



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Mikko Kettunen

# Bensiinimoottorin muuttaminen flexi- fuel-moottoriksi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Opinnäytetyö

29.4.2019

Tekijä(t) Otsikko	Mikko Kettunen Bensiinimoottorin muuttaminen flexifuel-moottoriksi
Sivumäärä Aika	32 sivua 29.4.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Heikki Parviainen
<p>Tässä työssä tutkittiin vanhemman harrasteajoneuvon moottorin päivittämistä taloudellisemmaksi, tehokkaammaksi ja puhtaammaksi. Näiden kolmen tavoitteen toteuttaminen samalla kertaa on haastavaa, eikä ongelmaan ole vain yhtä oikeaa ratkaisua. Asiaan haettiin ratkaisua kaksipolttoainejärjestelmästä, jossa moottori käynnistetään kylmänä bensiinillä, näin saavutetaan parempi käynnistyvyys, pienemmät kylmäkäynnistyspäästöt ja parempi moottorin kestoikä. Moottorin lämmettyä siirrytään etanolipohjaiseen polttoaineeseen, jolla on mahdollisuus saavuttaa puhtaammat päästöt, korkeampi teho ja parempi taloudellisuus. Näiden hyötyjen saavuttaminen edellyttää moottorin hyötysuhteen optimoimista kummallakin polttoaineella ja sen takia moottoriin asennettiin ohjelmoitava moottorinohjaus polttoaineenruiskituksen ja sytytysennakon säätöä varten, sekä ahdin dynaamisen puristussuhteen säätöä varten.</p> <p>Kaikki muutokset toteutettiin siten, että ajoneuvo on mahdollista palauttaa täysin alkuperäiskuntoonsa. Muutostöiden tulokset olivat oletusten mukaiset, moottori käy hyvin ja moottorin kaasuun vastaavuus parani selkeästi. Tehoa, kulutusta ja päästöjä ei ole vielä päästy tutki- maan, koska oppilaitoksen tehodynamometri ei ollut opinnäytetyön aikaan käytössä.</p>	
Avainsanat	etanoli, bioetanoli, e85, turbo, Ford ohc, MegaSquirt

Author(s) Title	Mikko Kettunen Modifying Gasoline Engine to Flexifuel
Number of Pages Date	32 pages 29 April 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Heikki Parviainen, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was study how to update a classic car engine to more economical, more powerfull, and cleaner in exhaust emissions. So how can all these targets be implemented at once? In this study one possible approach is introduced. The method that was chosen for this purpose was two-fuel-system, known as flexifuel system. When the engine is cold, it uses 95E10 gasoline as a fuel. In this way engine starts better. Cold start emission can be redused. And engine lasts longer. When the engine has warmed up the fuel is changed to bioethanol based RE85. In this way it is possible to increase engine's power, efficiency and mileage. Exhaust emissions are also reduced. To achieve these benefits the engine's efficiency must be optimized in both fuels, so programmable engine management system is needed to adjust fuel injection and spark advance. The engine's dynamic compression ratio is adjusted by turbocharger.</p> <p>All modifications were accomplished so that the car can be returned easily back to its original condition. The results were as expected. The engine runs well, and responds much faster when the accelerator pedal is pushed. Power, fuel consumption and emissions were not measured yet, because the measuring equipment of Metropolia University of Applied Sciences were out of order at the time when this thesis was written.</p>	
Keywords	ethanol, bioethanol, e85, turbo, Ford ohc, MegaSquirt

## Sisällys

Lyhenteet ja termit	1
1 Johdanto	2
2 Flexifuel-järjestelmä	4
2.1 Flexifuel-järjestelmän hyödyt	4
2.2 Flexifuel-järjestelmän haitat	5
2.3 Saatavuus	6
2.4 Polttoaine	6
2.5 Lainsäädännöllisiä velvoitteita	6
3 Hyötysuhteen optimointi	7
3.1 Puristussuhde	7
3.2 Sytytysennakko	7
3.3 Polttoaineen suihkutuspaine	11
3.4 Suuttimien valinta	12
3.5 Polttoainejärjestelmä	13
4 Koemoottori	15
4.1 Koemoottorin valintaperusteet	15
4.2 Koemoottori	15
4.3 2,0 EFI -moottorin tekniset tiedot (tehtaan ilmoittamat)	16
4.4 Moottoriin tarvittavat muutokset	16
4.5 Moottorin apulaitteisiin tarvittavat muutokset	17
4.6 Moottorin apulaitteiden osat joiden soveltuvuutta tutkitaan	22
4.7 Suoraan ohjelmoitavan moottorinohjainlaitteen kanssa yhteen sopivien apulaitteiden osat	24
5 Ohjelmoitava moottorinohjaus	24

5.1 Moottorinohjauksen valintaperusteet	24
5.2 Moottorinohjaus	25
5.3 Säättöohjelmisto	26
5.4 Autoon asennettavat mittarit	27
5.5 Valitun moottorinohjauksen hyvät puolet	30
5.6 Valitun moottorinohjauksen huonot puolet	31
6 Yhteenveto ja loppupäätelmät	31
Lähteet	32

**Lyhenteet ja termit**

Batch-fire	Polttoaineensuihkutusjärjestelmä, jossa jokainen suutin suihkuttaa polttoainetta samanaikaisesti.
E85	Korkeaseosetanolipolttoaine.
ECU	Engine Control Unit. Moottorinohjausyksikkö.
EGT	Exhaust GasTemperature. Pakokaasun lämpötila.
MAP	Manifold Absolute Pressure. Imusarjan absoluuttinen paine.
MON	Motor Octane Number, Moottorioktaaniluku, joka kuvaa polttoaineen nakutuskestävyyttä raskaalla kuormituksella. Nimi juontuu iso-oktaanista, jonka oktaaniluku on 100 sekä MON- että RON-tutkimusmenetelmillä.
RON	Research Octane Number, Tutkimusoktaaniluku, joka kuvaa polttoaineen nakutuskestävyyttä kevyellä kuormituksella. RON on aina lukuarvoltaan suurempi kuin MON samassa tutkimusmoottorissa mitattuna.
Sequential injection	Sekventiaalinen polttoaineensuihkutusjärjestelmä, jossa jokaista suutinta ohjataan erikseen nokka-akselin asentotiedon perusteella. Järjestelmän etuna on, että polttoaine voidaan suihkuttaa vasta pakaventtiin sulkeuduttua, jolloin polttoainetta ei päädy pakokanavaan.
Speed-density	Imusarjan painetietoon, imuilmanlämpötilaan, kaasuläpän asentoon ja moottorin pyörintänopeuteen perustuva moottorin kuluttaman ilmamääränmittaustapa.
TPS	Throttle Position Sensor, kaasuläpän asentotunnistin
YKK	Yläkuolokohta

## 1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena on tutkia imusarjasuihkutteisen bensiinimoottorin muuttamista siten, että sitä voidaan käyttää optimaalisella hyötysuhteella sekä bensiinillä että bioetanolipohjaisella RE85-polttoaineella.

Suomessa on paljon vanhoja harrasteajoneuvoja, joilla ajetaan suhteellisen vähän joten niiden päästöt ovat pienen ajosuoritteen vuoksi pienet verrattuna muuhun autokantaan. Silti tekniikasta kiinnostuneet ihmiset miettivät usein, että miten vanhaa moottoria voisi muuttaa vastaamaan paremmin tämän päivän standardeja. Yleisimmät tavoitteet ovat kulutus alas, tehot ylös ja päästöt pienemmiksi. Miten nämä kaikki tavoitteet sitten saadaan toteutettua samanaikaisesti? Tässä työssä on esitetty yksi mahdollinen lähestymistapa aiheeseen.

Kohdemoottoriksi pyrittiin valitsemaan mahdollisimman yleinen, luotettava, harrastajien suosima ja yksinkertainen moottori, joka kestää sellaisenaan kohtuullisen tehon lisäyksen ja johon on helposti saatavilla viritysosia, mikäli tehoa halutaan tulevaisuudessa vielä nostaa lisää, kuten tällaisissa projekteissa usein on tapana käydä enemmän tai myöhemmin. Toisaalta koska ei haluttu haukata liian isoa palaa kerralla, niin tässä ensimmäisessä koemoottorissa ei juuri yksinkertaisuuden vuoksi ole sekventiaalista polttoaineen ruiskutusta, eikä muuttuvaa nokka-akselien ajoitusta. Nokka-akseleitakin on vain yksi, tämä moottori on siis kompromissi monilta ominaisuuksiltaan. Tulevaisuudessa on tarkoitus tästä työstä saatujen tietojen ja kokemusten pohjalta rakentaa koemoottori 2. jossa tulee olemaan ainakin sekventiaalinen polttoaineen ruiskutus ja muuttuva venttiilien ajoitus.

Ensin laadittiin alustava suunnitelma ja laskelmat toteutuksesta ja siinä tarvittavien komponenttien mitoituksesta, hankinnasta ja valmistamisesta sekä asennuksesta. Sen jälkeen edettiin vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa moottori muutettiin toimimaan ohjelmoitavalla monipistepolttoaineenruiskutuksella ja todettiin sen toimivan hyvin auton vakio virranjakajasytytyksen kanssa vapaastihengittävänä. Toisessa vaiheessa virranjakajasytytys korvattiin ohjelmoitavalla suorasytytyksellä ja testattiin toimivuus. Kolmannessa vaiheessa moottoriin asennettiin ahdin ja säädettiin polttoaineenruiskutus ja sytytyksenakko ahdettuun moottoriin sopivaksi. Neljännessä vaiheessa rakennettiin RE85 polttoaineelle oma erillinen tankkinsa bensiinitankin rinnalle ja luotiin moottorinohjaukselle toiset kartat RE85 käyttöä silmällä pitäen. Vaihe kerrallaan etenemisen taustalla oli ajatus

testata jokainen vaihe erikseen toimivaksi; tämä järjestely yksinkertaistaa vianetsintää, jos sellaiselle tulee tarvetta.

Luotettavuuden maksimoimiseksi pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon sarjatuotanto-osia silloin kun se oli mahdollista. Tämä oli myös kustannustehokasta, koska opiskelijabudjetilla ei ole mahdollista lähteä siihen tuotekehitystyöhön, jonka autotehtaat ovat jo tehneet sarjatuotantokomponentteilleen ennen niiden markkinoille laskemista. Osat valittiin myös ajoneuvoista, jotka ovat olleet vuosia markkinoilla ja siten osoittautuneet myös käytännössä toimiviksi ja luotettaviksi.

Autoon asennettiin myös testaamisessa ja säätötyössä tarvittavat lisämittarit, ahtopaineen, polttoaineenpaineen, seossuhteen, öljynlämmön, öljynpaineen, pakolämmön, pakopaineen ja nakutuksen valvontaan.

Itse työn tekninen toteutus oli melko suoraviivaista osien asennusta ja joidenkin komponenttien kuten esimerkiksi johtosarjan, pakosarjan ja putkiston osalta myös suunnittelua ja valmistusta. Tähän sisältyi myös paljon tarkistuksia ja vielä varmuuden vuoksi uudestaan tarkistuksia ja karkeiden aloitussäätöjen hakeminen ennen ensimmäistä käynnistystä. Kun moottori saatiin käyntiin, aloitettiin tarkempi hienosäätäminen.

Vaikka lopputuloksena saatiin toimiva huomattavasti alkuperäistä parempi moottori, niin auto ei ole suinkaan valmis vielä, vaan enemmänkin kokeilualusta, johon on tarkoitus tulevaisuudessa testata erilaisia ahtimia, pakosarjoja, väljäähdyttimiä, suuttimia, moottorinohjauksia ja muita moottoriteknisesti kiinnostavia ratkaisuita. Jo tässä vaiheessa on kuitenkin selvää, että pelkillä moottorinohjauksen ja apulaitteiden muutoksilla saatiin erittäin lupaavia tuloksia, tarvitsematta lainkaan koskea moottorin mekaanisiin osiin. Joten näitä muutoksia voinee soveltaa moniin hyvässä käyttökunnossa oleviin harrasteauton moottoreihin.



