä kampiakselin voimasta tarvittava korkeapainetta ruiskutuslaitteille. Polttoainetankista polttoaineen siirtopumppu toimittaa polttoainepaineensäätimen ja -suodattimen kautta korkeapainepumpulle.

Nykypäivänä on olemassa monenlaisia polttoainejärjestelmiä, jotka ovat tarkasti ohjattuja ohjainlaitteilla. Tutkimuksen kohteena olevassa moottorissa on nykyaikainen Common Rail -suihkutusjärjestelmä.

3 Moottori

Tulevaisuudessa moottori on tarkoitus asentaa SuperFlow-moottoridynamometriin säädettäväksi, kun tarvittavat anturit ovat kytkettyinä ja kaikkia moottorin säätölaitteita pystytään ohjaamaan ja säätämään. Tutustuminen moottorin ohjaukseen ja säätöön jopa tyhjäkäynnillä on aikaa vievä prosessi, eikä sen hienosäätöä ole vielä mahdollista

projektin alkuvaiheessa suorittaa. Sen vuoksi moottoria käytetään erillään SuperFlow-laitteistosta.

Moottori päätettiin asentaa liikkuvaan alustaan, sillä on helppo siirtää laitteisto sivuun säilytykseen, kun tehdään selvitys- ja kytkentätyötä tai takaisin esiin ilmanpoistokanan kohdalle, kun moottori käy. Alustan tehtävänä on pitää myös kaikki polttoainelinjan komponentit, kuten tankki ja erilaiset letkut, koossa. Samalla myöskään sähköjohdot, kuten polttoainepumpun johdot, eivät tule vahingossa irronneiksi tai revityiksi.

Moottorin hiukkassuodatin päätettiin poistaa moottorin säädön alkuvaiheessa ja sitä käytetään vasta hienosäädön aikana. Näin ollen säästetään myös tilaa moottorin ulkopuolella ja hiukkassuodattimen sijaan turboahtimen kylkeen viritetään samalla pakokaasunpoistoputki, johon on mahdollista myös asentaa lambdan ja lämpötilantureita. (Kuva 7.)

On huomattava, että Nira i7r -ohjainlaitteen kaltaisia monimutkaisia elektronisia laitteita on lähes mahdoton käsitellä kokonaan oikein ilman valmistajan antamia perehdytysohjeita, etenkin kun kyseessä on kokematon henkilö. Tästä syystä on huomioitava mahdolliset virheet laitteiston toiminnan ymmärtämisen osalta.



Kuva 7. Testauslaitteisto liikkuvalla alustalla

3.1 Nira i7r -ohjainlaite

3.1.1 Yeistä

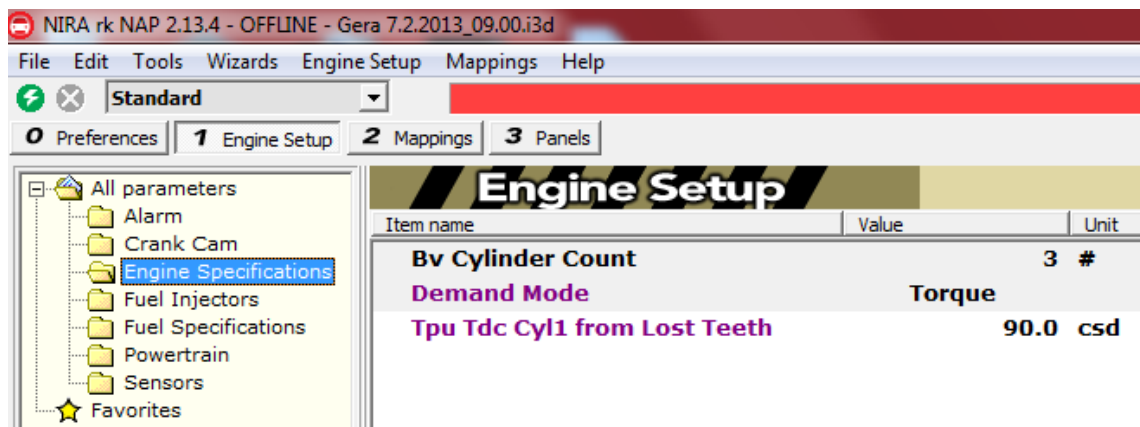
Nira-ohjainlaitteen liittimestä on löydetty rikkinäisiä niin kutsuttuja pinnipaikkoja. Tästä syystä johdot eivät pysy liittimessä kiinni, kun liittintä laitetaan kiinni ohjainlaitteeseen. Luultavimmin ainakin osaksi tästä syystä on useampi käyttölaite tai anturi on kytketty yhdelle virta- tai maadoitusjohdolle sen sijaan, että jokaisella laitteella tai anturilla olisi omat virta- ja maadoitusjohtonsa. Ohjainlaitteen valmistaja nimittäin suosittelee kytkeämään laitteet ja anturit pääosin omille johdoilleen. Tämän vuoksi päätettiin vaihtaa rikkinäiset liittimet ehjiin ennen lopullista moottorin asennusta demonstraatioajoneuvoon.

Tarkkoja säätöjä varten moottoriin on suunnitteilla erikseen vielä kehitysvaiheessa oleva sylinteripaineen mittari ja jatkossa se laitetaan hehkutulpan tilalle säätöajaksi. Moottorin käynnistyksen ja käynnin yhteydessä pystytään seuramaan sylinteripaineen kehi-

tystä vertailemalla paineen piikin etäisyyttä asteina yläkuolokohdasta. Mittariin vievän tilavuuden tulee olla palotilasta täsmälleen samanlainen kuin hehkutulpan tilavuus, jolloin palotilaan ei tule muutosta palotapahtumaan. Kehitteillä olevasta mittarista tulee olemaan paljon hyötyä kyseistä moottoria säädettäessä.

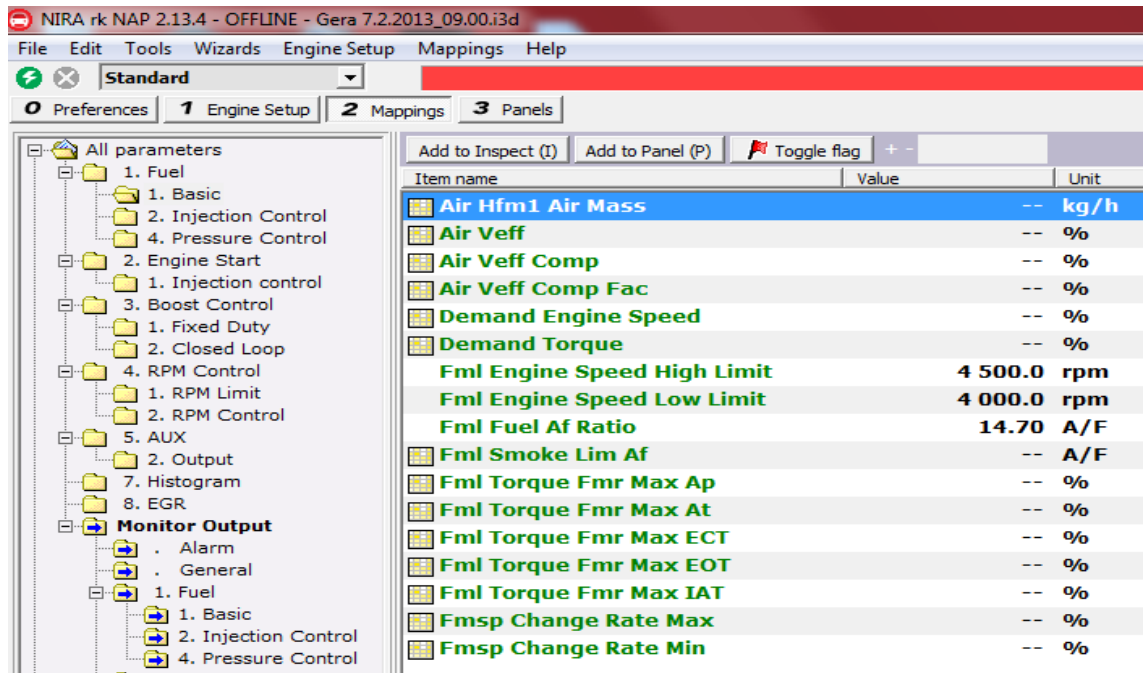
Ohjainlaitteen tietokoneohjelmassa asiat ovat hyvin loogisessa järjestyksessä. Käytännössä tutkimuksen apuna käytetään ohjelman välilehtiä *Engine Setup*, *Mapping* ja *Panels*.

Engine setup -välilehti (kuva 8) sisältää moottorin kiinteitä tekijöitä, kuten hälytystoimintoja, moottorin nokka- ja kampiakselin tunnistimen tyyppejä sekä moottorin, polttoaineen, ruiskutuksen ja sensoreiden asetuksia, joiden arvoja voidaan vaihtaa. Niitä joudutaan harvemmin harvemmin säätämään, mikäli säädöt on jo kertaalleen tehty.



