



MEGASQUIRT 2 -MOOTTORIN- OHJAIN, MALLINNUS JA VIRITYS

Juha Turunen

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2017
Sähkötekniikka
Automaatiotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu

Sähkötekniikka

Automaatiotekniikka

TURUNEN, JUHA:

MegaSquirt 2 -moottorinohjain, mallinnus ja viritys

Opinnäytetyö 96 sivua, joista liitteitä 11 sivua

Kesäkuu 2017

Opinnäytetyö keskittyi MegaSquirt 2 -moottorinohjaimeen. Kohdejoneuvona oli vuoden 1986 Saab 900, jossa oli B201 -moottori turboahtimella ja moottorinohjaimella MegaSquirt 2. Tavoitteena oli parantaa moottorin tehoa ja polttoainetaloutta. Edeltävässä MegaSquirt 1 -moottorinohjaimessa oli useita vikoja, eikä sen polttoainetalous ollut hyvä.

Alkuvaiheessa tutkittiin moottorin antureita ja toimilaitteita. Huomattiin muun muassa, että ahtopaineella ei ollut kunnollista säätöä. Moottorin anturit kalibroitiin ohjaimeen. Sytytysennakkokartta matki aluksi jakajan sytytysennakkosäädön toimintaa. Mallinnuksella pyrittiin luomaan ohjaimelle ohjauskartat, jotka viritettiin mittaustuloksien mukaan. Polttoainetalouteen ja päästöihin vaikutettiin polttoainekartalla, seoskartalla, sekä seossäädöllä. Sytytysennakon vaikutuksia tutkittiin simuloimalla ja äänittämällä nakutusanturin signaalia. Moottorin tehoa nostamaan lisättiin ahtopaineen säätö. Työssä tutustuttiin AE ja EAE kompensointimalleihin, joilla pyrittiin parantamaan nopeiden muutostilojen käyttäytymistä. Ajotesteillä mitattiin polttoaineen kulutusta kaupunki ja maantieajossa, sekä testattiin kohdejoneuvon kiihtyvyys suljetulla alueella.

Työssä huomattiin, ettei MegaSquirt 2 -moottorinohjaimen sytytysennakkoa voida viritellä luotettavasti ilman moottorin nakutusanturilta saatavaa tietoa. Sytytyksen simulointia ja nakutuksen kuuntelua ei jatkettu. Nakutusanturille rakennettiin tunnistin, joka tuottaa mitattavissa olevan jännitetason. Tunnistin on vielä kokeiluasteella, mutta alustavien mittausten perusteella se on toimiva ratkaisu. Mittaustulosten perusteella voidaan myös todeta, että moottorin suoritusarvot paranivat.

Asiasanat: moottorinohjain, kompensointi, viritys, sytytys, nakutus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Automation Engineering

TURUNEN, JUHA:
MegaSquirt 2 -engine controller, modelling and tuning.

Bachelor's thesis 96 pages, appendices 11 pages
June 2017

The thesis focused on the MegaSquirt 2 -engine controller. The target vehicle was 1986 Saab 900 with a B201 -engine with a turbocharger and the MegaSquirt 2 -controller. The aim was to improve engine power and fuel economy. The previously used MegaSquirt 1 -controller had several defects and its fuel economy was not good.

First sensors and actuators used in the car are examined. It was noted, among other things that there was no proper control for boost pressure. Initially ignition timing map emulated distributor timing. Effects of the ignition timing were simulated and knock sensor recordings were examined. Fuel economy and exhaust emissions are affected with fuel map, ratio target map and ratio control. Engine power and turbo charger efficiency was improved with enabling the boost control function. Modelling aimed to create basic maps for the controller. Maps are then tuned based on measurements and target values. Compensation models AE and EAE were used to improve fast transient response of the engine. The fuel consumption was measured on driving tests. The acceleration of the vehicle was tested on the closed area.

It was noted that ignition timing can't be tuned properly without reading knock sensor. Simulation had many unknown variables and the knock signal amplitude varied too much. The knock sensor signal needs a detector that filters noise and produce measurable voltage level for the MegaSquirt 2. The detector was made after examining signal. The detector is still on trial stage, but based on the preliminary measurements its viable solution. After driving tests, it can also be stated that the performance of the engine improved.