## 2 Flexifuel-järjestelmä

### 2.1 Flexifuel-järjestelmän hyödyt

Myrkytön, biohajoava bioetanoli valmistetaan Suomessa pääasiassa jätteistä, jotka muuten kuormittaisivat ilmakehää mätänemällä metaaniksi. Tämä on myös logistisesti järkevämpää kuin raakaöljyn rahtaaminen ulkomailta. Myös Suomen vaihtotaseelle asialla on merkitystä, koska Suomessa ei ole omia öljylähteitä, vaan kaikki raakaöljy on tuontitavaraa, mikä tekee Suomesta riippuvaisen öljytuottajamaista. Raakaöljystä valmistettavaan bensiiniin on myös lisättävä myrkyllisiä lisäaineita mm. oktaaniluvun korottamiseksi. Lisäksi bioetanoli on hiilineutraalia siinä mielessä, että kasvijäte josta bioetanoli on valmistettu, on kasvaessaan sitonut saman määrän hiilidioksidia, kuin mikä bioetanolin poltossa vapautuu. Toki jalostusprosessi vaatii myös energiaa, joten energian tuotantotavasta riippuen bioetanoli ei välttämättä ole täysin hiilineutraalia. Jätteestä valmistettu bioetanoli on Suomessa vapautettu hiilidioksidiverosta, koska verottaja katsoo sen olevan lähes hiilidioksidineutraalia.

Bioetanolia 50–85 % ja loput bensiiniä sisältävä korkeaseosetanolipolttoaine, kauppanimeltään RE85, jonka oktaaniluku on yli 104 on huomattavasti korkeaoктаanisempaa kuin markkinoilla olevien yleisimpien bensiinien 95-99-RON-oktaania. Tämä mahdollistaa korkeamman puristussuhteen ja rajumpien sytytysennakkokäyrien käyttämisen, ja sitä kautta paremman hyötysuhteen, kuin mitä tavallisella 95-99-RON-oktaanisella bensiinillä voitaisiin saavuttaa. Moottorin polttoaineensuihkutuksen, puristussuhteen ja sytytysennakon täytyy tuki olla säädettävät, jotta moottoria voidaan käyttää molemmilla eri polttoaineilla parhaimmalla mahdollisella hyötysuhteella, ja tämä työ itse asiassa keskittyy juuri menetelmiin, joilla näitä asioita voidaan joustavasti säätää.

Palamistapahtuman lämpötila on etanolilla alhaisempi, koska imukanavaan ruiskutettu etanolisumu höyrystyy palotilaan päästyään ja höyrystymisprosessi sitoo lämpöä palotilasta ja näin pienentää männän ja venttiileiden lämpökuormaa ja siten lisää niiden kestoikää varsinkin kovassa kuormituksessa. Bensiinisumu tuki sitoo myös höyrystyessään energiaa, mutta ei niin paljon kuin etanoli. Etanolin höyrystyessään sitoma lämpö on yli 2,4-kertainen bensiiniin verrattuna. Siksi etanolin jäähdyttävä vaikutus on parempi.

## 2.2 Flexifuel-järjestelmän haitat

Polttoaineenkulutus on etanolilla noin 25–40 % suurempi, kuin bensiinillä, ja sen myötä ajoneuvon käyttösäde lyhenee vastaavasti, koska etanolin energiasisältö, eli lämpöarvo on 26,8MJ/kg eli paljon alhaisempi kuin bensiinin 43 MJ/kg. Käyttövalmiin RE85- korkeaseosetanolin energiasisältö on 22,7 MJ/l ja vastaavasti 95E10-bensiinin energiasisältö 30,9 MJ/l. (1, s. 131.) Toisaalta etanolilla hyötysuhde saadaan paremmaksi, joten kulutusero ei ole niin suuri, kuin pelkkiä lämpöarvoja tutkimalla voisi päätellä. Teoriassa alkoholi palaa puhtaasti muodostaen reaktiotuotteina vettä ja hiilidioksidia.

Käytännössä olosuhteista riippuen syntyy myös muita reaktiotuotteita, kuten aldehydejä, aldehydipäästöt kasvavat lämpötilan laskiessa, erityisesti kylmäkäynnistyksissä. Tämän vuoksi moottori kannattaa kylmissä olosuhteissa käynnistää bensiinillä, tästä järjestelystä kerrotaan myöhemmin tässä työssä. Aldehydipäästöjä on ehditty jo tutkia jonkun verran eripuolilla maailmaa, mutta tutkimuksissa on ollut suuria eroja keskenään, onneksi asiaa tutkitaan kuitenkin lisää ja tulevaisuudessa asiasta tiedetään enemmän. Toimintalämpötilassaan oleva katalysaattori onneksi poistaa suurimman osan aldehydipäästöistä, kylmä katalysaattori sen sijaan ei poista, ja tämänkin vuoksi kylmä moottori kannattaa käynnistää bensiinillä. Monet materiaalit eivät myöskään kestä etanolin pitempiaikaista vaikutusta, ja siksi kaikkien polttoainejärjestelmän osien etanolinkestävyys on selvitettävä ja tarvittaessa vaihdettava komponentit etanolia kestäviin materiaaleihin. Öljynvaihtovälin tihentämistä on myös syytä harkita, koska etanolia pääsee varsinkin kylmäkäynnistyksessä männänrenkaiden ohi öljytilaan ja etanoli heikentää öljyn voiteluominaisuuksia. Tästäkin syystä tässä työssä moottori käynnistetään aina bensiinillä ja vasta moottorin lämmitettyä siirrytään etanoliin. Tämä tarkoittaa sitä, että ajon jälkeen, ennen moottorin sammuttamista vaihdetaan takaisin bensiiniin, jotta polttoainelinjat ja suutintukki ovat valmiiksi täynnä bensiiniä, seuraavaa kylmäkäynnistystä ajatellen. Hydroskooppisuutensa takia etanoli myös sitoo itseensä kosteutta, joka voi aiheuttaa tietyille materiaaleille korroosioriskin kasvua. Jos etanoli saa rajatta sitoa itseensä kosteutta, alkaa etanoli-vesifaasi erottua bensiinistä ja raskaampana painuu polttoainesäiliön pohjalle. Näistä syistä pitkät seisonta-ajat eivät ole hyväksi.

## 2.3 Saatavuus

Tämän työn kirjoitushetkellä keväällä 2019 bioetanolia oli saatavilla seuraavilta polttoaineiden jakelijoilta:

- ABC 85 jakeluasemaa

- St1 52 jakeluasemaa (myös Shellin nimen alla toimivat asemat sisältyvät tähän lukuun).

## 2.4 Polttoaine

E85-korkeaseosetanolipolttoaineen etanolikomponentti valmistetaan Suomessa jätteistä eikä tuotantoon tällä hetkellä käytetä ravinnoksi kelpaavia kasveja, kuten sokerijuurikasta. Toki olisi mielekäästä tutkia voisiko Suomen autioituvaa maaseutua piristää alkamalla viljelemään esimerkiksi sokerijuurikasta, tai ohraa biopolttoaineteollisuuden käyttöön. Tämä toisi lisää työpaikkoja syrjäseuduille, lisäisi maamme energiaomavaraisuutta ja parantaisi vaihtotasetta, mutta se ei valitettavasti ole nykyisen lainsäädäntömme mukaan ihan helppoa, joten lainsäädäntömuutoksia tarvitaan, ennen kuin asiaa voidaan edistää. RE85 sisältää bioetanolia enintään 85% ja loppu on bensiiniä ja erityisesti kylmää ilmastoamme varten kehitettyjä lisäaineita, jotka muodostavat valtaosan RE85-polttoaineen fossiilisista hiilidioksidipäästöistä. Lisäksi RE85:n lisäaineistusta muutetaan vuodenajan mukaan, esimerkiksi lisäämällä talviaikana kylmäkäynnistystä helpottavia lisäaineita. Puhdasta etanolia poltettaessa fossiilisia hiilidioksidipäästöjä ei teoriassa synny, koska raaka-aineen tuotantoon kasvatetut kasvit ovat jo kasvaessaan sitoneet poltettaessa syntyvän hiilidioksidin. Puhtaalla etanolilla moottori ei kuitenkaan käynnistyisi kovilla pakkasilla johtuen etanolin kiehumispisteestä joka on 78 celsiusastetta. Lisäksi kylmäkäynnistyksissä syntyy aldehydipäästöjä. Valmistajat lupaavat korkeaseosetanolipolttoaineen oktaaniluvun olevan vähintään 104.

## 2.5 Lainsäädännöllisiä velvoitteita

EU on asettanut sitovan velvoitteen uusiutuvan energian käytöstä liikenteessä: direktiivissä 2009/28/EY veloitetaan jäsenmaat nostamaan uusiutuvien polttoaineiden osuus 10 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä (2). Suomi on ottanut vielä tätäkin tiukemman tavoitteen ja pyrkii 20 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä.

### 3 Hyötysuhteen optimointi

#### 3.1 Puristussuhde

Tuotantomootoreissa moottorin staattinen puristussuhde määräytyy käytettävissä olevista polttoaineista oktaaniluvultaan huonoimman mukaan, eikä staattisen puristussuhteen muuttaminen ole mielekästä aina polttoainetta vaihdettaessa. Monet ajoneuvovalmistajat ovat tutkineet muuttuvapuristussuhteisen moottorin mahdollisuuksia, mutta kampikoneistosta on tullut monimutkainen, kallis ja vikaherkkä. Sen sijaan tässä työssä on lähestytty asiaa hieman erilaisesta näkökulmasta ja tutkittu mahdollisuutta muuttaa moottorin dynaamista puristussuhdetta ja se on helppoiten tehtävissä muuttamalla imusarjan painetta ja sitä kautta sylinterien täytöstä. Helpoin tapa on asentaa moottoriin ahdin, joka ylipaineistaa imusarjan.

Imusarjan paine vaikuttaa suoraan dynaamiseen puristussuhteeseen ja sitä kautta hyötysuhteeseen. Polttoaineen oktaaniluvun mukaan valitaan sopiva imusarjan paine ja täten kyseiselle polttoaineelle saadaan määrättyä paras mahdollinen dynaaminen puristussuhde. Ahtimen hukkaportin jousi valitaan huonoimman käytettävissä olevan polttoaineen oktaaniluvun mukaan. Imusarjalta hukkaportille menevään paineletkuun on asennettu solenoidiventtiili, joka on normaalisti auki. Tällöin hukkaportti aukeaa ennen kuin imusarjan paine ylittää sen arvon, jolla dynaaminen puristussuhde kasvaisi liian suureksi ja moottori nakuttaisi esimerkiksi 95-oktaanisella polttoaineella. Sen sijaan käytettäessä korkeaoktaanista etanolipohjaista polttoainetta moottorinohjaus pitää solenoidiventtiilin kiinni siihen asti, kunnes imusarjan paine saavuttaa etanolille soveltuvan maksimi-arvon. Moottorinohjaus saa imusarjan painetiedon MAP-anturilta. Kun imusarjan rajapaine on saavutettu, niin solenoidiventtiili avautuu ja päästää ahtimen hukkaportin kellolle imusarjan paineen ja kello avaa hukkaportin.