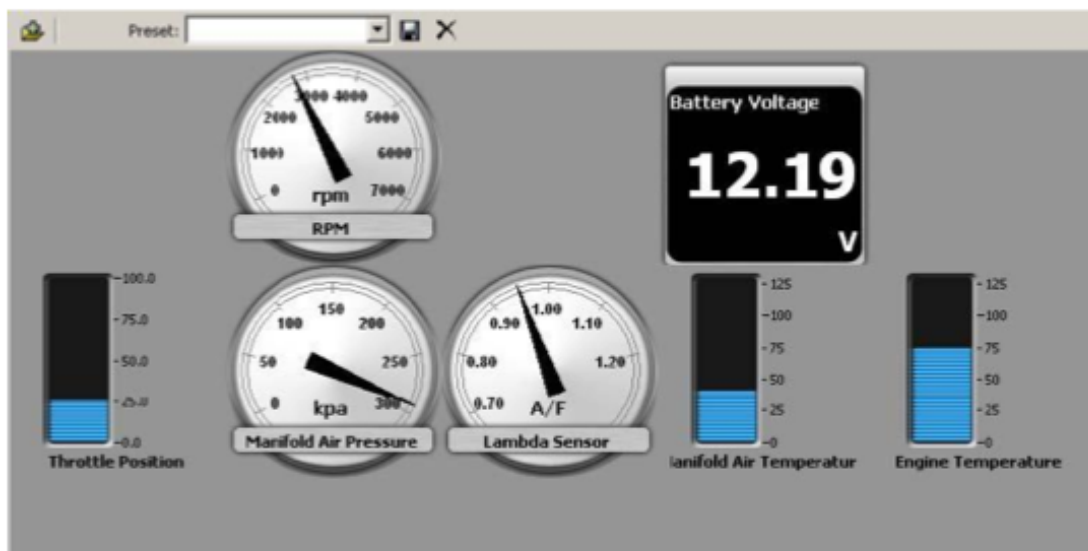
Kuva 8. Engine Setup -välilehden näkymä

Mapping-välilehdellä (kuva 9) on säätökarttoja ja arvoja, joista viimeksi mainittuja tulee jatkossa säätää useaan otteeseen. Välilehden alla on lisäksi myös muun muassa polttoaineeseen, moottorin käynnistykseen, ahtopaineeseen sekä pyörimisnopeuteen liittyviä karttoja.



Kuva 9. Mapping-välilehden yleiskatsaus

Kolmanteen välilehteen on mahdollista vapaasti lisätä kaikenlaisia moottorin ja antureiden arvojen mittareita, joiden perusteella voidaan seurata esimerkiksi ahtopainetta, jäähdytysnesteen lämpötilaa tai vaikkapa ruiskutettua polttoainemäärää syklin aikana (kuva 10).



Picture 4-22: The Panel tab allows you to add any parameter of interest.

Kuva 10. Panels-välilehden näkymä (7).

Seuraavissa osioissa on tarkoitus tarkastella ohjainlaitteen säätötaulukoiden nimityksiä ja säätötekijöitä. Näihin säätötaulukoihin ja -tekijöihin perehdytään seuraavassa. Säätöjä jouduttiin muokkaamaan työn aikana moottoria säädettäessä.

3.1.2 Polttoaineen massa

Nira i7r –ohjainlaite käsittelee polttoainemassan prosentuaalisena arvona. Kaikki prosentuaalisesti esitetyt korjausarvot vaikuttavat yllä mainittuun arvoon, joka sijaitsee *Bv Fuel Mass Cycle Max [mg/cycle]* -kohdassa. Näin ollen kyseessä on siis eräänlainen lähtöarvo, jota on mahdollista säätää muiden tekijöiden ansiosta. Kuitenkin lopullinen laskettu polttoaineen massan arvo korjaussäätimien jälkeen on esitetty *FMSP Fuel mass Setpoint* -kohdassa.

Fuel Pressure Control- ja *Boost Controller* -tekijät vaikuttavat prosentuaaliseen polttoainemassan arvoon (kuva 11).

Example:

The **FMSP Fuel Mass Setpoint** [Requested Fuel Mass] = 30%

Bv Fuel Mass Cycle Max_ = 600 mg/cycle

Bv Cylinder Count = 6 [numbers of cylinder]

The fuel mass injected each cycle (2 revolution) is calculated:

$600\text{mg/cycle} * (30\% / 100) = 180 \text{ mg/cycle}$

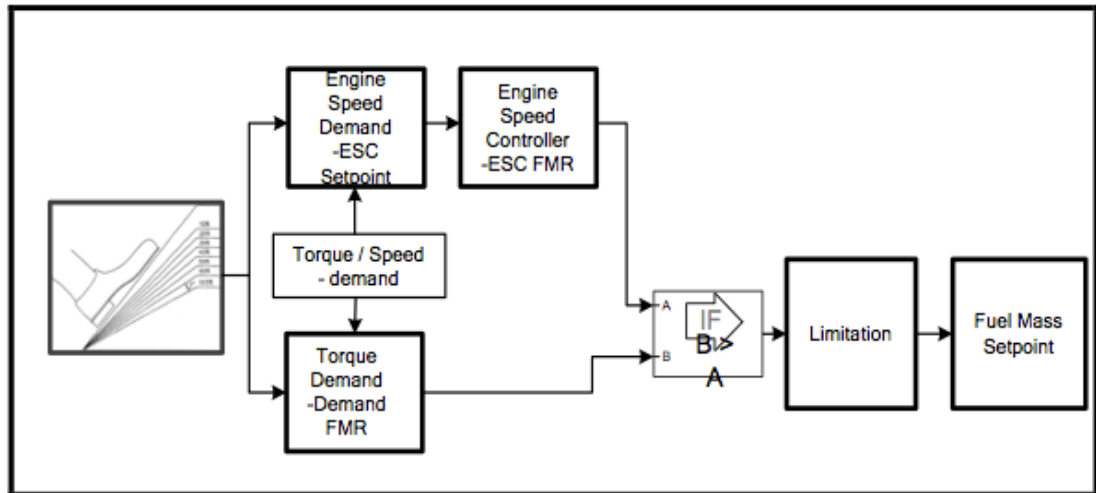
The fuel mass injected each stroke (eg. per cylinder)

$180 \text{ mg/cycle} / 6 = 30 \text{ mg/stroke}$

Kuva 11. Polttoaineen massan arvon laskuesimerkki ohjainlaitteen käyttöohjeiden mukaan (7).

Polttoaineen massan arvo, joka on merkitty Niran tietokoneohjelmaan nimellä FMSP, vaihtelee erilaisten tekijöiden vaikutuksesta. Jos moottori on käynnissä, polttoaineen massa säädetään joko moottorin käyntinopeuden säätimen mukaan tai pyydetyn vääntömomentin mukaan. Tässä tapauksessa kyseessä on kaasupolkimen asento. Toinen vaihtoehto tulee esiin, kun moottori on käynnistystilassa, jolloin ohjainlaite laskee polttoainemassan arvon käynnistys-polttoainekartasta. Vääntömomenttia pyydettyä valmiina olevan polttoaineen massan taulukkoarvon lasketaan uudelleen. Mikäli järjestelmä tähän asti on käyttänyt pyydettyjä moottorin nopeusarvoja, hoitaa tarvittavaa

momenttiarvoa moottorin nopeudensäädin. Sama säädin käsittelee myös tyhjäkäyntiä. Kaiken tämän jälkeen muutama korjausarvo hienosäätää polttoaineen massan määrää ennen ruiskutusta. Korjausarvoihin kuuluvat imuilman, jäähdytysnesteen ja öljyn lämpötila, ulkoilman paine ja lämpötila, pakokaasujen lämpötila, tietty savutusarvo, moottorin käyntinopeus sekä polttoaineen massan muutos. (Kuva 12.)



Overview of requested fuel mass.

Kuva 12. Kaavio polttoainemassan muodostumisesta (7).

3.1.3 Ruiskutuksen ajoitus ilman esiruiskutusta

Ruiskutuksen ajoitus ilman esiruiskutusta määritellään asteina taulukossa *Inj Angle Main*, jossa positiivinen kulman arvo tarkoittaa kulmaa ennen yläkuoloa (kuva 13).

NIRA rk NAP 2.13.4 - OFFLINE - Gera 7.2.2013_09.00.i3d

File Edit Tools Wizards Engine Setup Mappings Help

Standard

0 Preferences 1 Engine Setup 2 Mappings 3 Panels

All parameters

- 1. Fuel
 - 1. Basic
 - 2. Injection Control
 - 4. Pressure Control
- 2. Engine Start
 - 1. Injection control
- 3. Boost Control
 - 1. Fixed Duty
 - 2. Closed Loop
- 4. RPM Control
 - 1. RPM Limit
 - 2. RPM Control
- 5. AUX
 - 2. Output
- 7. Histogram
- 8. EGR
- Monitor Output
 - . Alarm

Item name	Value	Unit
Inj Angle Main	--	csd
Inj Angle Main 2	--	csd
Inj Angle Main Ect Comp	--	csd
Inj Angle Main Ect Factor	--	%
Inj Angle Pilot1	--	csd
Inj Angle Pilot1 Ect Comp	--	csd
Inj Angle Pilot1 Ect Factor	--	%
Inj Angle Post	--	csd
Inj Angle Start Main	--	csd
Inj Mass Pilot1	--	%
Inj Mass Pilot1 Ect Comp	--	%
Inj Mass Pilot1 Ect Factor	--	%
Inj Mass Post	--	mg

Kuva 13. Ruiskutuksen säätötaulukkoita

Kyseiseen kulmaan vaikuttavat korjausarvot ovat *Inj Angle Main Boost* eli maksimaalinen sallittu kulman korjausarvo ahtopaineen olleessa määrittelemätön; *Inj Angle Main Boost factor* eli prosentuaalisesti maksimaalinen kulma, jota voi käyttää ahtopaineen olleessa määrämätön; *Inj Angle Main ECT Comp.* eli maksimaalinen kulman korjausarvo riippuen jäähdytysnesteen lämpötilasta; *Inj Angle Main ECT Factor* eli maksimaalinen kulma, jota voi käyttää riippuen jäähdytysnesteen lämpötilasta sekä *Inj Angle Main Comp.* eli kulman pääkorjausarvo perustuva polttoaineen lämpötilaan, ulkoilman paineen ja imuilman lämpötilaan (kuva 14).