Key words: engine control unit, compensation, tuning, ignition, knock

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TEOREETTISET LÄHTÖKOHDAT	7
2.1	MegaSquirt moottorinohjain.....	7
2.2	Anturit ja mittaaminen.....	12
2.2.1	Pyörimisnopeusanturi	12
2.2.2	Lämpötila-anturit	15
2.2.3	Paineanturit.....	15
2.2.4	Kaasuläpän asentoanturi	16
2.3	Moottorin ohjaukset	16
2.4	Turboahdaminen ja ahtopaineen säätö magneettiventtiilillä	20
2.5	Moottorinrakenne ja voimansiirto.....	24
2.6	Ruiskusuuttimet ja polttoaineen syöttö	28
2.7	Tyhjäkäyntiventtiili	30
2.8	Sytytyksen ohjaus	31
2.9	Polttoaineen ominaisuudet.....	36
3	TUTKIMUSONGELMAT	39
3.1	Moottorin parametrien etsiminen.....	39
3.2	Ilman ja polttoaineen suhdesäätö	39
3.3	Moottorin kompensointien viritys.....	44
3.4	Moottorin tehon arviointi	48
4	TUTKIMUSMENETELMÄT	50
4.1	Moottorin tehon arviointi	50
4.2	Seossuhteen vaikutus.....	51
4.3	Sytytyksen ajoituksen vaikutus.....	52
4.4	Moottorin käyttäytyminen muutostilassa	61
4.4.1	Lisärikastukset AE ja EAE.....	64
4.4.2	Dynaaminen ruiskutusmalli EAE	67
5	MOOTTORIOHJAUKSEN VIRITYS.....	70
5.1	TechEdge laajakaistalambda -ohjain.....	70
5.2	MS2 -ohjaimen ohjelmistopäivitys	74
5.3	Moottoriohjaimen anturien kalibrointi	75
5.4	Moottorijarrutus	77
5.5	Kiihdytystestit ja tehon arviointi.....	78
6	TULOKSET JA POHDINTA	82
	LÄHTEET	84
	LIITTEET.....	86

LYHENTEET JA TERMIT

AE	Acceleration Enrichment. Summaava kiihdytysrikastus.
AFR	Air/Fuel Ratio. Ilman ja polttoaineen seossuhde.
ASE	After Start Enrichment. Käynnistyksen jälkeinen rikastus.
CAN	Controller Area Network. Väylätekniikka tiedonsiirtoon.
CLT	Coolant Temperature. Jäähdytysnesteen lämpötila.
EAE	Enhanced Acceleration Enrichment. Kertova kiihdytysrikastus.
Firmware	Laitteen sisäinen käyttöjärjestelmä.
GND	Ground. Elektroniikassa jännitetaso johon verrataan.
Hall-anturi	Hall-ilmiöön perustuva aktiivinen anturi, jota käytetään moottorin asentokulman tunnistukseen.
Lambda-anturi	Pakokaasun jäännöshappea mittaava anturi.
LED	Light Emitting Diode. Valodiodi.
MAP	Manifold Absolute Pressure. Imusarjan absolutized paine.
MAT	Manifold Air Temperature. Imusarjan ilmanlämpötila.
MS	MegaSquirt.
PW	Pulse Width. Pulssinleveys.
PWM	Pulse Width Modulation. Modulointitapa jossa ohjaus on pulssinleveyssuhde.
RPM	Revolutions Per Minute. Kierrosnopeuden yksikkö [1/min].
Stoikiometria	Kemian reaktioiden tasapainotuksessa käytettävä laskenta.
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu.
TPS	Throttle Position Sensor. Kaasuläpän asentoanturi.
V _{DC}	Jännite tasavirralla.

1 JOHDANTO

Tavoitteena oli tutkia polttomoottorin sytytyksen ja polttoaineen ruiskutuksen ohjausjärjestelmää. Moottorinohjaimen säätäminen tapahtui ohjelmalla *TunerStudio MS*. Tällä kerätään myös mittausdataa tiedostoihin, joita voidaan myöhemmin tarkastella ohjelmassa *MegaLogViewer*. Polttomoottorille muodostetaan teoreettisten arvojen mukaan ohjaustaulukot ja näitä tarkennetaan mittaustietojen perusteella. Muita tutkimuskohteita ovat kompensointiparametrien vaikutusten tutkiminen ja säätöpiirien viritys.