#### 3.2 Sytytysennakko

Moottorin parhaan vääntömomentin tuoton kannalta palamisen maksimipaine olisi hyvä saavuttaa noin 12–15° JYKK. Tällöin palopaineen männän pinta-alaan kohdistama voima tekee voimakkaimmin töitä kampiakselin pyörittämiseksi. Koska polttoaineilla on oma ominainen palonopeutensa, seos täytyy luonnollisesti sytyttää hyvissä ajoin ennen yläkuoloa, jotta palaminen ehtii saavuttaa maksimipaineensa halutulla hetkellä,

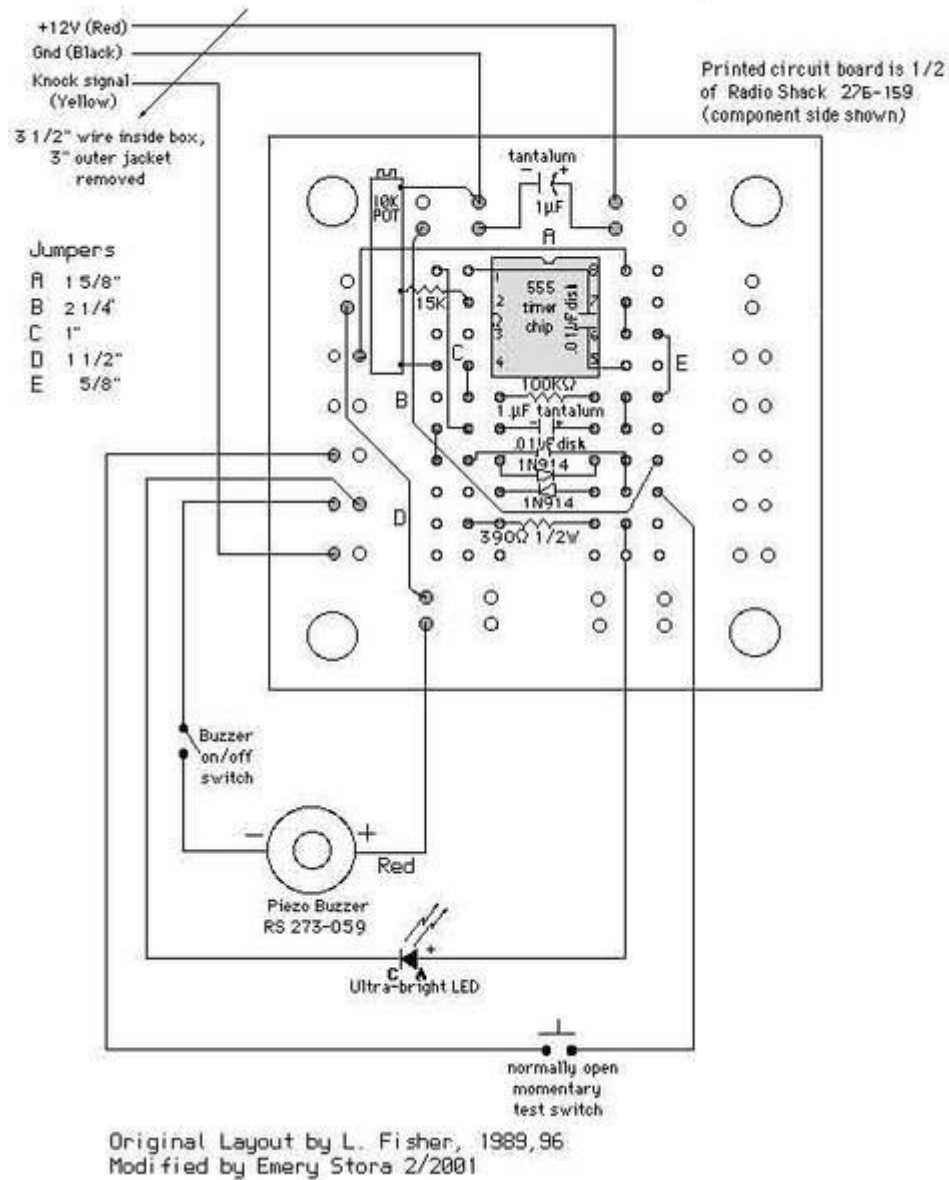
tätä sytytyksen alkuhetkeä kutsutaan sytytysennakoksi. Polttoaineen palonopeus vaikuttaa myös hyötysuhteeseen, koska hitaasti palava polttoaine pitää sytyttää reilusti ennen yläkuolokohtaa ja syttyvän seoksen kokoonpuristaminen kuluttaa tehoa kampiakselilta. Kuormituksen ollessa korkea voi sytytysennakkoa rajoittavaksi tekijäksi muodostua polttoaineen heikko oktaaniluku, joka lisää nakuttavan palamisen riskiä eikä moottorista saada parasta mahdollista vääntömomenttia. Nakuttava palaminen on ei-toivottu ja hallitsematon palotapahtuma, jossa polttoaineseos palaa ennenaikaisesti, ja tämä aiheuttaa moottoritehon laskun, sekä on vahingollista moottorin mekaanisille komponenteille. Korkean oktaanilukunsa ansiosta etanoli ei ole erityisen herkkä nakuttavalle palamiselle ja kestää siksi huomattavasti enemmän sytytysennakkoa kuin tavallinen 95-99-oktaaninen bensiini. Tämä mahdollistaa optimaalisen sytytysennakon ja sitä kautta paremman vääntömomentin.

Tässä työssä sytytysjärjestelmänä käytetään Ford edis4 -hukkakipinäsytytys-järjestelmää, jota moottorinohjaus ohjaa sytytysennakkokarttojen osalta. Bensiinille on oma sytytysennakkokarttansa ja etanolille omansa. Näin saadaan optimaaliset sytytysennakot molemmille polttoaineille ja sitä kautta paras mahdollinen hyötysuhde molemmilla polttoaineilla. Sytytysennakon optimiarvojen hakemiseen käytetään säätötyön aikana nakutuskulokkeita ja L. Fisherin kehittämää nakutuksentunnistulaitteistoa (kuvat 1 ja 2). Moottori säädetään ensin käymään nakuttamatta läpi koko kierroslukualueen kaikilla mahdollisilla kuormituksilla. Polttoaineen laminaarinen palonopeus vakioaineessa 100 Kpa ja lämpötilassa 325 K on noin 0,33 m/s bensiinillä ja 0,39 m/s etanolilla paineen ja seossuhteen pysyessä vakiona. Polttomoottorissa palaminen ei kuitenkaan ole laminaarista eikä paine vakio, joten turbulentsissa palamisessa ja muuttuvassa paineessa palonopeus kasvaa selkeästi joka on itseasiassa polttomoottorin toiminnan kannalta suorastaan välttämätöntä. Kun moottorin pyörintänopeus nousee, niin palamiselle jäävä aika lyhenee, joten pelkkä palonopeuden nousu ei riitä, vaan seos täytyy myös sytyttää aikaisemmin, jotta se ehtisi täydellisesti palaa. Kuitenkin ahdetussa moottorissa ilma-polttoaineseos on korkeammassa paineessa ja tiheämpää, joten se palaa nopeammin eikä täten vaadi yhtä suurta sytytysennakkoa kuin vapaastihengittävässä moottorissa. Itse asiassa ahdettu moottori voi alkaa nakuttaa ja vaurioitua, jos sitä käytetään vapaastihengittävän sytytysennakkokartalla, varsinkin bensiinillä, etanolilla sen sijaan voidaan ennakkoa monesti kasvattaa niin pitkään kuin teho nousee, jossain kohtaa saavutetaan piste, jossa palamisen maksimipaine saavutetaan jo ennen yläkuolokohtaa, ja tällöin palopaine tekee työtä yläkuolokohtaa lähestyvää mäntää vastaan. Tämä tietysti syö tehoa ja on aika palata ennakon osalta hieman takaisin päin, jotta saadaan maksimipaine vaikuttamaan vasta yläkuolokohdan jälkeen ja tekemään työtä oikeaan suuntaan, tämä

säätö olisi parasta suorittaa tehodynamometrissä. Nakutusherkeyys on toki hyvin moottorikohtaista ja joissain moottoreissa saattaa etanolillakin moottori alkaa nakuttamaan tehon ollessa vielä nousussa ennakkoa aikaistettaessa, esimerkiksi palotilan muoto ja koko vaikuttavat nakutusherkeyteen. Myös imusarjan paine ja lämpötila sekä pakokaasun lämpötila (EGT) on otettava tarkasti huomioon sytytysennakon optimiarvoja haettaessa. Sytytysennakkoarvot asetetaan aluksi arvioituihin alkuarvoihin, jotka ovat reilusti turvallisen puolella, eli myöhäisellä, perusennakoksi voidaan valita kokemusperäisesti noin 10 astetta joutokäynnillä ja 3500minuuttikierroksen kohdalla ennakkoa voi olla noin 30astetta. Tarkkaan säätöön tarvitaan tehodynamometri, jossa haetaan tehon kannalta parhaat sytytysennakkoarvot läpi kierrosalueen kaikilla kuormituksilla. Tätä työtä kirjoitettaessa koulun tehodynamometri ei vielä ollut asennettuna, joten tarkat säädöt tehopenkissä ovat vielä tekemättä ja sytytysennakko ei vielä ole paras mahdollinen, vaan hieman turvallisen puolella, koska esimerkiksi kesällä kuumempi imuilman lämpötila saattaa aiheuttaa tarvetta hienosäätää sytytysennakkoa. Tulevaisuudessa auto on tarkoitus saada tehopenkkiin, jotta säädöt saadaan optimoitua eri lämpötiloissa.

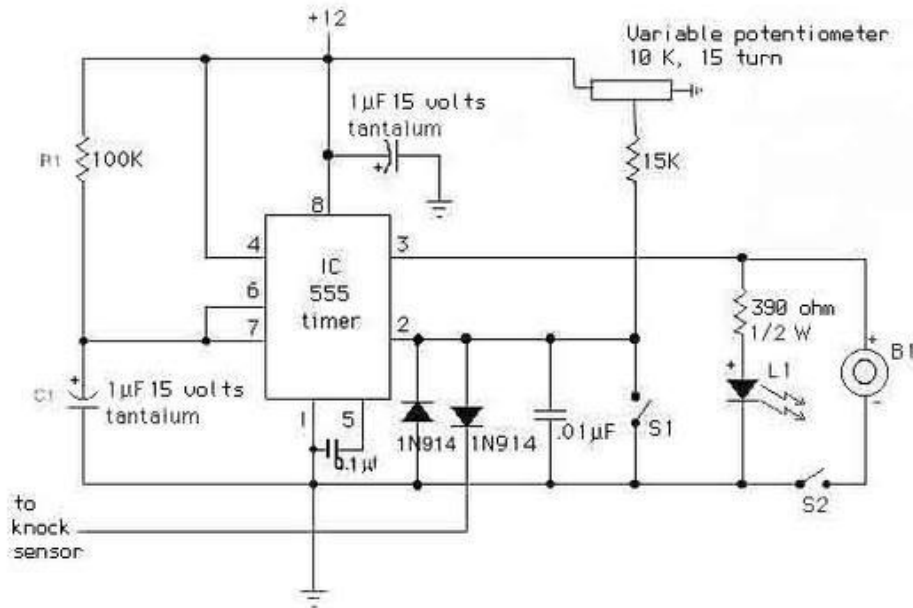
Jos autoa ei saada tehonmittauspenkkiin säädettäväksi, olen kehittänyt myös vaihtoehdoisen säätöteorian jossa autolla ajetaan vakionopeudella aluksi moottorin pyörintänopeudella 2000rpm ja kaasuläppä lukitaan tähän asentoon, sytytysennakkoa aletaan säätämään aste kerrallaan aikaisemmalle, sytytyksen aikaistamista jatketaan niin pitkään kun moottorin pyörintänopeus ja auton vauhti nousevat, jos nakutusta ilmenee, tai vauhti alkaa laskea, palataan aste takaisin päin siihen sytytysennakkoon, joka antoi parhaan nopeuden nakuttamatta. Näin on saatu kyseiselle kuormitukselle hyvin lähellä optimia oleva sytytysennakko. Tässä kohtaa on hyvä tarkistaa seossuhde, koska se saattaa tarvita hienosäätöä tehostuneen palotapahtuman johdosta. Seossäädön tarkastuksen jälkeen jatketaan sytytysennakon säätöä, kaasuläppän lukitus avataan ja moottorin pyörintänopeus nostetaan arvoon 3000 rpm, ja ajetaan taas tasaisella nopeudella ja lukitaan kaasuläppän asento, sen jälkeen vain toistetaan edellä mainittu säätötyö. Sama toistetaan seuraavaksi moottorin pyörintänopeudella 4000 rpm jne. Kun karkea sytytysennakokäyrä on saatu luotua, aloitetaan hienosäätö 100 rpm:n välein, aloitusarvot saadaan laskettua ensin suoritettujen säätötyön tulosten pohjalta. Suoritetaan koeajo, jolla kiinnitetään erityisesti huomiota siihen, ilmeneekö nakutusta ja miltä seossuhde näyttää. Sytytysennakkoa ja seossuhdetta säädetään tarpeen mukaan. Näin saadaan luotua kohtuulliset kartat tasakaasuajoon, jolla suuri osa ajosta muutenkin tapahtuu. Näin luotuihin karttoihin tehdään lopuksi vielä korjauskertoimet imusarjan paineen, ahtoilman ja moottorin lämpötilan muutoksille, koska paineen ja lämpötilan noustessa nakutusherkeyys lisääntyy ja siksi sytytysennakon pitää pienentyä lämpötilan ja paineen noustessa.

## Knock Indicator PCB layout



Kuva 1. Nakutustunnistimen kytkentäkaavio [3]

## Knock Indicator circuit



### Notes:

All resistors are 1/4W 5% unless otherwise specified.