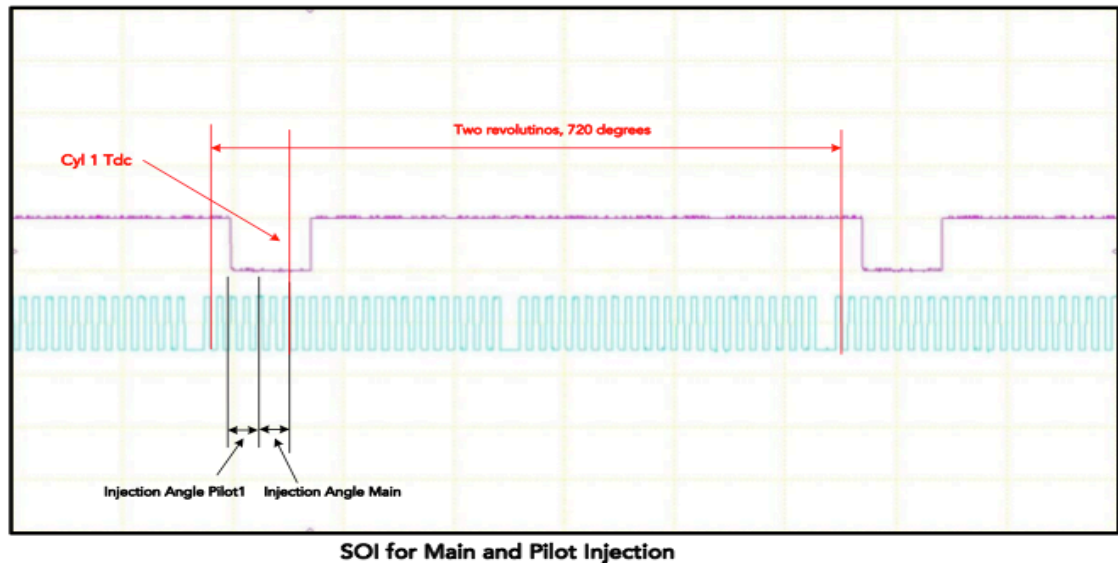
Example. (SOI for main injection without Pilots)	
Inj Angle Main = 8 csd	
Inj Angle Main Boost = -3 csd	
Inj Angle Main Boost Factor = 50%	[Boost Comp total = -3 x 0,5 = -1.5 csd]
Inj Angle Main ECT Comp = -5 csd	
Inj Angle Main ECT Factor = 0%	[Ect Comp total = -5 x 0 = 0 csd]
Inj Angle Main Comp = -1 csd	
Injection angle: 8 +(-1.5) + (0) + (-1) = 5,5 csd BTDC	

Kuva 14. Laskuesimerkki pääruiskutuksen ajoituksesta ilman esiruiskutusta (7).

Edellä esitetty edustaa havainnollistaa tyypillistä yleiskuvaa perussäädöstä Nira i7r -ohjainlaitteella. Tarkoituksena on kuitenkin käyttää esiruiskutusmahdollisuutta nakutuksen ja melun vähentämiseksi. Esiruiskutusmahdollisuus on hyvä olla olemassa myös pääruiskutuksen palamisreaktiota ajatellen, sillä se parantaa palamisreaktiota.

3.1.4 Esiruiskutus

Esiruiskutus takaa pehmeämmän moottorikäynnin, vähentää nakutusvaaraa ja sallii pääruiskutuksen siirron moottorin erilaisissa käyttötilanteissa tutkimuksen kannalta sopivalla hetkellä kohdistamalla paineen kasvua palotilassa oikeaan aikaan (kuva 15).



Kuva 15. Esi- ja pääruiskutuksen aloitus toisiinsa nähden (7).

Säädettäessä ohjainlaitteen *Inj Angle Pilot 1* -säätökartalla esiruiskutusta tulee huomiota kiinnittää seuraaviin seikkoihin: taulukkoon annettava kulma-arvo on esiruiskutuksen kulma ennen pääruiskutuksen alkua; esiruiskutuksen massan määrä määräytyy prosentteina valmiiksi lasketusta kokonaispoltoainemassasta ja kun esiruiskutus on aktivoitu, käytetään pääruiskutuksen *Inj Angle Main2* -taulukkoa *Inj Angle Mainin* sijaan.

Esiruiskutusta aktivoidaan säätämällä prosentti-arvoja *Inj Mass Pilot 1*-taulukossa. Kun esiruiskutuksen ruiskutusmassan arvo ylittää ruiskutusajan verrattuna pienimpään mahdolliseen ruiskutusaikaan, astuu esiruiskutus voimaan. Samalla ohjainlaite siirtyy taulukosta *Inj Angle Main* käyttämään taulukkoa *Inj Angle Main2*.

Inj Mass Pilot 1 on esiruiskutuksen päätaulukko, joka pohjautuu ruiskutettuun polttoainemassaan yhden moottorintahdin aikana. *Inj Mass Pilot 1 ECT* on suurin kulman korjausarvo ja riippuvainen jäähdytysnesteen lämpötilasta. *Inj mass Pilot 1 ECT Factor* on prosentti maksimaalisesta kulmasta, jota voi käyttää jäähdytysnesteen lämpötilan vaikutuksesta (kuva 16).

Example. (Pilot injection mass)	
Inj Mass Pilot1 = 40 %	
Inj Mass Pilot1 Ect = 20 %	
Inj Mass Pilot1 Ect Factor = 30 %	[Inj Mass Pilot Ect Corr = 20% x 0,3 = 6 %]
Fuel Mass Pilot 1 = 40 % + 6% = 46% (of fuel mass / stroke)	

Kuva 16. Esimerkki esiruiskutusmassan korjausarvojen vaikutuksesta (7).

3.1.5 Ruiskutuksen ajoitus käyttämällä esiruiskutusta

Pääruiskutuksen ajoitusta säädetään *Inj Angle Main2* -taulukolla, kun esiruiskutus on aktivoituna. Positiivinen kulman arvo tarkoittaa ruiskutuksen alkua ennen yläkuolokoh-
taa.

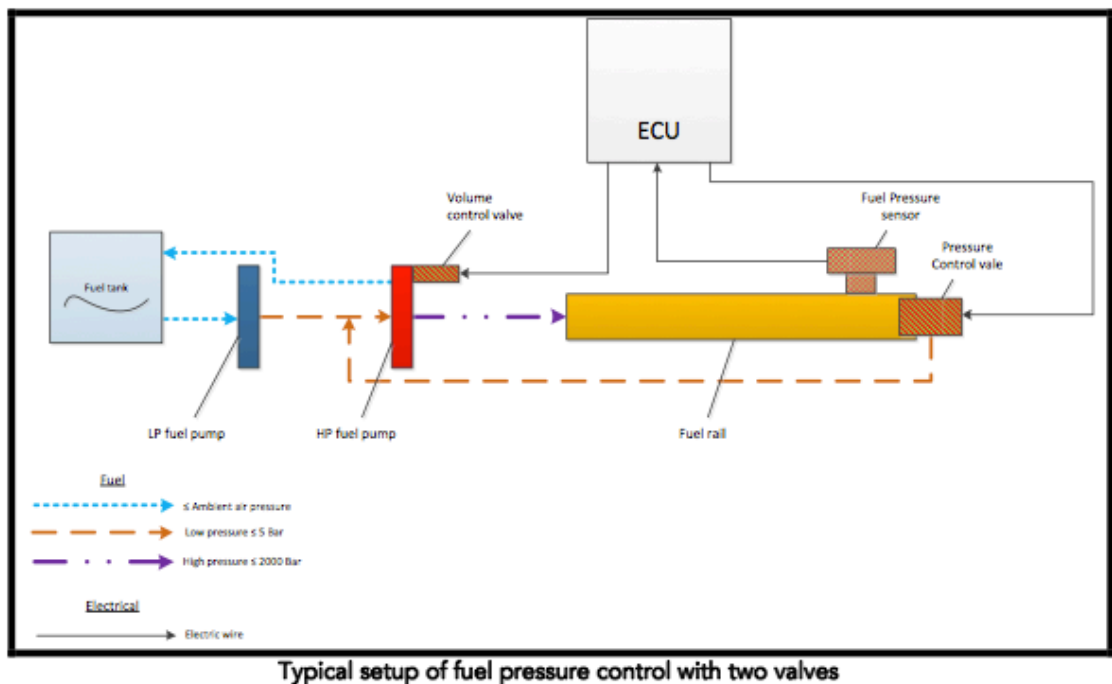
Samat korjausarvot vaikuttavat tähänkin ruiskutuksen aloituskulmaan kuten pääruisku-
tukseen ilman esiruiskutusta (kuva 17).