Työn päätavoitteena oli selvittää, kuinka MegaSquirt2 -moottorinohjausjärjestelmälle viritetään säätötaulukot ja erilaisten kompensatioiden vaikutus. Testialustana toimii vuoden 1986 Saab 900, jossa on Saabin kahden litran B201 moottori ja turboahtimena toimii Garrett TBO321. Autossa on ollut aikaisemmin MegaSquirt 1 V2.2 piirilevyllä. Suorittimeksi vaihtui MegaSquirt 2 ja ahtopaineen ohjaus lisättiin, jolloin ahtopainetta voidaan säätää magneettiventtiilin avulla. Myös piirilevy vaihtui V3.0 versioon ja samalla johtosarja uusittiin.

Polttoaineen palamisprosessiin sylinterissä vaikuttaa ilman ja polttoaineen seossuhde, imusarjan paine, sytytyksen ajoitus, moottorin geometria, puristussuhde, kierrosnopeus, ja lämpötilat. Ilman ja polttoaineen suhde on vaikuttaa pakokaasujen syntymiseen sekä niiden laatuun. Sytytyksen ajoitus vaikuttaa palamisessa vapautuvan energian hyötysuhteeseen. Imusarjan paine vaikuttaa moottorin vääntömomenttiin. Nakutusilmiöön vaikuttavat palotilan paine, seossuhde, lämpötila sekä kipinän ajoitus. Lopuksi työssä tarkastellaan moottorin tehon mittausta GPS mittauksen perusteella.

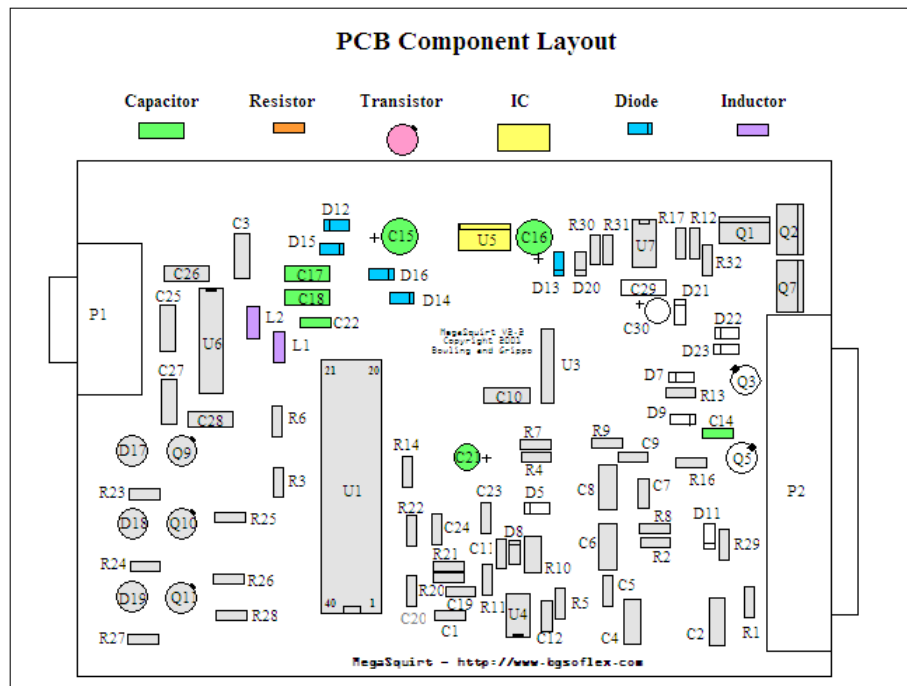
2 TEOREETTISET LÄHTÖKOHDAT

2.1 MegaSquirt moottorinohjain

Polttomoottorin ohjaaminen elektronisesti tapahtuu moottorinohjaimella. Tässä työssä tarkastellaan MegaSquirt2 -moottorinohjainta, joka on yksi monista jälkiasennettavista järjestelmistä. Polttoaineen syöttö tapahtuu suuttimilla ja moottorin antureiden avulla moottorinohjain laskee ohjauksen suuttimille. Moottorinohjaimelle määritetään laskentaan vaikuttavat vakiot ja antureiden kalibrointi-arvot. Moottorinohjain voi lisäksi säätää sytytystä, tyhjäkäyntiä ja turboahtimen ahtopainetta. Polttoaineen hienosäätöön käytetään Lambda-anturin takaisinkytkentää. Sytytyksen ajoitus vaikuttaa moottorin tuottamaan tehoon. Sytytyksen optimointi vaatii moottorin nakutuksen tarkkailua. Tyhjäkäynnillä virtauksen hienosäätöön käytetään kaasuläpän rinnalla tyhjäkäyntiventtiiliä. Ahtopaineen ohjaamiseen käytetään magneettiventtiiliä. Ajoneuvokäytössä häiriöitä aiheuttavat värinä, laaja käyttölämpötila-alue. Sähköjärjestelmään häiriöitä syntyy staattisesta sähköstä, kuormitusmuutoksista sekä johdotuksiin indusoituvista virroista.