All capacitors are disc type unless otherwise specified.

### Parts:

S1 - Normally Open test button

S2 - Audible alarm on/off switch

L1 - LED - Yellow, Green or Red, 500 or more mcd (longer lead is +)

B1 - Radio Shack 273-059 Piezo buzzer

Original circuit by L. Fisher 1989, 1996  
Modifications by Michael Stora, PhD  
and by Emery Stora 2/8/01

Kuva 2. Nakutustunnistimen virtapiiri [4]

### 3.3 Polttoaineen suihkutus

Etanolin energiatiheys, eli lämpöarvo on 26,8 MJ/kg ja tiheys 0,7894 kg/l, kun bensiinillä vastaavat arvot ovat 43 MJ/kg ja 0,7387 kg/l. RE85 on näiden kahden sekoitus, jonka energiasisältö on noin 22,7 MJ/l. Siksi etanolia pitää ruiskuttaa enemmän kuin bensiiniä saman tehon saavuttamiseksi. Tämä on mahdollista toteuttaa useammalla eri tavalla, suuttimien kokoa suurentamalla, suutintukin painetta nostamalla tai suuttimien duty-cycleä eli aukioloaikaa pidentämällä. Tässä työssä päädyttiin aukioloaikojen pidentämiseen, koska silloin polttoaineen vaihtaminen bensiinistä etanoliin ja takaisin sujuu kaikesta helpoiten, koska moottorinohjauksella on omat suihkutuskarttansa molemmille polttoaineille. Suihkutuskartat voidaan karkeasti luoda, kun tiedetään yhden sylinterin tilavuus, arvioitu teho ja suuttimen tuotto. Näin auto saadaan käymään kohtalaisesti. Hienosäätö suoritetaan laajakaistaseossuhdemittarin ja tehodynamometrin avulla. Tätä työtä kirjoitettaessa hienosäätö on vielä tekemättä, koska Metropolian tehodynamometri ei ollut käytettävissä. Hienosäätö suoritetaan, kun auto saadaan tehodynamometriin



säädettäväksi. Stoikiometrinen seossuhde on bensiinillä 14,7:1, mikä tarkoittaa, että tarvitaan 14,7kg ilmaa yhden bensiinikilon polttamiseksi täydellisesti. Tehon kannalta seossuhde voi olla rikkaampi, esim. 12,5:1, riippuen kuormitustilanteesta. Ahdetussa moottorissa käytetään suurella kuormituksella rikkaampaa seosta kuin vapaastihengittävässä. Tehon kannalta paras seossuhde löydetään kokeilemalla eri seossuhteita tehodynamometrissä, minkä lisäksi voidaan suorittaa kiihdytysmittauksia. Mittausten aikana tarkkailaan seossuhdetta, polttoaineen painetta, ahtopainetta, imusarjan lämpötilaa, nakutusta, pakolämpöjä ja paineita. Kulutuksen kannalta tasakaasuajossa pienellä imusarjan paineella ajettaessa seossuhde voi olla 15:1. Eli ei ole yhtä oikeaa seossuhdetta, vaan se pitää aina säätää kuormitustilanteen mukaan. Etanolilla stoikiometrinen seossuhde on 9:1, ja paras teho saadaan seossuhteella 6,43:1. Re85-polttoaineella eli etanolin ja bensiinin 85/15-sekoituksella stoikiometrinen seossuhde on 9,87:1, ja paras teho saadaan seossuhteella 6,98:1

### 3.4 Suuttimien valinta

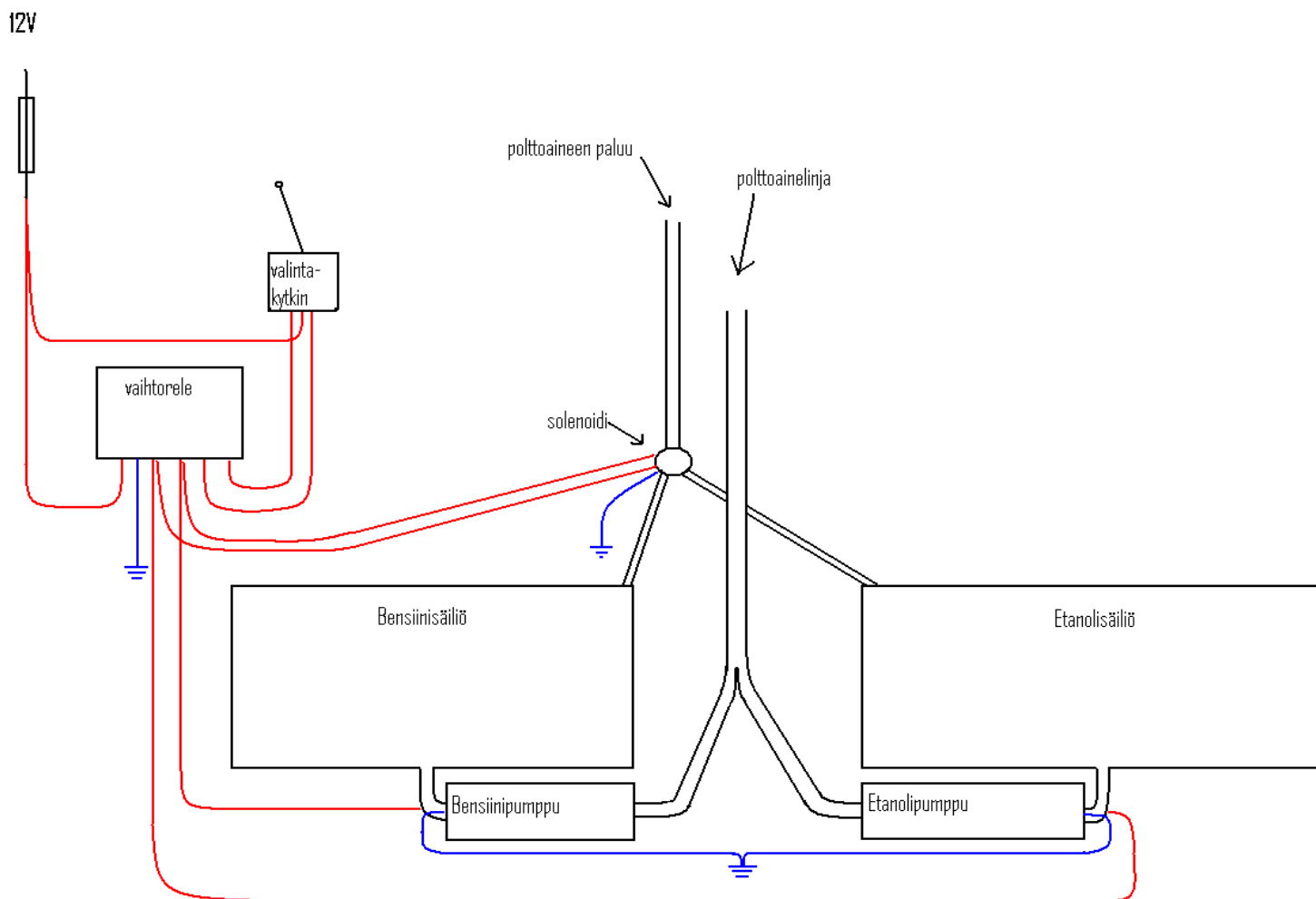
Tärkeää on valita suutinten koko oikein, sillä tarpeettoman suurien suutinten käyttö vaikeuttaa moottorinohjauksen säätöä tyhjäkäynnillä ja matalilla kierroksilla. Liian pienillä suuttimilla taasen dutycycle saavuttaa ääriarvonsa 85% jo ennenaikaisesti ja suuttimien käämi saattaa jopa palaa, eikä suutinten tuotto riitä parhaan mahdollisen tehon aikaansaamiseen. Suuttimien koko voidaan karkeasti määrittää, kun tiedetään tai arvioidaan moottorin maksimiteho hevosvoimina ja BSFC-arvo (Brake Specific Fuel Consumption). BSFC on polttoaineenkulutus tunnissa yhden hevosvoiman teholla. BSFC-arvo vaihtelee eri moottoreissa ja on yleisimmin välillä 0,42–0,58. Korkeapuristeisella vapaastihengittäväällä moottorilla arvo on lähempänä 0,42, ja turboahdetuissa taas arvo on asteikon yläpäässä eli lähellä 0,58:aa. Suuttimien koko saadaan siten laskettua kaavalla  $\text{teho} \cdot \text{BSFC} / (\text{suuttimien lukumäärä} \cdot \text{käyttöaste})$  kaava antaa suuttimien koon arvona lb/h, joka on 10,5ml/min. Lisäksi on otettava huomioon bensiinin ja etanolin energiatihedysten 37%:n ero. Tässä työssä käytettyyn moottoriin sopivat suuttimet voidaan siis karkeasti valita seuraavasti:  $200 \text{ hv} \cdot 0,58 / (4 \cdot 0,85) = 34,12 \text{ lb/h}$ . Tämä pitää kertoa kertoimella 10,5, jolloin saadaan suuttimien tuotto millilitroina eli 358 ml/min. Täytyy muistaa, että tämä on bensiinille sopiva tuotto, eli se pitää vielä kertoa kertoimella 1,37, jolloin saadaan RE85-polttoaineelle sopiva tuotto 490ml/min. RE85-polttoaineella ajettaessa moottorinohjaus pidentää dutycycleä 37 % verrattuna bensiiniin, jotta samoja suuttimia voidaan käyttää kummallakin polttoaineella. Suuttimien impedanssin pitää myös olla yhteensopiva käytettävän moottorinohjauksen kanssa. Käytännössä puhutaan matalaimpedanssisista

suuttimista, joiden impedanssi on alle 5 ohmia, ja korkeaimpedanssisista, joiden impedanssi on yli 10 ohmia.

### 3.5 Polttoainejärjestelmä

Yleisesti flex-fuel ajoneuvoissa käytetään etanolipitoisuuden tunnistavaa anturia, joka kertoo moottorinohjaukselle polttoainelinjassa virtaavan polttoaineen etanolipitoisuuden ja moottorinohjaus säätää tämän tiedon perusteella seossuhteen oikeaksi. Tällöin bensiini ja RE85 tankataan samaan polttoainesäiliöön ja anturi vain tunnistaa tämän sekoituksen etanolipitoisuuden. Tässä yleisimmässä ja halvimmassa järjestelyssä on kaksi epäkohtaa. Kylmäkäynnistyksessä auto joudutaan aina käynnistämään sillä polttoaine-seoksella, jota tankissa sattuu olemaan, ja jos säiliössä on pääosin RE85-polttoainetta, kylmäkäynnistyvyys on huono, kylmäkäynnistyksen päästöt suuret ja raakaa etanolia pääsee männänrenkaiden ohi sotkemaan voiteluöljyn ominaisuuksia. Tästä seuraa tihentynyt öljynvaihtoväli tai vielä pahempaa: jos öljynvaihtoväliä ei tihennetä, moottorin lyhentynyt käyttöikä. Toinen huono puoli on polttoainesäiliöön kondensoituvan veden aiheuttama: vesi sekoittuu etanoliin ja etanolin vesipitoisuus saa anturin tuottamaan virheellistä signaalia, eikä moottorinohjaus saa enää oikeaa tietoa etanolin ja bensiinin seossuhteesta.

Tässä työssä päädyttiin kokeilemaan järjestelyä, jossa bensiinille on oma tankkinsa autossa vakiopaikallaan ja etanolille on ruostumattomasta teräksestä valmistettu säiliö vararengaskotelossa. Kummallekin tankille on oma pumppunsa tyyppiä Bosch 044. Pumpuissa on takaiskuventtiili, joka estää polttoaineen virtauksen takaisin säiliöön päin. Pumput syöttävät Y-haaran kautta polttoainetta auton polttoainelinjaan. Valintakytkin syöttää käyttöjännitteen aina sille pumpulle, jota halutaan käyttää. Vain yksi pumpuista pyörii kerrallaan, ja toinen on tällöin suljettuna ja takaiskuventtiili estää polttoaineen virtauksen pumpun läpi takaisin säiliöön. Moottori käynnistetään aina bensiinillä ja moottorin lämmentyessä valintakytkimellä vaihdetaan pumppua ja moottorinohjauksen ohjelma etanolikäytölle. Kun auto pysäköidään, vaihdetaan taas bensiinikäytölle, jotta polttoainelinjassa on valmiina bensiiniä seuraavaa kylmäkäynnistystä ajatellen. Myös polttoaineen paluuputkessa on Y-haara ja solenoidiventtiili joka ohjaa paluuvirtauksen oikeaan säiliöön aina kulloinkin käytettävän polttoaineen mukaan. Kuvassa 3. on kaaviokuva tästä järjestelystä.