Example. (Injection angle for pilot injection)	
Inj Angle Main 2 = 6 csd	
Inj Angle Pilot 1 = 12 csd	
Inj Angle Main ECT = 8 csd	
Inj Angle Main ECT Factor = 40 % =>	[Ect Comp total = 8 x 0,4 = 3,2 csd]
Inj Angle Main Comp = 0 csd	
Injection angle pilot 1: 12 + 3,2 + 0 = 15,2 csd Before Main Injection	
Injection Angle pilot 1: 12 + 3,2 + 0 + 6 = 21,2 csd BTDC	

Kuva 17. Esimerkki esiruiskutuksen aloituksesta (7).

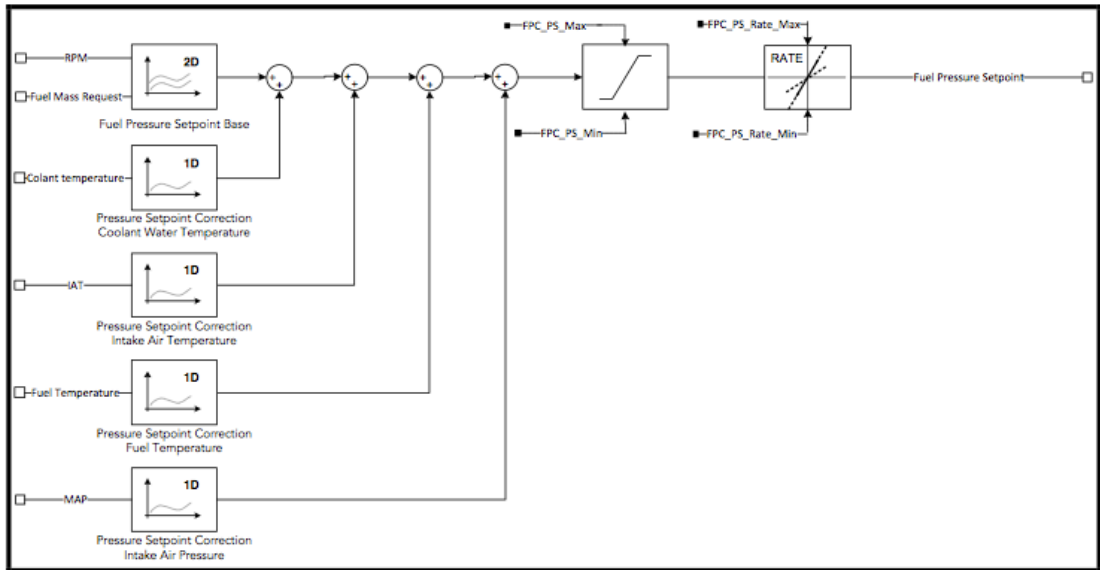
3.1.6 Polttoainepaineen säätö

Nira i7r -moottorinohjainlaite kykenee ohjaamaan molempia VCV- ja PCV-venttiilejä yhtäaikaista tai pelkästään VCV-venttiiliä. Jos käytetään molempia paineensäätimiä, ohjataan PCV-venttiiliä *open loop* -tilassa ja kun taas VCV-venttiiliä ohjataan *closed loop* -tilassa. Kun polttoainepaineen säätimenä käytetään pelkästään VCV-venttiiliä, se on kytkettävä ulostuloon (laitteessa *output*), sillä se tukee *closed loop* -tilan ohjausta. (Kuva 18.)



Kuva 18. Ohjainlaitteen valmistajan esittämä polttoainepaineensäätö järjestelmästä (7).

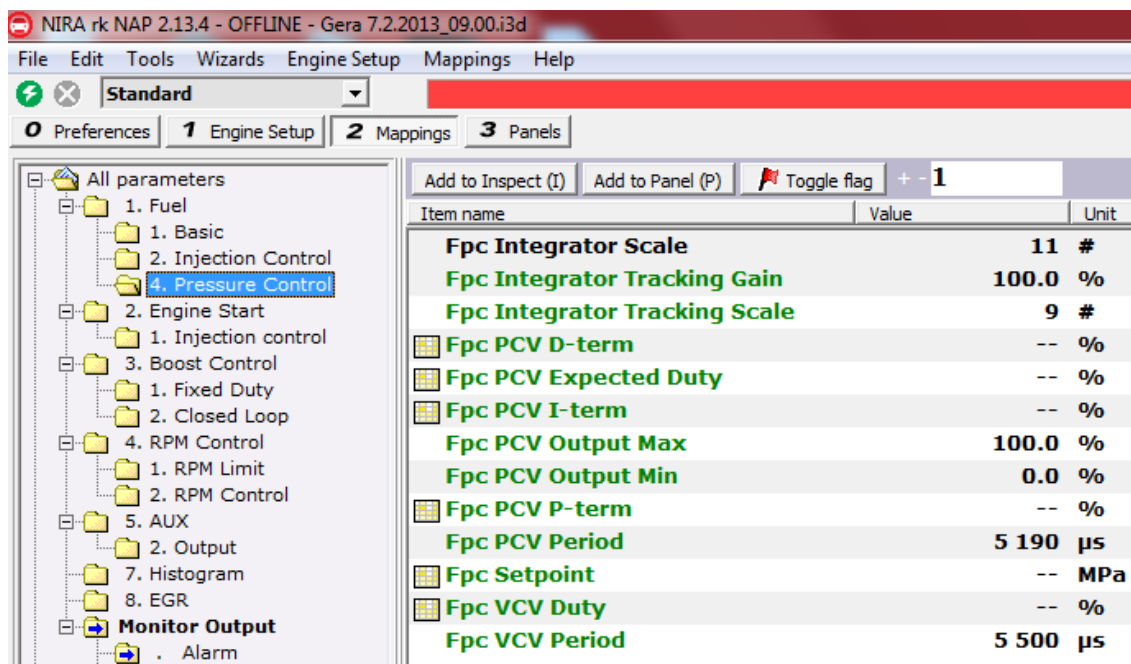
Polttoainepaineen ohjearvo määräytyy lähtöarvon perusteella, johon myös kuuluu korjausarvoja. Korjausarvona ovat moottorin jäähdytysnesteen lämpötila, polttoainepaineen lämpötila, imusarjan ilman paine ja lämpötila (kuva 19).



Kuva 19. Polttoainepaineen arvoon vaikuttavat korjausarvot (7).

Fpc VCV Duty tarkoittaa polttoaineen annostusventtiilin käyttömäärä *open loop* -tilassa. *Fpc VCV Duty Max Rate* tarkoittaa polttoaineen annostusventtiilin käyttömäärän maksimaalinen sallittu muutos. *Fpc VCV Period* tarkoittaa tietyn ajanjakson aikaa korkeapainepumpun venttiilille.

Fpc Setpoint tarkoittaa päätaulukkoa, johon syötetään toivottuja polttoaineen paineen arvoja. *Fpc Setpoint ECT Comp* tarkoittaa korjausarvo toivottuun polttoainepaineen arvoon, joka riippuu jäähdytysnesteen lämpötilasta. *Fpc Setpoint Fuel Temp Comp* puolestaan tarkoittaa korjausarvoa suhteessa toivottuun polttoainepaineen arvoon, joka riippuu polttoaineen lämpötilasta. *Fpc Setpoint Max/Min* on polttoainepaineen minimi- ja maksimiarvo. (Kuva 20.)



Kuva 20. Polttoaineen säätöön vaikuttavat säätökartat

Nira-ohjainlaitteen valmistaja suosittelee käyttämään *Logging*-toimintoa säädettäessä polttoaineen painetta kahdella paineen säätöventtiileillä.

3.2 Turboahdin

Varsinaisia moottorin säätötuloksia ja numeroita ei tässä työssä esitetä, sillä työn loppuvaiheessa paljastui, että pakokaasuahdin on epäkunnossa, eikä saaduilla arvoilla näin ollen ole merkistystä jatkosäädön kannalta. Ahtimen imu- ja pakosiivet eivät pyörineet, mikä tarkoittaa sitä, että koko akseli, jolla imu- ja pakosiivet sijaitsivat, oli jumissa. Siipien ympärille oli kerääntynyt likaa, joka piti ne paikoillaan. Tällaisessa tilassa ilmvirtaukset sylinteriryhmään olivat koko lailla muuta kuin niiden tulisi olla, eikä myöskään pakokaasujen poistuminen sylintereistä toiminut, jolloin pakokaasut tuli poistaa erikseen. Periaatteessa sylinterit tekivät ylimääräistä työtä ilman imuaikana ja pakokaasujen työntöaikana. Edellä mainittua likaa olikin siten poistettava turboahdinta purkamalla ja lämmittämällä. Ahdin päätettiin vaihtaa uuteen ennen moottorin lopullista asennusta demonstraatioajoneuvoon. Tulevat moottorin säädöt suoritetaan vanhalla ahtimella tarkkailemalla samalla sen toimivuutta.