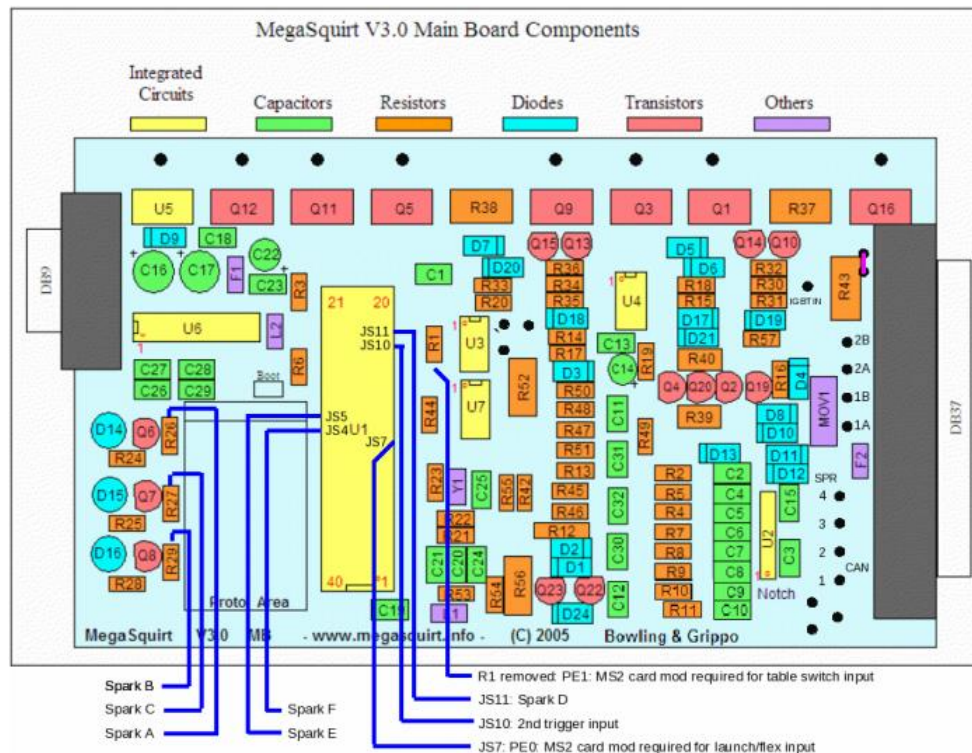
MegaSquirt moottorinohjaimet ovat ottomoottoreille suunniteltuja jälkiasennettavia ohjaimia. Näillä voidaan toteuttaa moottorinohjausjärjestelmä. Bruce Bowling ja Al Grippo ovat kehittäneet alkuperäisen järjestelmän. Järjestelmä koostuu piirilevystä ja suorittimesta. Piirilevyn versioita ovat V2.2, V3.0 ja V3.57. MegaSquirt suorittimia ovat MS1, MS2 ja MS3. Vanhin suoritin on ensimmäisenä ja jälkimmäiset koostuvat piirilevyistä, joissa on suorittimen lisäksi apupiirejä. Suorittimen valinta vaikuttaa tarjolla oleviin firmware vaihtoehtoihin ja ohjaimen suorituskykyyn. Firmware on suorittimen käyttöjärjestelmä. Suorittimen muistissa on käyttöjärjestelmän lisäksi kalibrointi- ja säätöasetukset.

V2.2 on vihreä kaksipuolinen piirilevy, jota on valmistettu vuodesta 2002 lähtien. Kuviossa 1 on esitetty komponenttien sijainti piirilevyllä. Mukana on myös ylimääräisiä komponentteja, eikä kaikkia komponentteja tarvita. Komponenttien tarve määräytyy sen perusteella mitä toimintoja halutaan kytkeä. Alkuperäinen 73 kohdan kokoamisohje löytyy sivustoilta <http://bgsoflex.com/v22/assem.html>, mutta uusimmat ohjeet ja piirikaaviot löytyvät osoitteesta <http://www.msextra.com/manuals/>. Piirikaavioista näkee komponenttien toiminnalliset suhteet. V2.2 levy on kuitenkin käytännössä vanhentunut.