Kuva 3. Kaaviokuva polttoainejärjestelmästä

## 4 Koemoottori

### 4.1 Koemoottorin valintaperusteet

Koemoottoriksi haluttiin yleinen, suosittu, edullinen, Suomessa helposti saatavilla oleva moottori, josta on jo olemassa paljon käytännön kokemusta ja pohjatietoa mm. siitä, kuinka paljon moottorin kampikoneisto kestää ahtopaineita ja kierroksia luotettavasti. Menestys ja luotettavuus moottoriurheilussa katsottiin myös painavaksi valintakriteeriksi. Myös kulutus- ja viritysosien saatavuus oli tärkeä kriteeri, koska moottoria on tarkoitus tulevaisuudessa jatkojalostaa enemmän. Eduksi katsottiin lisäksi se, että moottoria on ollut tehtaalta saatavana polttoaineen ruiskutuksella varustettuna, jotta imusarjaa, kaasuläppää, kaasuläpän asentotunnistinta, suutintukkia, polttoaineen paineensäädintä, polttoainesäiliötä ja polttoainepumppua ei tarvitse rakentaa itse, vaan ne voidaan ostaa esimerkiksi purkuautosta ja tarkistuksen ja huollon jälkeen asentaa paikalleen. Oli myös selvää, että moottorin teho tulee selkeästi nousemaan, joten moottoriin suoraan sopivia kestävämpiä voimansiirron komponentteja tuli olla yleisesti saatavissa.

### 4.2 Koemoottori

Koemoottoriksi valikoitui lopulta hieman vanhempaa tekniikkaa edustava Fordin 2.0i OHC-EFI-moottori Boschin L-jetronic polttoaineenmonipistesuihkutusjärjestelmällä, koska perusmoottori täytti tärkeimmät valintakriteerit. Lisäksi käytännön kokeissa on havaittu kyseisen moottorin kestävän säännöllistä käyttöä 1bar:n ahtopaineella (2bar absoluuttista) ilman ongelmia, kunhan moottorinohjaus on säädetty oikein. Empiirisissä kokeissa on havaittu moottorin valettujen vakiomäntien ja kiertokankien alkavan pettää noin 1,5bar:n ahtopaineella (2,5 bar absoluuttista) pitempään ajettaessa. Moottoriin on kuitenkin helposti saatavilla laaja valikoima takomäntiä, H-profiilikiertokankia, takoteräskampiakseleita, suurtuottoöljypumppuja, laakereita ynnä muita johtuen moottorin suosiosta moottoriurheilussa. Myös moottorin sylinterinkanteen on saatavissa isompia venttiileitä, säädettäviä nokkapyöriä, kireämpiä nokka-akseleita, kovapalaseuraajia ja jäykempiä venttiilijousia, ja paremmista materiaaleista valmistettuja venttiilijousien lautasia. Näin ollen moottorin jatkojalostus tulevaisuudessa on helppoa.

Moottorin huonoja puolia on nokka-akselin ja laahaintyyppisten keinuvipujen nopea kuluminen. Lisäksi tämän työn kannalta huono puoli on nokka-akselin asentotunnistimen

puute, joten sekventiaalinen polttoaineen ruiskutus ei ole suoraan mahdollista. Toki hukkakipinäsytytyksen myötä toimettomaksi jäänyt virranjakaja olisi mahdollista muuttaa tuottamaan nokka-akselin asentotietoa, koska se pyörii samalla nopeudella kuin nokka-akseli. Moottorissa ei ole myöskään mahdollisuutta venttiilienajoituksen muuttamiseen ajonaikana eri kuormitus- ja käyntinopeustilanteissa.

#### 4.3 2,0 EFI -moottorin tekniset tiedot (tehtaan ilmoittamat)

Tehtaan ilmoittamat 2,0 EFI -moottorin tekniset tiedot ovat seuraavat:

- iskutilavuus 1993 kuutiosenttimetriä
- sylinterin halkaisija 90,8mm
- iskunpituus 76,6mm
- teho 115hv (85kW) pyörintänopeudella 5500rpm
- vääntömomenti 160Nm pyörintänopeudella 4000rpm.

#### 4.4 Moottoriin tarvittavat muutokset

Itse perusmoottoriin ei vielä tässä vaiheessa työtä ole tarvinnut tehdä rakenteellisia muutoksia, koska moottori on osoittautunut kestävänsä sellaisenaan kohtuullista tehonlisäystä. Moottorin puristusaineet mitattiin ja todettiin tehtaan ohjearvojen mukaisiksi. Öljynpaineita valvomaan asennettiin öljynpainemittari sekä öljynlämpöä valvomaan öljynlämpömittari. Moottorin öljynsuodatinjalkaan oli suoraan saatavana välikappale, jossa oli paikat näille kahdelle anturille sekä turboahtimelle menevälle öljynpaineletkulle. Lisäksi optiona on saatavilla termostaattiohjattu kierto öljynjäähdyttimelle, mikäli sille ilmenee tarvetta. Tähän asiaan saadaan selvyyttä, kun autoa päästään testaamaan kesän helteillä moottoriradalla. Turbon öljynpaluulle oli valmis paikka pakopuolella moottorin lohkon alareunassa hieman öljypohjan yläreunan yläpuolella, tehtaan jäljiltä siinä oli 3/4” kokoa oleva tulppa, joka kierrettiin pois ja tilalle asennettiin letkunippa turbon öljynpaluuta varten. Varmuuden vuoksi maksimiahtopaine kuitenkin rajataan 1 bar:iin ylipainetta (2bar absoluuttista), koska kokemusperäisesti tiedetään tämän olevan turvallinen ahtopaine kyseisen moottorin vakioalumiinille ja kampikoneistolle. Kun tulevaisuudessa ahtopainetta tullaan nostamaan yli tämän nykyisen, niin männät ja kampikoneisto tullaan vaihtamaan kestävämpiin tako-osiin.

#### 4.5 Moottorin apulaitteisiin tarvittavat muutokset

Moottorin apulaitteisiin tarvittiin seuraavat muutokset:

- Ecu vaihdettu ohjelmitavaan MegaSquirt 1 V2.2 -ohjausyksikköön.
- Ilmamäärämittari korvattu MPX4250-MAP-anturilla (ohjelmitavan moottorin ohjauksen vuoksi)
- Imuilman lämpötila-anturi vaihdettu Ford Sierra Cosworth -malliseen (ohjelmitavan moottorin ohjauksen vuoksi).
- Koeauto on ollut alun perin varustettu kaasutinmoottorilla, joten sen vakio ilmansuodatinkotelo ei tietenkään voinut mitenkään järkevästi käyttää ahtimen kanssa, joten se oli korvattava tarkoitukseen paremmin soveltuvalla Ford Sierra Cosworth -mallin ilmansuodatinkotelolla. Asennusvaiheessa havaittiin alkuperäisen tuulilasipesunestesäiliön täyttökaulan tulevan ilmansuodatinkotelon tielle, joten myös tuulilasipesunestesäiliö jouduttiin vaihtamaan Cosworth-mallista otettuun. Cosworth-mallin alkuperäistä ilmansuodatinkotelo haluttiin käyttää, koska se ottaa sisään tulevan ilman auton etupuskurin aukosta ja näin ollen sisään tuleva ilma on viileämpää kuin konehuoneesta imetty. Tällä on suoraan vaikutus moottoriin menevän ahtoilman lämpötilaan ja tiheyteen ja tätä kautta naktusherkkyteen ja tehoon. Lisäksi ilmansuodatinkotelossa oli valmiina letkulähdöt kampiakammion huohotusjärjestelmää varten.
- Kampiakselin asentotunnistin ja triggeripyörä tarvitaan, jos Megasquirtilla halutaan ohjata suorasytytystä hukkakipinäpuolan kautta. Jos tyydytään pelkästään polttoaineenruiskutuksen ohjaukseen ja/tai jakajasytytyksen ohjaukseen, ei kampiakselin asentotunnistinta ja triggeripyörää tarvita, jos virranjakaja pitää sisällään induktiivisen tai hall-anturin. Niissä autoissa, joissa virranjakajan sisällä ei ole kumpaakaan anturia, on jo tehtaan jäljiltä kampiakselin asentotunnistin.
- Polttoaineen ruiskutuslaitteet vaihdettu suurempiin etanolin kestäviin etanolikäytön ja ahtimen asennuksen vuoksi.
- Polttoainepumppu vaihdettu Bosch 044 -malliin, jotta taataan riittävä polttoaineen saanti kaikissa tilanteissa. Pumppuja on 2 kpl, molemmille polttoaineille omansa.

- Polttoainelinjat. Auton alkuperäiset polttoaineputket olivat ulkohalkaisijaltaan 8mm paineputken osalta ja 6 mm paluuputken osalta, ja materiaali oli mustaa teräsputkea. Putkien koko rajoittaa polttoaineen virtausta ja sitä kautta maksimitehoa. Aluksi moottoria testattiin pelkällä 98E5-bensiinillä, joten päätettiin kuitenkin kokeilla, pystyisikö vakio polttoaineputkia käyttämään edes maltillisilla tehoilla. Paineputki ei kuitenkaan kestänyt Boschin 044-polttoainepumpun tuottamaa painetta ja tuottoa vaan kirjaimellisesti räjähti jo kokeilun alkuvaiheessa. Tutkimuksissa syyksi putken räjähdykseen havaittiin piilevä korroosioaurio. Putken seinämä oli paikoitellen syöpyntyn paperin ohueksi. Korroosioaurio oli siis syntynyt putkistoon jo ennen kuin autoon oli kertaakaan ehditty tankata etanolia, johtuen putkiston 30 vuoden iästä, Suomen ilmasto-olosuhteista ja runsaasta tiesuolan käytöstä. Tästä viisastuneena opittiin, että polttoaineputkisto kannattaa valmistaa paremmin korroosiota kestävästä materiaalista, kuten kupari-nikkeliputkesta, rst-putkesta tai alumiiniputkesta. Tässä on tärkeää ottaa huomioon, että putken pitää olla autokäyttöön suunniteltua. Talotekniikkaan valmistetut putket eivät kestä tärinää, vaan niihin ilmestyy väsymismurtumia ajoneuvokäytössä.
- Pakosarja vaihdettiin 4-1-tyyppiseen tasamittaisilla sisämitaltaan 38mm:n ensiöputkilla varustettuun pulssisarjaan, jossa on ahtimen asennusta varten T3-laippa. Tämä on yksi yleisimpiä ahtimien laippoja markkinoilla ja mahdollistaa kokeilut monipuolisesti eri ahtimilla. Lisäksi on saatavilla adaptereita, joilla T3-jako voidaan muuttaa muihin yleisimpiin jakoihin. Pakosarjan kollektorissa on nipat EGT-anturia varten ja pakopaineiden mittausta varten.
- Moottoriin on asennettu turboahdin. Kokeiltavana on tällä hetkellä mm. Holset HX35, Garrett gt28rs -kuulalaakeriahdin, Garrett T03 -malleja useammalla eri pakopesällä ja kompressorilla sekä Garrett T25- ja Garrett gt17 -ahtimia. Ahtimen lopullinen valinta tehdään, kun on päästy testaamaan kaikkia näitä ahtimia radalla ja tehopenkissä. Myös moottorin ohjaus pitää aina säätää uudestaan ahdinta vaihdettaessa. Onneksi kartat voi aina tallentaa kannettavalle tietokoneelle, joten kun kaikki ahtimet on kokeiltu, on myös kaikille kartat valmiina.
- Pakoputkisto, autoon on asennettu 2,5":n eli 64 mm:n pakoputkisto yhdellä läpivirtaavalla Simons-merkkisellä absorbtiovoimentimella. Kun autoa päästään kunnonla testaamaan, nähdään pakopaineita ja pakolämpöjä tarkkailemalla, onko

putkiston mitoitus riittävä vai onko sitä tarvetta muuttaa. Turboahtimen toimintahan on sitä tehokkaampaa, mitä suurempi paine-ero pakosarjan ja pakoputkiston välillä vallitsee. Toki väärällä turboahtimen pakopesän mitoituksella voidaan myös aiheuttaa pakosarjaan liian korkea pakopaine, joka on haitallista moottorin hengityksen kannalta. Tällöin myös pakolämmöt nousevat. Molemmat seikat ovat liian korkeina haitallisia männille, koska niiden lämpökuorma kasvaa ja ne voivat sulaa, myös moottorin nakutusherkyys nousee ja myös se on männille erittäin haitallista. Pakopaine ei saisi ylittää ahtopainetta. Nämä ovat tärkeitä huomioon otettavia seikkoja ahdettaessa moottoria, joka on ollut alun perin vapaasti hengittävä.