Tässä vaiheessa työtä tarkastettiin ahtimen öljynsaantia. Tässä yhteydessä paljastui, että öljynsaantiin liittyvässä toiminnassa ei ollutkaan vikaa. Tietoa siitä, milloin ahdin on mennyt jumiin tai siitä, kuinka pitkän ajan se tässä tilassa oli ollut, ei ole. Pitkästä moottorin käytöstä ilmanjäähdyttimeen oli kerääntynyt normaalia poikkeava öljymäärä, joka mahdollisesti oli ajallaan päässyt sylinteriin ainakin haihtumalla. Poikkeavan öljymäärän kerääntyminen saattaisikin olla syynä ahtimen siipien tukkeutumiseen. Toisalta turboahtimen olleessa jumissa ahtimen voiteluöljy ei välttämättä päässyt kiertämään, mikä puolestaan saattaisi aiheuttaa sisäisiä vuotoja esimerkiksi siipiä seuraavaan imuputkeen. Jatkossa tuleekin seurata mahdollisia öljykerääntymisiä moottorin imupuolelle.

Kyseisen lian muodostumuksesta voi seurata myös pakokaasujen lämpöantureiden ja lambda-anturin vääristynyt mitta-arvo. Se on otettava huomioon, kun antureita tulevaisuudessa voidaan kytkeä ja käyttää.

Turboahdin on säädetty toistaiseksi *Fixed Duty* -tilaan, eli muuttuvageometristen siipien asento on vakioasennossa suhteessa turboahtimen siipiin. Kyseistä tilaa muutetaan säädettyäessä kaikki moottorin laitteet kokonaisuutena.

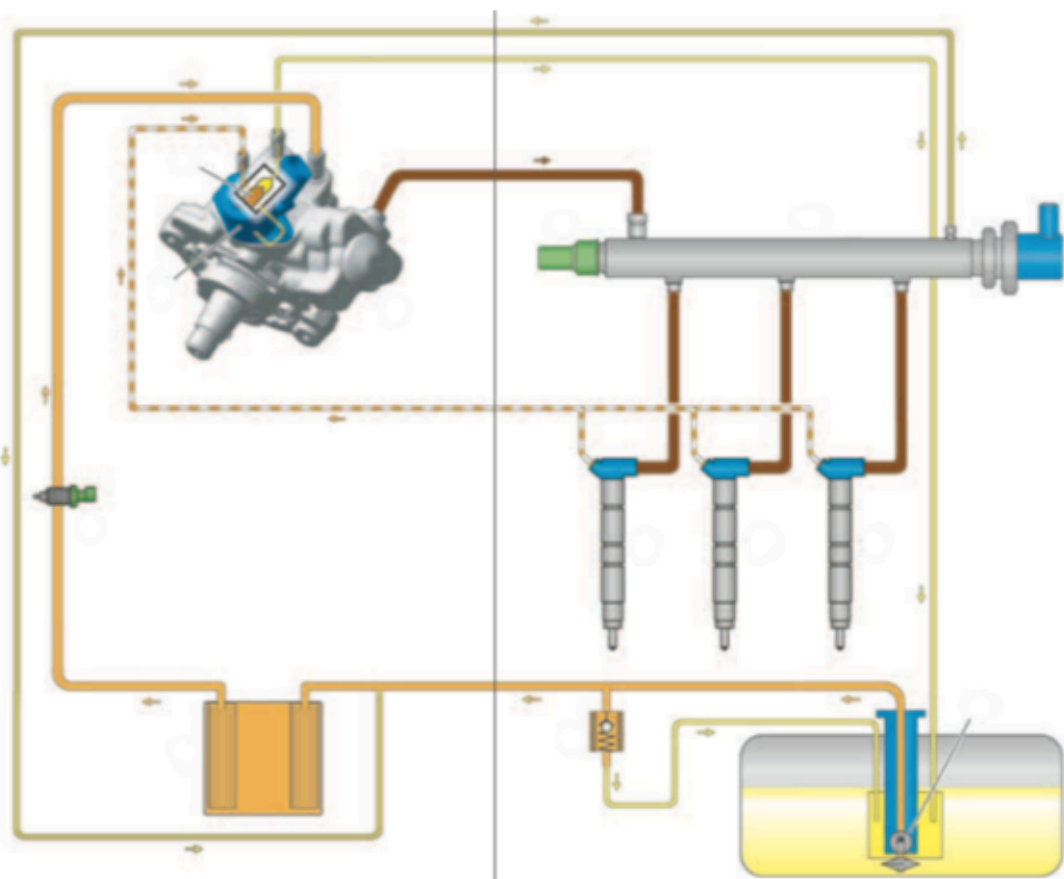
3.3 Jäähdytinneste

Moottorin jäähdytinnesteessä huomattiin työn edetessä ruosteen muodostumia. Aluksi syyn ajateltiin olevan sisätilan lämmityskennon ohitusputken väärän materiaalin valinnassa. Ohitusputki vaihdettiin ja sen jälkeen moottorin jäähdytinnestettä vaihdettaessa ainakin kahdesti puolen vuoden sisällä havaittiin jälleen ruosteen muodostumia aineessa. Koko moottorin jäähdytysjärjestelmä on huuhdeltu vedellä ruosteen muodostumien poistamiseksi ennen jäähdytysjärjestelmän täyttöä uudella jäähdytinnesteellä. Jäähdytin ja loput jäähdytysjärjestelmästä huuhdeltiin erillään toisistaan. Molemmista on tullut ulos hyvin ruosteista huuhteluvettä. Seuraavan moottorikäynnin yhteydessä digitaalisella lämpömittarilla moottorin ja jäähdytinnesteen lämpötilaa moottorin ja letkujen eri kohdista mitattaessa kävi ilmi, että mootori ei ole päässyt lämpenemään tarpeeksi ja että termostaatti ei avannutkaan isompaa jäähdytyskiertoa.

Käytännössä jäähdytysveden neste jäähdyttimessä ei kiertänyt (eikä edelleenkään kierrä) ollenkaan tai kiertää erittäin vähän ja hitaasti. Se voi olla yksi syistä siihen, miksi ruostetta kerääntyy jäähdytysjärjestelmään, koska vesi ja jäädynnesteen liuos eivät seikoitu toisiinsa. EGR-järjestelmän jäähdytysveden kiertoa on pidetty moottorin käynnin aikana päällä omalla sähkömoottorilla.

3.4 Polttoaine-linja

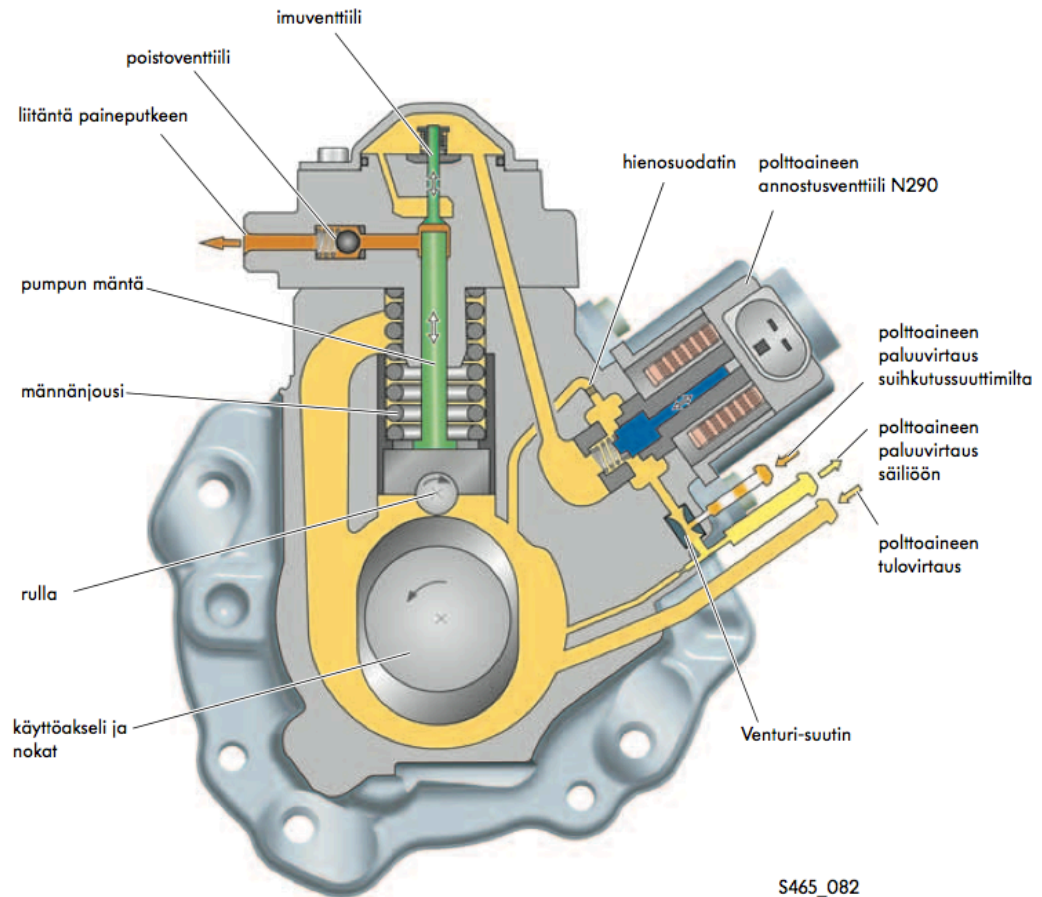
Virhemahdollisuuden vähentämiseksi polttoainelinjaa päätettiin muuttaa alkuperäiseen muotoonsa moottorin ohjausjärjestelmän säätöajaksi (kuva 21).