Kuvio 1. Komponenttien sijoittelu piirilevyllä V2.2 (www.megamanual.com)

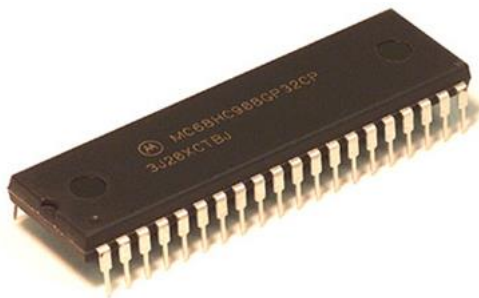
V3.0 on sininen nelikerros piirilevy, jonka suunnittelussa on pyritty vähentämään sähköisiä häiriöitä. V3.0 piirilevyn osien ja sytytyslähtöjen sijainti näkyy kuviossa 2. Levyllä on "Proto Area", joka mahdollistaa pienet lisäytkennät. Pisteiden PE0 ja PE1 käyttö vaatii muutoksia myös MS2 suorittimen piirilevyyn.



Kuvio 2. Komponenttien sijoittelu piirilevyllä V3.0 (www.msextra.com)

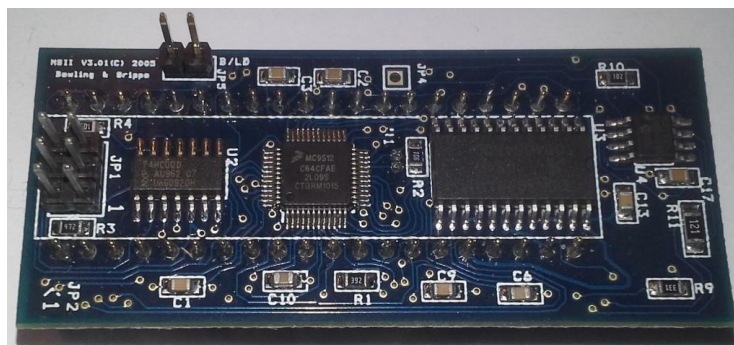
V2.2 ja V3.0 piirilevyillä on yhteisiä piirteitä, mutta suurin osa komponenteista on vaihtunut tai uudelleen nimetty. V3.57 piirilevy on valmiiksi pintaliitoskomponenteilla koottu. MegaSquirt käyttää RS232-sarjaporttia ohjelmointiin ja tiedonsiirtoon. P1 on DB9-liitin sarjaportille. P2 on DB37-liitin sähköjen kytkemiseksi ajoneuvossa. V3.0 tai V3.57 levyn käyttö MS2 suorittimen kanssa on suositeltavaa, koska käyttöohjeet on tehty uudemmille levyille.

Kuvassa 1 on 68HC908GB32 piiri, joka on 8 MHz 8-bittinen MS-1 suoritin. Suorittimessa on flash -muistia 32 kilotavua ja RAM-muistia 512 tavua. Bowling ja Grippo kehittivät alkuperäisen järjestelmän, jolla pystyy ohjaamaan kahta suutinpankkia. Suuttimien ohjauksen resoluutio on 100 μ s. Suoritin sisältää 8-bittisen muuntimen analogi mittauksille. Jatkokehityksenä ohjelmistoon on MS1extra, jolla pystyy ohjaamaan myös sytytystä ja muutamaa digitaalista ohjausta.



Kuva 1. MS-1 suoritin (www.megamanual.com)

Kuvassa 2 on suoritinkortti MSII V3.01, jossa vasemmalta oikealle näkyy piirit: MM74HC00, MC9S12C64, UDN2916LB ja MCP2551. MC9S12C64 on MS2 -suoritin, joka on 24 MHz 16-bittinen. Suorittimessa on flash muistia 64 kilotavua ja RAM muistia 4 kilotavua. Piirin MCP2551 avulla saadaan CAN -väylän ominaisuudet ja tämä toteuttaa ISO-11898 standardin fyysisen rajapinnan.