- Downpipe. Koska moottoria testataan useammalla eri ahtimella, joudutaan valmistamaan jokaista testiä varten kyseiselle ahtimelle sopiva downpipe, koska ahtimen turbiinin jättöpää ja poistoaukon laippa ovat erilaiset eri ahdin malleissa. Downpipessä on myös m18x1,5-kierre lambda-anturia varten.
- Kampikammion huohotusjärjestelmä, vapaastihengittävässä moottorissa kampikammion huohotushuurut imetään imusarjaan ja sitä kautta poltetaan moottorin palotiloissa. Nyt kun imusarja ylipaineistetaan, niin vakiohuohotusjärjestelmä ei enää toimi, koska imusarjassa vallitseva ylipaine alkaisi virrata huohotusjärjestelmää väärään suuntaan kohti kampikammiota. Tästä syystä kampikammion huohotus täytyy toteuttaa erillisellä kerääjäsäiliöllä ja huurujen imuletku pitää asentaa ahtimen imupuolelle lähelle ilmansuodatinta.
- Ahtoputkisto, ahtimelta välijäähdyttimelle ja välijäähdyttimeltä kaasuläpälle menevä putkisto valmistetaan mittatilaustyönä, koska suoraan sopivia tehdastekoisia ei ollut saatavilla, toki voisi olla mahdollista, että Ford Sierra Cosworthin turbolta välijäähdyttimelle menevä ahtoputki olisi saattanut käydä suoraan, mutta koska sellaista ei ollut tätä työtä tehtäessä käsillä, niin päädyttiin valmistamaan kaikki mittojen mukaan sopiviksi. Ahtoputkistoa suunniteltaessa kiinnitettiin huomiota siihen, että moottori heiluu hieman kiihdytyksissä ja moottorijarrutuksissa, joten ahtoputkiston pitää päästä joustamaan käytön aikana, muutoin välijäähdytimeen ja ahtoputkistoon voi syntyä jännityksiä, jotka saattavat aiheuttaa repeämiä rakenteisiin.



- Välijäähdytin, kun ilmaa puristetaan kokoon turboahtimen kompressorissa, se lämpenee, lämmin ilma ei ole yhtä tiheää kuin viileä ilma, joten sitä mahtuu vähemmän sylinteriin ja tämä vaikuttaa suoraan moottorin suorituskykyyn. Liian kuuma ahtoilma myös lisää moottorin nakutusherkkyyttä, joten siitäkin syystä ahtoilman lämpötila on syytä pitää mahdollisimman matalana. Näistä syistä autoon asennetaan välijäähdytin jäähdyttämään ahtoilmaa. Välijäähdytimeksi valittiin Ford Sierra Cosworthin välijäähdytin, koska se on kokonaan alumiininen päätyjä myöten, eli sitä kautta kestävämpi kuin muovipäätyiset välijäähdyttimet, jotka alkavat toisinaan vuotaa muovisen päädyn ja alumiinisen kennon saumasta. Lisäksi kyseinen välijäähdytin sopii suoraan auton omiin kiinnityspisteisiin, koska se on jo tehtaalla suunniteltu kyseistä automallia varten. Kun autoa päästään testaamaan kesähelteillä radalla, selviää, onko välijäähdyttimen teho riittävä vai tarvitseeko välijäähdytin päivittää vielä tehokkaampaan RS500-malliseen, joka on suurin tehdastekoinen nimenomaan kyseiseen koriin suunniteltu välijäähdytin. Kolmas vaihtoehto on niin sanottu yleismallinen välijäähdytin, joita on saatavana monia eri kokoja. Ne vaativat kuitenkin yleensä aina jonkun verran muokkaamista muun muassa kiinnikkeiden ja letkulähtöjen osalta, ennen kuin ne sopivat kunnolla. Neljäs ja kallein vaihtoehto on mittailausvälijäähdyttimen teettäminen.
- Ohjelmoitavan moottorinohjauksen johtosarja, tässä työssä valmistettiin johtosarja, joka sopii suoraan moottorin oman johtosarjan liittimiin, ohjelmoitavan moottorinohjauksen liittimeen, ja auton johtosarjaan. Yhtään auton oman johtosarjan johtoa ei katkaistu tai käytetty ”rosvoliittimiä”, koska luotettavuudesta ei haluttu tinkiä lainkaan. Samaa pätee moottorin johtosarjaan. Havaittiin myös, että moottorin johtosarjassa suuttimien kelan maadoitusta ohjaavat johtimet olivat 1,5 mm<sup>2</sup> poikkipinta-alaltaan, kun taas ohjelmoitavan moottorinohjausyksikön liittimeen sopi vain 0,75 mm<sup>2</sup>:n johdin. Koska auton valmistaja oli päättänyt käyttämään suutinten maadoituksen ohjauksessa 1,5 mm<sup>2</sup>:n johtimia, katsottiin parhaaksi, että myös tätä samaa kokoa käytetään ohjelmoitavan moottorin ohjauksen johtosarjassa suuttimien maadoituksen ohjauksen osalta. Ohjelmoitavan moottorinohjauksen kytkentäkaaviota tutkittaessa havaittiin, että kyseinen moottorinohjainyksikkö pystyy ohjaamaan jopa kahdeksaa suutinta kerralla, joten sen liittimessä oli tyhjät paikat näille neljälle lisäjohtimelle. Koska ohjain ohjaa suuttimien maadoitusta ns. batch-fire-periaattella eli kaikki suuttimet suihkuttavat samaan aikaan, voitiin ottaa käyttöön nämä tyhjiään olleet paikat moottorinohjausyksikön liittimestä ja kahdentaa jokainen suutinten maadoitusta ohjaava 0,75

mm<sup>2</sup>:n johdin moottorinohjausyksikön liittimeltä aina moottorin johtosarjaan tulevalle liittimelle asti. Näin johdinten yhteenlaskettu pinta-ala oli sama kuin moottorin johtosarjassa.

- Polttoainepumpun johtosarja. Koska auto oli alun perin varustettu kaasutinmoottorilla, valmistettiin myös polttoainepumpulle oma johtosarja. Ensimmäisessä vaiheessa valmistettiin seuraavanlainen järjestelmä: Kun sytytysvirta kytketään päälle, niin se ohjaa polttoainepumpun releen käämiä, joka saa maadoituksensa moottorinohjaukselta. Jos moottori ei pyöri, moottorinohjaus katkaisee maadoituksen 2 sekunnin kuluttua. Tällä järjestelyllä vähennetään tulipalon riskiä tilanteessa, jossa polttoainelinja katkeaa ja moottori sammuu polttoaineen puutteeseen. Polttoainepumpun rele ohjaa polttoainepumpulle akun positiiviselta navalta sulakkeen ja inertiakytkimen kautta tulevaa 12 V:n jännitettä. Inertiakytkin katkaisee virtapiirin, jos ajoneuvoon kohdistuu voimakas hidastuvuus, esimerkiksi kolariissa. Sen tarkoitus on katkaista polttoaineen syöttö, jos auto joutuu onnettomuuteen. Inertiakytkimeksi valittiin Fordin oma tuote, jota on käytetty useissa Fordin polttoaineen ruiskutuksella varustetuissa malleissa 1990-luvulla. Autokäyttöön tarkoitettujen sarjavalmisteosien käytöllä on haluttu tässä työssä varmistaa paras mahdollinen luotettavuus. Kun ensimmäinen vaihe oli testattu toimivaksi, oli aika siirtyä toisen vaiheen pariin. Siinä järjestelmään lisätään toinen polttoainesäiliö ja pumppu etanolia varten. Polttoainepumpun releen ja pumpun väliin kytketään vaihtorele, jota ohjataan valintakytkimellä. Vaihtoreleen navoilta menee johtimet molemmille polttoainepumpuille, ja valintakytkimen asennon mukaan vain toinen pumpuista pyörii vuorollaan. Molemmat pumput syöttävät auton polttoainelinjaa. Koska pumpuissa on takaiskuventtiilit, ei paluuvirtausta pääse pumpun läpi tapahtumaan pumpun ollessa sammutettuna. Polttoaineen paluuputki haarautuu kahtia kummallekin säiliölle, ja haarautumiskohdassa on solenoidi, jolla paluukierto ohjataan oikeaan säiliöön sen mukaan, kumpi polttoainepumpuista pyörii. Toisen vaiheen järjestelystä on sivulla 14 kaaviokuva polttoainejärjestelmästä (kuva 3).
- Kytkin ja voimansiirto. 215 mm:n vakiokytkin riittää vapaastihengittävään moottoriin, mutta ahtimen asennus lisää vääntömomenttia niin paljon, ettei kytkin enää luistamatta pysty välittämään kasvanutta momenttia. Jäykempi paineasetelma uudella massalevyllä auttaa hieman pito-ongelmiin, mutta todennäköisesti kytkin alkaa uudelleen luistamaan, kun moottori saadaan kunnolla säätöihin. Ford Transitin 2,0 ohc-moottorissa on sama 240mm:n kytkin ja paineasetelma kuin Ford

Sierra Cosworth-mallissa, ja tämän kytkimen soveltuvuutta tutkittiin myös tämän työn yhteydessä. Transitin vauhtipyörä sopii suoraan Sierran 2.0-ohc-moottoriin, mutta vauhtipyörää pitää koneistaa, jotta siihen saadaan asennettua Sierran vauhtipyörästä starttimoottorin hammaskehä. Alustavien mittausten perusteella vaikuttaa myös siltä, että tämä isompi vauhtipyörä-kytkinpaketti ei mahdu pyörimään vakiokytkinkopan sisällä ilman koneistustöitä. Yhtenä vaihtoehtona on käyttää Fordin MT75-vaihteistoa ja kardania, jotka sopivat suoraan sekä moottoriin, että auton koriin ja vetopyörästään. Voimansiirtomuutokset menevät kuitenkin tämän työn aihealueen ulkopuolelle eikä niitä käsitellä tässä työssä tämän enempää.

#### 4.6 Moottorin apulaitteiden osat joiden soveltuvuutta tutkitaan

Moottorin apulaitteiden osat joiden soveltuvuutta etanolikäyttöön tutkitaan, ovat seuraavat:

- Suutintukki, koemoottorin suutintukki on valmistettu tavallisesta mustasta teräksestä, jonka teoriassa pitäisi kestää etanolia, mutta jos etanoliin absorboituu kosteutta, pitää seurata alkaako suutintukin sisäpinnoille muodostumaan korroosiota. Jos korroosiota alkaa muodostumaan, korvataan alkuperäinen suutintukki ruostumattomasta teräksestä valmistetulla.
- Polttoaineen paineensäädin. Paineensäätimen tarkoituksena on pitää suutintukissa vallitsevan polttoaineen paineen ja imusarjassa vallitsevan ilmanpaineen välinen paine-ero vakiona, 2,5 bar:ssa. Tällöin polttoainetta ruiskutetaan tyhjäkäynnillä alhaisella paineella ja paine nousee lineaarisesti imusarjan paineen noustessa moottorin kuormituksen kasvaessa. Toisen sanoen suutinten tuotto kasvaa kuormituksen kasvaessa. Tämä mahdollistaa tarkemman seossäädön eri kuormitustilanteissa. Alkuperäisen Boschin valmistaman polttoaineenpaineensäätimen etanolin kestävyttä ja toimivuutta ahdetussa moottorissa seurataan valvomalla polttoaineen painetta elektronisella anturilla. Jos paineessa alkaa ilmenemään epänormaaleja muutoksia, korvataan alkuperäinen paineensäädin ahdettuun etanolikäyttöiseen moottoriin paremmin soveltuvalla. Alkuperäisen säätimen valmistajan Boschin varaos numerona 0 280 160 216 (kuva 4) tutkimalla selvisi, että samaa säädintä on käytetty useissa turboautoissa jo 1980–1990-luvuilla, muun muassa Bmw 745i 3,2 252 -hv turbomallissa, Citroen CX 2,5 GTi

Turbo

-malleissa ja Lancia Thema 2,0 16v Turbo -malleissa, tämän tiedon perusteella Boschin säätimen pitäisi siis toimia oikein vallitsipa imusarjassa ilmakehän painetta alhaisempi tai korkeampi paine, mutta kuinka korkeaa imusarjan painetta säädin pystyy käsittelemään, selviää kun moottori saadaan säädettyä tehodynamometrissa ja sitä päästään kuormittamaan käytännön testeissä. Myös säätimen etanolinkestävyys selviää käytännön testeissä.