Kuva 21. Moottorin vakiopolttoainejärjestelmä (4, s. 15–16.)

3.4.1 Polttoaineen korkeapainepumppu

Korkeapainepumppu on yksimäntäpumppu, joka toimii kampiakselista hammashihnan välityksellä silloin, kun moottori on päällä (kuva 22).

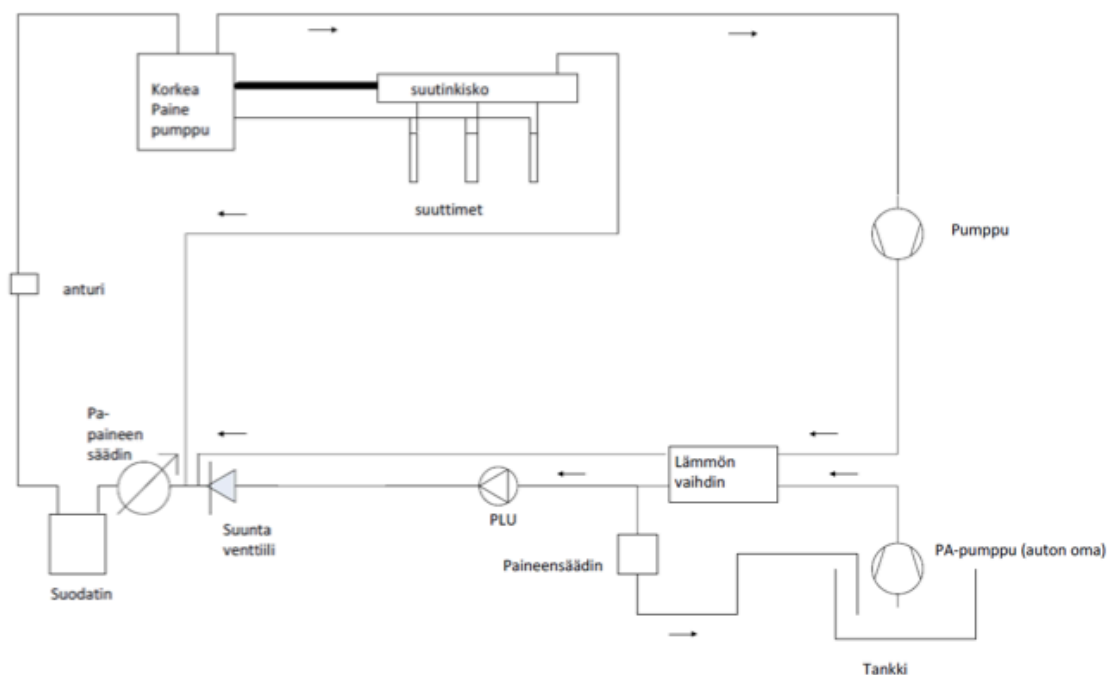


Kuva 22. Korkeapainepumpun rakenne (4, s. 22.)

Polttoaineen virtaus säiliöön korkeapainepumpusta tapahtuu jatkuvasti noin 0,3 baarin paineella ja aiheuttaa venturisuuttimessa imua. Kyseinen imu kohdistuu suuttimien paluuvirtaukseen, joka on noin 0,1–0,5 baaria alipainetta. Alipaine auttaa ja nopeuttaa suuttimen suihkutusventtiilin avautumista ja sulkemista. Näin suutin reagoi nopeammin. Kyseisten suuttimien ohjearvoista poikkeavat alipainevaihtelut voivat aiheuttaa niiden toimintahäiriöitä ja moottorin tehohäviöitä suurella kuormituksella. (4, s. 16–17.)

Kuvassa 23 esitetty kehitetty polttoainelinja käytännössä kasvattaa ruiskutussuuttimien paluulinjaa varten tarkoitettua alipainetta, koska korkeapainepumppu ei enää työnnä

noin 0,3 baarin paineella polttoainetta tankkiin, vaan erikseen asennettu lisäpolttoainepumppu imee sitä, sillä dieselin virtaus venturisuuttimessa kasvaa ja kasvattaa alipainetta suuttimien paluuvirtauksessa. Käytännössä alipaine pitää mitoittaa uudella polttoainejärjestelmällä. Jos alipaine poikkeaa ohjearvoista, pitää tehdä testejä eri kuormituksilla moottoridynamometrissa ja seurata, miten kehitetty polttoainelinja vaikuttaa moottoriin toimintaan, vääntöön, tehoon, kulutukseen ja päästöihin. Tämän tutkimuksen aikana niitä testejä ei tehty. (4, s. 21–32.)



Kuva 23. Muutettu polttoainejärjestelmä (1)

On myös huomattu, että korkeapainepumppua säädetty tuottamaan vähintään 100 MPa, jopa tyhjäkäynnillä ja pienillä kuormilla. VW-itseopiskeluohjelmasta (4, s. 16) nähdään pumpun polttoaineen paineen ohjearvon toimintaraja olevan 23–180 MPa. Käytännössä tällä hetkellä pumppu pyrkii tuottamaan liikaa polttoainepainetta ja samalla käyttää liikaa kampiakselin tehoa ylimääräisen paineen kehittämiseksi. Mitoituksia pumpun kehittämästä polttoainepaineesta erilaisissa kuormitustilanteissa ja kierrosaluilla vakimoottorista ei ole tehty.

Pumpun ohjaus tapahtuu moottorinohjainlaitteella. Sillä säädetään korkeapainepumpun integroitua polttoaineen annostusventtiiliä, joka päästää säädöstä riippuen pienemmän tai suuremman määrää polttoainetta korkeapainepuolelle. Venttiilin säätölo-

giikan ymmärtämiseen ohjainlaitteella on mennyt paljon aikaa, mutta kokeiluperiaatella saatiin jonkinlaisen kuvan säätölogiikasta. Moottorin ohjainlaitteen käyttöohjeiden saapuessa projektiryhmään kytkenät tarkastettiin, jolloin huomattiin PCV- ja VCV-venttiilien kytkentä ristiin. Kyseinen virhe saatiin kuitenkin helposti korjattua vaihtamalla venttiilien liitinpinnit keskenään ja tämän jälkeen moottorin säätöä jatkettiin.

Moottori alkoi tämän jälkeen toimia epätasaisemmin kuin ennen, mutta polttoainepaineen säätöarvojen muuttamalla saatiin tasaisempi käynti. Tässä vaiheessa ilmeni korkeapainepumpun pitävän epätavallista toimintaääntä, kokeet välittömästi pysäytettiin ja alkoi äänen syyn selvitys. Lopulta selvisi, että oli olemassa kaksi keskenään ristiriitaista kytkentäohjetta, jotka molemmat oli tosin saatu aikoinaan ohjainlaitteen valmistajalta. Ottamalla yhteyttä valmistajaan selvisi, että ohjainlaitteen ohjekirjassa on kytkentävirhe. Edellinen kytkentä ennen korjausta oli oikea. Tämä kytkentä on esitetty kuvassa 18. Näin ollen tiedostossa "engine start checklist_i7r_A1" on oikeat kytkentäohjeet ja "Nira i7r Handbook A" sisältää vääriä kytkentäohjeita PCV- ja VCV-venttiilejä varten, joskin CCO4- ja CCO3-nimet ovat oikeita (kuva 24).