Kuva 4. Bosch 0 280 160 216 -polttoaineenpaineensäädin [5]

- Sytytystulpat. Koska etanoli pienentää moottorin palotapahtuman lämpötilaa, sytytystulpat voi olla tarvetta vaihtaa lämpöarvoltaan kuumempiin. Toisaalta ahtaminen taas nostaa palotapahtuman lämpötilaa ja painetta, joten sytytystulpat voidaan joutua vaihtamaan myös lämpöarvoltaan kylmempiin. Asiaan saadaan lisää selvyttä, kun moottoria päästään kuormittamaan tehodynamometrissa ja käytännön kokeissa. Joka tapauksessa sytytystulppia on syytä tarkkailla jo säätövaiheessa.

#### 4.7 Suoraan ohjelmoitavan moottorinohjainlaitteen kanssa yhteen sopivat apulaitteiden osat

Moottorin apulaitteiden osat, jotka sopivat suoraan ohjelmoitavan moottorinohjauksen kanssa yhteen, ovat seuraavat:

- TPS, eli kaasuläpän asentotunnistin on kyseisessä moottorissa potentiometri-tyyppiä, joten se sopii suoraan käytettäväksi ohjelmoitavan moottorin ohjauksen kanssa. Anturin pitää olla potentiometri-tyyppiä, jotta moottorinohjaus saa jatkuvasti tarkan tiedon kaasuläpän asennosta ja sen muuttumisnopeudesta. Moottorinohjaus kalibroidaan anturille siten, että moottorinohjaukselle asetetaan anturin antama arvo kaasuläppä täysin suljettuna ja kaasuläppä täysin auki. Koska arvo muuttuu lineaarisesti näiden kahden pisteen välillä, moottorinohjaus osaa tulkita kaasuläpän kaikki asennot oikein.

## 5 Ohjelmoitava moottorinohjaus

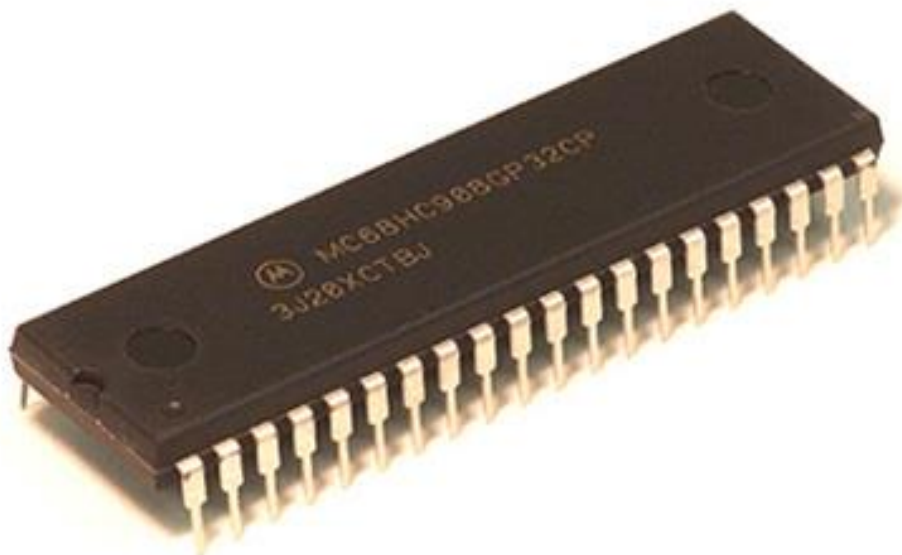
### 5.1 Moottorinohjauksen valintaperusteet

Tässä työssä moottorinohjaus on hyvin keskeisessä asemassa. Oli selvää, että moottorinohjauksen pitää olla itse säädettävissä kannettavalla tietokoneella, koska muutoksia on tehty paljon ja niitä tullaan tekemään lisää jatkossa eikä ole mielekäästä saati kustannustehokasta kuljettaa autoa säädettäväksi toiselle puolelle Suomea aina, kun moottorille tehdään joitain muutoksia. Sillä tavalla ei myöskään oppisi mitään uutta, ja halu oppia uutta oli suurin syy koko työn aloittamiseen. Siksi tarvittiin avoimen lähdekoodin moottorinohjausjärjestelmä, joka ei vaadi säätäjältä kalliita lisenssejä ja ohjelmistoja. Toinen tärkeä kriteeri moottorinohjaukselle oli, että sillä voidaan luoda omat karttansa polttoaineen suihkutukselle, sytytysennakolle ja ahtopaineelle vähintään kahdelle huomattavan erilaiselle polttoaineelle, eli RE85-korkeaseosbioetanolille ja 95-oktaaniselle bensiinille. Karttojen pitää myös olla helposti vaihdettavissa aina haluttaessa vaihtaa polttoainetta. Ideaalitalanne on, että kojelaudassa olevalla valintakytkimellä voidaan valita haluttu polttoaine. Kolmas valintaperuste oli varaosien ja kytkentäkaavioiden saatavuus. Neljäs valintaperuste oli moottorinohjauksen hinta: koska työ tehdään opiskelijabudjetilla, täytyy myös kustannukset pitää järkevällä tasolla. Itseasiassa koko työn budjetti on

mitoitettu siten että kuka hyvänsä tekniikasta kiinnostunut ihminen pystyy toteuttamaan sen kohtuu kustannuksin.

## 5.2 Moottorinohjaus

Moottorinohjaukseksi valittiin Megasquirt 1 v2.2 joka alun perin on tarkoitettu vain polttoaineen suihkutuksen ohjaukseen, mutta siihen on saatavana ilmaiseksi päivitys nimeltä extra-koodi, jonka asennuksen jälkeen saadaan käyttöön tämän työn kannalta oleelliset sytytyksenohjaus ja tableswitching-toiminto, joka tarkoittaa käytännössä karttojen vaihtoa. Valittu versio on Megasquirtin edullisin malli, jolla pystytään kuitenkin täyttämään kaikki tässä moottorissa tarvittavat moottorinohjaukseen liittyvät tarpeet. Prosessorina toimii Motorolan 68HC908-IC-piiri (kuva 5). Extra-koodipäivityksellä saadaan käyttöön 12x1-kartat polttoaineensuihkutukselle ja sytytysennakolle.



Kuva 5. 68HC908-IC-piiri [6]

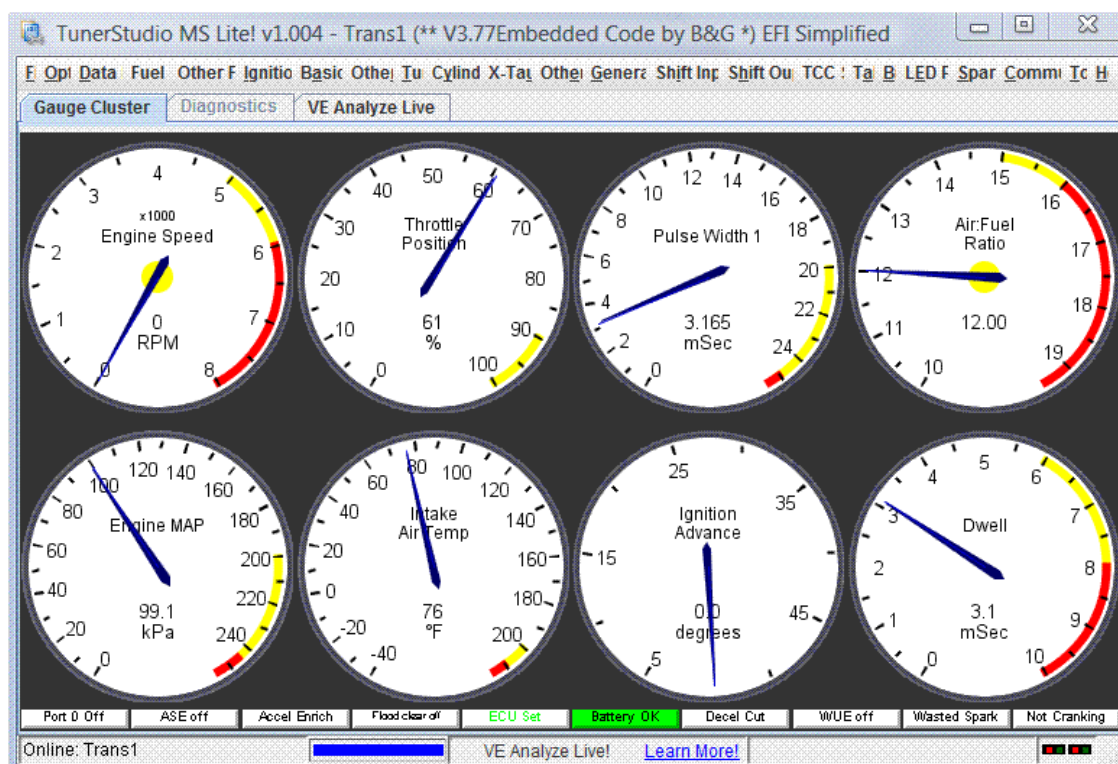
Moottorinohjausyksikössä on sisään rakennettu 250KPa:n paineanturi, joka siis kykenee mittaamaan absoluuttista painetta 2,5 bar:iin asti eli ylipainetta 1,5bariin asti. Sen tilalle on saatavana 400KPa:n paineanturia, joka kykenee mittaamaan absoluuttista painetta 4 bar:iin asti ja ylipainetta 3bar:iin asti. Kuitenkaan tässä ensimmäisessä koemoottoriversiossa ei tulla käyttämään yli 1bar:n ahtopaineita, joten 250KPa:n paineanturi riittää hyvin ja lisäksi se on tarkempi mittausalueellaan.



Kuva 6. MPX4250AP-MAP-anturi [7]

### 5.3 Säätöohjelmisto

Megasquirtin alkuperäinen säätöohjelmisto oli nimeltään Megatune, mutta sen on lähes täysin syrjäyttänyt helppokäyttöisempi ja modernimpi TunerStudio, joka on Java-pohjainen ilmainen ohjelmisto kannettavalle tietokoneelle ja tabletille. On saatavissa myös maksullisia vielä hieman monipuolisempia versioita, mutta niille ei tässä työssä nähty tarvetta. Moottorinohjausyksikön päädyssä on sarjaportti, johon kannettava tietokone yhdistetään tarkoituksenmukaisella tiedonsiirtokaapelilla. TunerStudio-ohjelmistolla pystyy ajon aikana säätämään reaaliajassa suihkutuksen ja sytytysennakon määrää sekä ahtopaineen ohjaussolenoidia.



Kuva 7. TunerStudio-säätöohjelmisto, jolla nähdään suoraan antureiden lähettämää dataa selkeässä muodossa, mikä helpottaa säätämistä [8]

#### 5.4 Autoon asennettavat mittarit

Säätötyössä ja moottorin toiminnan tarkkailussa tarvitaan monia mittareita:

- Ahtopainemittari on yleisimpiä lisämittareita ahdetussa autossa. Siitä voidaan seurata turbon heräämistä ja millä pyörintänopeudella ja kuormituksella saavutetaan täysi ahtopaine. Lisäksi voidaan seurata, ettei ahtopaine nouse liian korkeaksi esimerkiksi hukkaportin jumittumisen takia. Myös ahtovuodot nähdään mittarista.
- Laajakaistaseossuhdemittari on tärkein apuväline ohjelmoitavan polttoaineenruiskutuksen säätötyössä. Turbomoottorin tapauksessa sen tarve korostuu entisestään, koska liian laiha seos ahdetussa moottorissa johtaa moottorivaurioon. Liian rikas seos taas aiheuttaa voiteluöljykalvon peseytymisen pois sylinterin seinämillä ja johtaa tätä kautta nopeutuneeseen moottorin kulumiseen. Lisäksi liian rikas seos karstoittaa moottoria turhaan. Myös kulutus ja päästöt nousevat tarpeettoman rikkaan seoksen seurauksena. Teoriassa 1kg bensiiniä tarvitsee 14,7kg ilmaa palaakseen täydellisesti, mutta käytännössä seossuhde pitää valita



kuormituksen mukaan. Kevyellä kuormalla saavutetaan paras polttoainetalous hieman laihalla seoksella esimerkiksi 15:1-ilma-polttoaineseoksella ja paras teho taas saavutetaan rikkaammalla seossuhteella, esimerkiksi 12,5:1. Nämä ovat vain karkeita lähtöarvoja bensiinille, ja optimaaliset seossuhteet selviävät käytännön mittauksissa, joita voi tehdä sekä ajonaikana että dynamometrissä.

- Nakutuksen tunnistus voidaan joko toteuttaa piezosähköisen nakutusanturin, elektronisen ohjaimen ja varoitusvalon avulla tai käyttää nakutuskuulokkeita. Joka tapauksessa nakutuksen tarkkailu on erittäin tärkeää säätötyön aikana, koska nakuttava palaminen johtaa moottorivaurioon.
- Pakolämpömittauksessa käytetään K-tyypin termoparia lukevaa mittaria ja pakolämpöjen seuraaminen on tärkeää, koska liian korkeat pakolämmöt johtavat mäntä- ja pakoventtiilivaurioihin. Liian korkeat pakolämmöt voivat johtua esimerkiksi liian laihasta seoksesta, liian myöhäisestä sytytyshetkestä, väärin mitoitetusta pakosarjasta, pakopesästä, pakoputkesta, kompressorista tai ahtoilman jäähdytyksestä.
- Pakopainemittaus kertoo, onko pakosarja, pakopesä ja pakoputkisto mitoitettu oikein. Ihanteellista olisi, että pakopaine pysyisi pienempänä kuin ahtopaine läpi ahtopainealueen. Tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista, vaan joissain tapauksissa pakopaineet nousevat ahtopainetta suuremmaksi, ja tämä tietysti heikentää moottorin kaasunvaihtoa eli huuhtelua. Liian korkea pakopaine aiheuttaa myös pakolämpöjen nousua.
- Polttoaineenpaineen mittaus on toteutettu siten, että suutintukissa on potentiometrityyppinen paineanturi, joka lähettää elektroniselle kojelaudassa sijaitsevalle mittarille tiedon suutintukissa vallitsevasta paineesta. Tähän järjestelyyn päädyttiin paloturvallisuussyistä. Olisi todella palovaarallista asentaa auton sisätiloihin suoraan polttoaineen painetta mittaava mittari, koska mittarille pitäisi tuoda suutintukilta paineletku ja tämän letkun mahdollinen vuoto aiheuttaisi tulipalovaaran. Polttoaineen paineen tarkkailu on tärkeää useammastakin syystä. Ensinnäkään ei ole tietoa, kuinka suurta imusarjan ylipainetta moottorin vakio-polttoaineenpaineensäädin pystyy lukemaan. Se pitää siis selvittää käytännön testeillä. Toiseksi ei ole tietoa, kestäkö vakio-polttoaineenpaineen säädin jatkuvaa etanolikäyttöä; sekin pitää selvittää käytännön testeillä.

- Öljynlämpö on tärkeä tieto, koska voiteluöljy on suunniteltu toimimaan oikein suhteellisen kapealla, 70°C–120:n °C lämpötila-alueella. Moottoriöljyn lämpötilan ollessa tämän alueen ulkopuolella moottoria ei saa kuormittaa raskaasti, koska se johtaisi nopeutuneeseen kulumiseen tai pahimmillaan laakerivaurioon. Ihanteellinen moottoriöljyn lämpötila mahdollisimman tehokkaan moottorin toiminnan ja voitelun kannalta on 95 °C–105 °C (9). Jos moottoriöljyn lämpötila nousee säännöllisesti liian korkeaksi, on öljynjäähdyttimen asennus välttämätöntä moottorivaurion välttämiseksi. Parasta on asentaa termostaattiohjattu öljynjäähdytys, joka kierrättää öljyn jäähdyttimen kautta vain öljynlämmön tätä oikeasti edellyttäessä. Öljyä ei kannata jäähdyttää turhaan, koska liian alhainen öljynlämpö aiheuttaa moottorin nopeaa kulumista.
- Öljynpaineiden seuraaminen on tärkeää varsinkin jälkiahdetussa moottorissa, jossa ahtimelle ja mahdollisesti öljynjäähdyttimelle on vedetty omat öljylinjansa ja ahtimelle menevän öljyvirtauksen useimmiten tuottaa moottorin oma öljypumppu. Useissa sarjatuotantomootoreissa öljypumpun kapasiteetti riittää kyllä tuottamaan ahtimenkin tarvitseman öljymäärän, mutta asia on aina syytä varmistaa mittaamalla öljynpaineet kaikissa kuormitustilanteissa. Varsinkin raskaamassa kuormituksessa öljynlämmöt saattavat nousta niin ylös, että öljynpaineet laskevat alle sallitun ja tällöin öljynjäähdytystä on tehostettava. Myös öljylinjaan tuleva vuoto voi aiheuttaa yhtäkkisen öljynpaineiden romahtamisen ja sitä kautta moottorin tai turbon vaurioitumisen, joten tästäkin syystä öljynpaineiden tarkkailu on tärkeää. Näiden lisäksi öljypumppuvauriot ja alkavat laakerivauriot pystytään havaitsemaan öljynpaineita tarkkailemalla ja asia voidaan korjata aikaisessa vaiheessa, ennen kuin koko moottori vaurioituu, tai tuhoutuu. On myös otettava huomioon, että joissakin tapauksissa etanolin käyttäminen on aiheuttanut moottoriin kertyneiden karstakerrostumien irtoamisen ja päätymisen öljypumpun imusihtiin ja sitä kautta pikkuhiljaa tukkineen imusihdin. Öljynpaineita seuraamalla tämäkin ongelma voidaan havaita ajoissa ja selvittää pelkällä imusihdin ja öljypohjan puhdistuksella, puhdistuksen jälkeen ongelmia ei ole ollut, koska etanolikäytössä karstaa ei muodostu siinä määrin kuin bensiiniä poltettaessa ja etanolikäytössä öljynvaihtovälitkin ovat tiheämmät.

#### 5.4 Valitun moottorinohjauksen hyvät puolet

Valitun moottorinohjauksen edut ovat seuraavat:

- Avoin lähdekoodi: kytkentäkaaviot ja ohjelmistot ovat vapaasti kaikkien saatavilla.
- Varaosien saatavuus: kaikkia muita varaosia on saatavissa elektroniikkaliikkeitä kohtuuhintaan, paitsi ensimmäisen mallin prosessorin valmistus on päättynyt, ja sitä saa enää niin pitkään kuin varastot riittävät.
- Monipuolisuus: Kaikkia tämän työn kannalta tärkeitä parametreja pystytään säätämään niin polttoaineen ruiskutuksen, sytytysennakon (vaatii extra-koodin), kuin ahtopaineen osalta, moottorin käydessä.
- Mahdollisuus polttoaineensuihkutus-, sytytysennakko- ja ahtopainekarttojen vaihtoon nappia painamalla ajon aikana. Tämä toiminto vaatii extra-koodin.
- Hyvä tuotetuki, itse Megasquirtista löytyy suomenkielinen megamanuaali ja msextra.com-sivustolta löytyy englanninkieliset manuaalit extra-koodin jokaiselta osa-alueelta, ja niistä on todella paljon hyötyä rakennus- ja säätövaiheessa. Lisäksi säätötyön avuksi on laskureita, joilla aloitusarvoja polttoaineen ruiskutus-pulssien pituudelle ja sytytysennakolle pystyy arvioimaan.
- Hinta
- Saatavuus.

## 5.5 Valitun moottorinohjauksen huonot puolet

Valitun moottorinohjauksen huonoja puolia ovat seuraavat:

- DB37-liitin, jota ohjausyksikössä käytetään ei ole tarkoitukseen kaikista paras mahdollinen, koska liittimeen sopii vain 0,75mm<sup>2</sup>:n johdin, joka on hieman alimitoitettu autokäytössä moottorinohjauksen yhteydessä. Se sopii lähinnä signaali-johtimeksi.
- Ei mahdollisuutta sekventiaaliseen polttoaineen ruiskutukseen.
- Polttoaineen ruiskutuslaitteiden ohjauksen tarkkuus ei yllä uusimpien ja kalliimpien moottorinohjausjärjestelmien tasolle.

## 6 Yhteenveto ja loppupäätelmät

Työ onnistui sikäli hyvin, että koemoottori toimii hyvin ja varsinkin moottorin kaasuun vastaavuus parani selkeästi, kun läppätyyppisestä ilmamäärämittarista luovuttiin ja siirryttiin map-pohjaiseen speed-density-mittaustapaan. Varsinaisia epäonnistumisia ei koettu, mutta tätä työtä tehdessä Metropolian tehodynamometri ei ollut vielä asennettuna uudelle kampukselle Vantaan Myyrmäkeen, joten työn mielenkiintoisinta osuutta, mitauksia, ei vielä ole päästy suorittamaan ja samasta syystä myös moottorin hienosäätö on vielä kirjoitushetkellä tekemättä. Kun auto tulevaisuudessa saadaan tehodynamometriin säädettäväksi ja mitattavaksi, saadaan tärkeää dataa työn vaikutuksesta tehoon, vääntömomenttiin, kulutukseen ja päästöihin. Mittausten jälkeen aloitetaan kokeilut eri ahtimilla, pakosarjoilla, välijäähdyttimillä, suuttimilla ja muilla moottoriteknisillä ratkaisuilla ja myös voimansiirtoa tullaan vahvistamaan mutta nämä muutokset menevät laajuudessaan paljon pidemmälle kuin tämä työ, jonka tarkoituksena oli lähinnä luoda pohjaa tulevaisuuden kokeiluille ja tutkimuksille.

Tämä työ myös opetti paljon uusia asioita moottorinohjauksesta, sen säädöstä ja komponenttien valinnasta. Megasquirt oli edullinen keino tutustua ohjelmoitavaan moottorinohjaukseen ja hankkia käyttökokemusta järjestelmän säädöstä. Työstä saaduilla pohjatiedoilla on hyvä lähteä tulevaisuudessa tutustumaan kehittyneempien moottorinohjausjärjestelmien maailmaan.

## Lähteet

[1] Polttoaineiden laatuvarmistuksen kehittäminen 2010. VTT. Tiedote.

[2] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY.

[3] Electronics Projects, Build Your Own Knock Sensor Display Larry Fisher Knock indicator PCB layout. Verkkoaineisto. The Turbo Regal Site.  
<<http://www.gnttype.org/techarea/projects/projectspage.html>>. Luettu 10.2.2019.

[4] Electronics Projects, Build Your Own Knock Sensor Display Larry Fisher Knock indicator circuit. Verkkoaineisto. The Turbo Regal Site.  
<<http://www.gnttype.org/techarea/projects/projectspage.html>>. Luettu 10.2.2019.

[5] Pressure regulator, injection system Bosch order number: 0 280 160 216. Verkkoaineisto. Bosch. <<https://www.bosch-automotive-catalog.com/en/product-detail/-/product/0280160216>>. Luettu 15.2.2019.

[6] MegaSquirt-1 Manual. Verkkoaineisto. MegaSquirt.  
<<http://www.msextra.com/doc/index-ms1.html>>. Luettu 2.2.2019.

[7] MPX4250 2.5 Bar MAP Sensor. Verkkoaineisto. DIYAUTOTUNE. <<https://www.diy-autotune.com/product/mpx4250-2-5-bar-map-sensor/>>. Luettu 2.3.2019.

[8] MegaSquirt Electronic Fuel Injection Computer by Bowling and Grippo. Verkkoaineisto. MegaSquirt. <<http://www.bgsoflex.com/megasquirt.html>>. Luettu 1.2.2019

[9] Bell, Graham A. 1998 Nelitahtimoottorin virittäminen. Helsinki: Alfamer.