Connection of VCV							
Variation	Actuator Pin	NIRA i7r pin	Name				
VCV & PCV valve fitted	12v Supply	Main Rly kl87					
	Signal	E.104	CCO4				
VCV valve only	12v Supply	Main Rly kl87					
	Signal	E.83	CCO3				

Kuva 24. Vasemmalla on oikea PCV- ja VCV-venttiiliin kytkentä, oikealla on kytkentävirhe

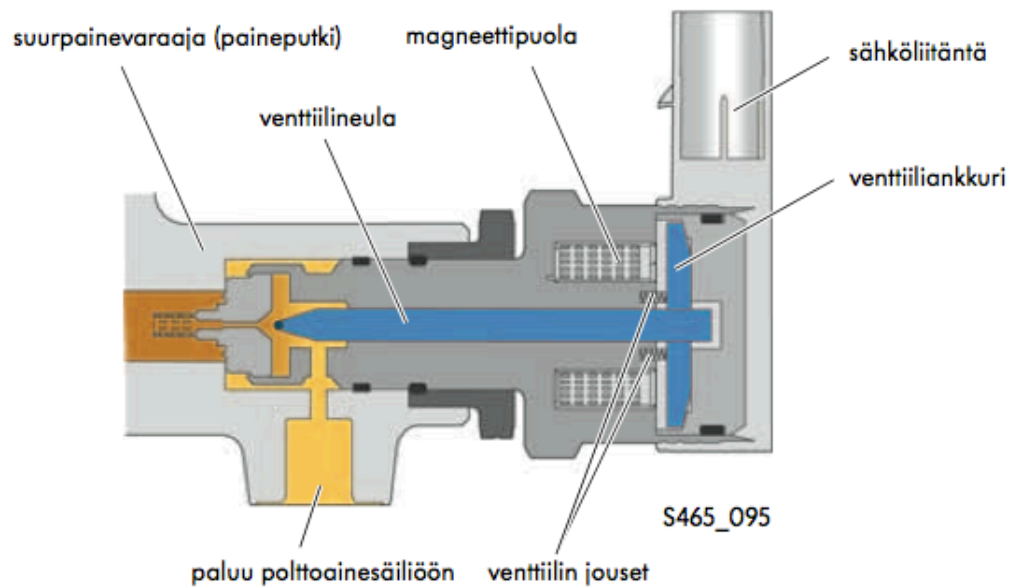
3.4.2 Polttoaineen paineen säätöventtiili

Kyseessä on suurpainevaraajassa oleva kiinni polttoaineen paineen säätöventtiili. Venttiilin alkuperäinen tarkoitus on nopeasti lämmittää polttoainetta ja polttoainesuodatinta päästämällä sitä suurpainevaraajasta takaisin painepuolelle ennen suodatinta moottorin olleessa kylmä. Samalla suurpainevaraajaan mahdollisesti kerääntyneet ilmakuplat poistuvat ja saadaan varmempi käynnistys. Korkeapainepumppua ohjataan tuottamaan enemmän polttoainetta, kuin mitä tarvitaan suihkutukseen ja ylimääräinen määrä polttoainetta ohjataan paineen säätöventtiiliin kautta takaisin kierto. Myös polttoaineen suodattimen tukkeutuminen parafiinin kiteytymisen vuoksi estetään alhaisessa ulkolämpötilassa.

Venttiili menee kokonaan kiinni polttoaineen saavuttaessa tietyn lämpötilan, eikä sitä enää käytetä varsinaiseen polttoainepaineen säätöön vaan korkeapainepumppu huolehtii sopivasta annostuksesta suuttimille.

Polttoainelinjaan tutustuttaessa on huomattu, että kyseistä paineensäätöventtiiliä käytetään varsinaisena polttoaineen paineen säätimenä. Käytännössä polttoaine virtaa jatkuvasti venttiilin läpi ja lämpenee koko ajan kun moottori on päällä, mikä ei ole tarkoituksenmukaista silloin, kun moottori on käyttölämmiin.

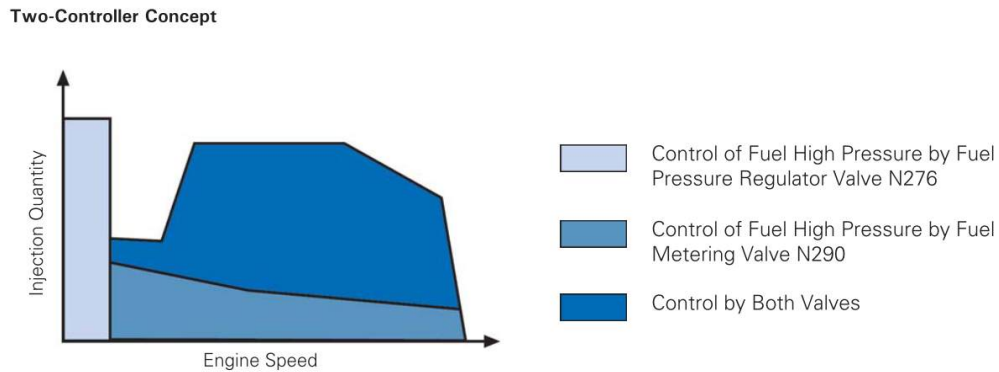
Alla olevassa kuvassa kohdassa *paluu polttoainesäiliöön* on virhe, sillä todellisuudessa kyseessä on paluu polttoaineen painepuolelle ennen polttoainesuodatinta (kuva 25).



Kuva 25. Suurpainearaajan polttoaineen paineensäädin (4).

Paineensäädintä ei voi jättää kytkemättä, sillä on mahdollista, että olisi tarvetta jättää sitä käyttämättä ja ohjata painetta pelkästään korkeapainepumpun venttiilillä. Virran ja signaalin ollessa pois päältä paineensäätimen venttiili on täysin auki venttiilijousien ansiosta ja päästää polttoainetta, sillä suuttimille ei muutoin kehity oikeaan ruiskutukseen riittävästi polttoainepainetta.

Nira-ohjainlaitteen valmistaja on myös esittänyt valmistajan näkemyksen mukaisen yleisen polttoainepaineen säätölogiikan, jossa käytetään tietyissä tilanteissa PCV- ja VCV-venttiiliä. Kyseisessä strategiassa molemmat venttiilit ovat vuorotellen tai samaan aikaan käytössä moottorin käyntinopeudesta ja tarvittavasta ruiskutusmäärästä riippuen. (Kuva 26.)



Kuva 26. Ohjainlaitteen valmistajan esittämä PCV- ja VCV-lenttiin ohjauslogiikka

Täällä hetkellä PCV-venttiili päästää tyhjäkäynnillä jatkuvasti polttoainetta läpi, mutta polttoainepainetta riittää pitämään moottoria päällä.

4 Kytkentä

4.1 Moottorin johtosarja

Paras tapa tarkastaa valmiina olevia kytkentöjä on käydä ne läpi. Tällöin nähdään kaikki kytkettynä ja kytkemättömänä olevat johdot ja laitteet. Myös heikot ja epävarmat kontaktit liitoskohdissa todennäköisemmin paljastuvat.

Tarkastuksen yhteydessä huomattiin monien käyttölaitteiden ja antureiden liitettynä samaan syöttövirta-johtoon, samanlainen tilanne on myös maadoituksen kohdalla. Tällainen kytkentä toimii tilapäisenä ratkaisuna moottorin säätöaikana, varsinkin kun moottorin ohjainlaitteen päällimmäisestä löydetty rikkinäisiä pinnipaikkoja. Siis sen vuoksi jotkut johdot eivät pysy liittimessä kiinni, kun liittimen kytketään moottorin ohjainlaitteeseen.

Moottori on siis erillään ajoneuvosta. Jatkossa käyttölaitteet saa omia virta- ja maadoitusjohtoja. Tämän asian tulee ottaa huomioon virittäessä uuden johtosarjan moottoriin.

Näkyvillä olevat johdot pujotetaan suojakuoriin sotkun ja ulkoisten vaurioiden välttämiseksi.

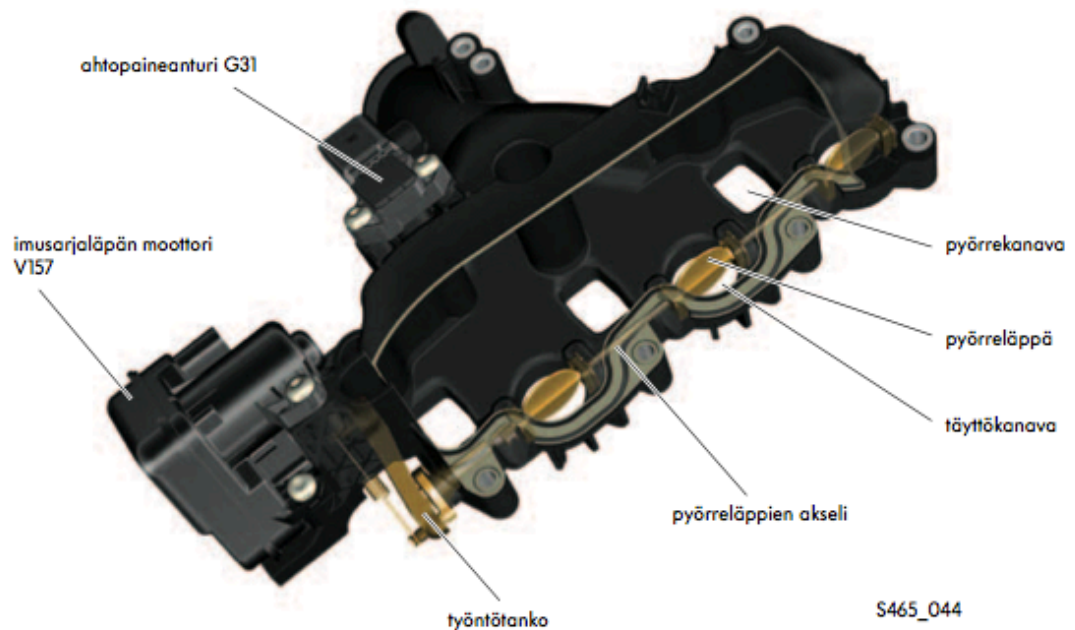
4.2 Moottorin käyttölaitteet

4.2.1 Pyörreläpät

Pyörreläpät päätettiin säätöjen alkutilanteessa säätää täysin auki olevaan asentoon, koska moottorin perussäätöjä tutkittu ja tehty moottorin olevana sammuksissa tai tyhjäkäynnillä. Moottoria käynnistettäessä ja joutokäynnin aikana tarvitaan sylintereiden paras täyttö. Läppien ollessa auki ne päästävät ilmaa kulkemaan täyttö- ja pyörrekanavien pitkiin sylintereihin.

Pyörreläppiä ohjataan imusarjaläppän moottorin kautta, joka on kytketty Nira i7r -ohjainlaitteeseen. *Fixed duty* -tila pitää pyörreläpät tietyssä asennossa syötetyn asentoarvoon mukaan. Jatkossa kyseinen tila pitää vaihtaa muuttuvaan ja ajotilanteista riippuvaan tilaan. Näin palotilassa tulee olemaan mahdollisimman ihanteellinen ilmanliike. (Kuva 27.)

Rakenne



Kuva 27. Imusarjan rakenne (4)

4.2.2 Kaasuläppä

Kaasuläpän tarkoitus dieselmootorissa on tietyissä aiheuttaa paine-eroa imu- ja pakokanavan välille. Sillä saavutetaan voimakkaasti toimivan pakokaasujen takaisinkierätyks. Samalla laitteella pystytään vaikuttamaan myös hiukkassuodattimen puhdistukseen säätämällä imuilman määrää. Läpän toinen tehtävistä on myös takaa pehmeämmän moottorin sammutuksen, kun läppä menee kiinni.

Kaasuläpässä on potentiometri, jonka avulla ohjainlaite saa tietoa läpän asennosta tietyn signaalin perusteella. Ohjainlaite käyttää kaasuläpän sähkömoottoria niitä säätäessä.

Kaasuläpän ohjauksesta on sovittava ohjainlaitteen valmistajien kanssa EGR-strategiaa ajatellen.

4.3 Moottorin anturit

4.3.1 Lambda

Tässä dieselmootorissa käytetään lambda-anturia määrittämään pakokaasuissa olevan hapen määrän laajalla mittausalueella. Anturin signaalia käytetään vertailuarvona säädettäessä pakokaasujen takaisinkierrätysmäärän.

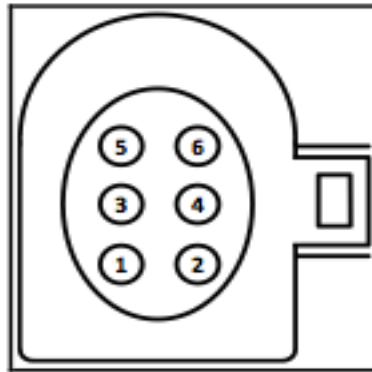
Lambda-anturina käytetään hankittua LSU 4.9 -mallia. Anturin puolella olevat liittimen pinnien nimitykset ja niiden tarkoitus olivat tiedossa. Ongelmana oli löytää ohjainlaitteen puolella oikeat pinnipaikat, koska ne eivät täsmänneet lambda-anturin omiin pinninimityksiin. Ainoa merkintä, joka oli luettavissa liitinpinneista ohjainlaitteen puolella, oli "LS1", joka tarkoittaa Labda Sensor numero 1:tä. Kyseiset pinnit on merkitty vaaleapunaiseksi ja keltaiseksi (kuva 28). Enää piti selvittää mitä tarkoittavat lyhenteet CP, CA, VN, VG ja HT. Selvityksen jälkeen lyhenteet paljastuivat seuraaviksi: *CP – pump current*, anturin pinni nro 1; *CA – individual trim*, anturin pinni nro 5; *VN – nernest voltage*, anturin pinni nro 6; *VG – virtual ground*, anturin pinni nro 2 ja *HT – Heater*, anturin nro 3. Anturin syöttövirtaa tulee pääreleestä pinnille nro 4.



Kuva 28. Osa ohjainlaitteen liittimen pinneistä

Myöhemmässä vaiheessa kyseessä olevia kytkentöjä on pystytty tarkistamaan ohjainlaitteen käyttöohjeen mukaan ja tehdyt kytkennät ovat osoittautuneet oikeiksi verrattessa keskenään (kuva 29).

LSU 4.9 Pin	Nira i7r Pin	Description
Pin 1	V.82 LS1 IP / APE	Pump current
Pin 2	V.66 LS1 VM / IPN	Ground Pump current
Pin 3	V.40 LS1 U- / H-	Lambda Heater PWM
Pin 4	Main RLY kl 87	Lambda Heater Supply
Pin 5	V.65 LS1 IA / RT	Individual trim
Pin 6	V.83 LS1 UN / RE	Nernest voltage



LSU 4.9 Connector, rear view.

Kuva 29. Lambda-anurin kytkentäkaava (7)

Lambda-anturia ei vielä voi käyttää, koska pakokaasujen takaisinkierrätyksestä strategian ohjelmoinnin toteutumisesta pitää käydä keskustelua ohjainlaitteen valmistajan kanssa.

4.3.2 Ilmamassamittari

Imetyn ilmamassan arvoa käytetään säätäessä pakokaasujen takaisinkierrätyksen määrä ja hiukkassuodattimen regeneroinnin yhteydessä. Ilmamassamittarin arvon käyttömahdollisuutta on pitää luoda EGR-strategian toteutumisen yhteydessä.

Ilmamassamittarin arvot on luotu taulukkoon nimeltä *Air Hfm1 Air Mass*.

4.4 Kytkentäkaava

Valmiina olevaan kytkentäkaavaan on lisätty moottoria säätäviä ja ohjattavia käyttölaitteita ja antureita. Myös liittimien ja liitinpinnien numerot ovat lisätty näkyviin, mikä auttaa hahmottamaan johtojen kytkentää ja auttaa suorittamaan mahdollisesti tulevia mittauksia.

5 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyön alussa asettuja tavoitteita ei ole saavutettu. Työn laajuutta ei ollut mahdollista hahmottaa etukäteen ja siihen liittyvät haasteet ja ongelmat selvisivät vasta työn edetessä, jolloin sen laajuuteen liittyvät seikat erityisesti työn keston ja muun toiseikaston osalta kävivät ilmi. Lukuisat yllätykset projektin eri vaiheissa ovat viivästyttäneet aikataulua merkittävästi samoin kuin olleet syynä työn merkittävään laajenemiseen ja rajauksen muuttumiseen.

Yksi suurimmista ongelmista tutkimuksessa olikin jo edellä käsitelty ohjainlaitteen ohjekirjan puuttuminen, mikä johti osaltaan työn sisällön ja rajauksen muuttumiseen työn aikana. Ohjekirjan puuttuminen johtikin mittavaan selvitykseen ohjainlaitteen toiminnan ymmärtämiseksi. Tämä selvitys vaati paljon teoriaan perehtymistä sekä luonnollisesti käytännön kokeiluja ja selvityksiä.

Säätökarttojen ja ohjearvojen vaikutukset toisiinsa eivät olleet aina yksinkertaisia ymmärtää. Insinööryön loppuvaiheessa ohjekirja kuitenkin saatiin käyttöön ja siitä oli suuri apu. Monen kuukauden säätölogiikan selvitys ja ohjainlaitteiden toiminnan testaukset ilman ohjeita olisi hoitunut huomattavasti lyhyemmässä ajassa, mikäli ohjeet olisivat olleet käytettävissä alusta alkaen.

Tutkimuksessa päästiin suorittamaan mittauksia, kytkentöjä ja moottorilaitteiden ohjauksia hankkimalla monipuolisesti teoriaa eri lähteistä. Syvempi perehdytys moottoriteeniikkaan on auttanut hahmottamaan monia kokonaisuuksia moottoria säädettäessä.

Tutkimuksen osalta jäi harmittamaan jumiin olleet turboahdin, koska oikeiden säätöarvojen hakemiseen moottorin joutokäynnillä on mennyt oma aikansa. Niitä säätöarvoja on nyt haettava uudestaan, kun turboahdin jälleen toimii..

Tämän työn pohjalta onkin mahdollista jatkaa jo käynnissä olevaa Nira i7r -ohjainlaitteeseen liittyvää projektia.

Lähteet

- 1 Tiainen, Teemu. 2012. Uusiutuvan dieselpolttoaineen testauksen suunnittelu ja testimoottorin valmistaminen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 2 Kleimola Matti, Pohjanpalo Yrjö. 1981. Autotekniikan käsikirjä. Dieselmoottori. Helsinki: Tammi.
- 3 Auto technology. 11.8.2010. Working of 4-stroke Diesel engine. <<http://autotechz.blogspot.fi/2011/08/working-of-4-stroke-diesel-engine.html>>. Luettu 12.4.2013.
- 4 Itseopiskeluohjelma 465. 2010. 1,2 litran 3-sylinterinen TDI-moottori, jossa common rail -suihkutusjärjestelmä. Wolfsburg: Volkswagen AG.
- 5 Nissan diesel forum. 27.11.2006. Verkkodokumentti. <<http://nissandiesel.dyndns.org/viewtopic.php?p=752>>. Luettu 14.4.2013.
- 6 What is intercooler effectiveness and how do I measure it. Verkkodokumentti. Garrett. <<http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/intercooler-effectiveness>>. Luettu 20.4.2012.
- 7 Nira Motorsport. 10.2012. NIRA i7r Handbook version A.

Moottorin johtosarjan päivitetty kytkentäkaavio