Askelmoottorinohjainpiiri UDN2916LB tuottaa lähdöt: IAC1A, IAC1B, IAC2A ja IAC2B. V3.0 levyllä pitää lisätä hyppyjohto välille S12C ja JS9, jotta ohjaimen lähdöt toimivat. UDN2916LB piirin sisäinen PWM -virranrajoitus kytkeytyy päälle, kun kuormavirta ylittää 500 mA virtarajan. Lisäksi sisäinen yllämpösuoja sammuttaa ohjaukset, jos lämpötila ylittää 170 °C ja ohjaus palautuu lämpötilan laskettua alle 145 °C.

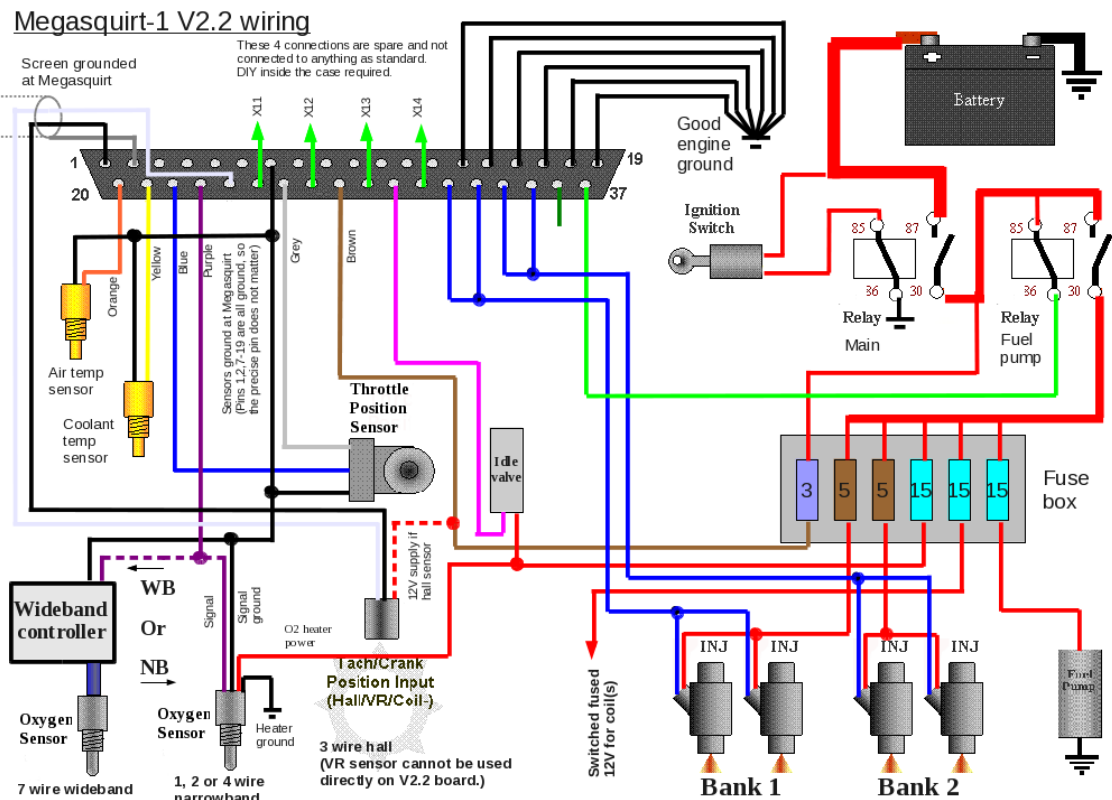
MS1 käytti 0,1 ms välein tapahtuvia ajastinkeskeytyksiä ruiskutuksen hallintaan. Suuttimen ohjauspulssin MS2 muodostaa 16-bittisellä ajastimella, jonka tarkkuus on 0,001 ms. Suuttimien PWM -virranrajoitus käyttää noin 17 kHz taajuutta. MS2 yhdistää piirillä MM74HC00 suuttimen ohjauspulssin ja PWM -virranrajoitus signaalit.

V2.2 piirilevyn ulkoiset kytkennät näkyvät kuviossa 3. Ohjain ja johdotus yhdistetään DB37-liittimellä. Virransyöttö järjestetään releiden ja sulakkeiden kautta. Releet ovat tyypillisesti 12 V_{DC} releitä. Sytytysvirran rele ”Main” kytkee päälle moottorinohjaimen. Tämä rele saa ohjauksen virta-avaimelta, kun virta-avain on käynnistys ja käy asennoisissa. Polttoainepumppu ja siihen liitetyt sulakelähdöt kytketään päälle releellä ”Fuel Pump”. V2.2 piirilevyllä maadoitus on DB37-liittimen navoissa 1–19.

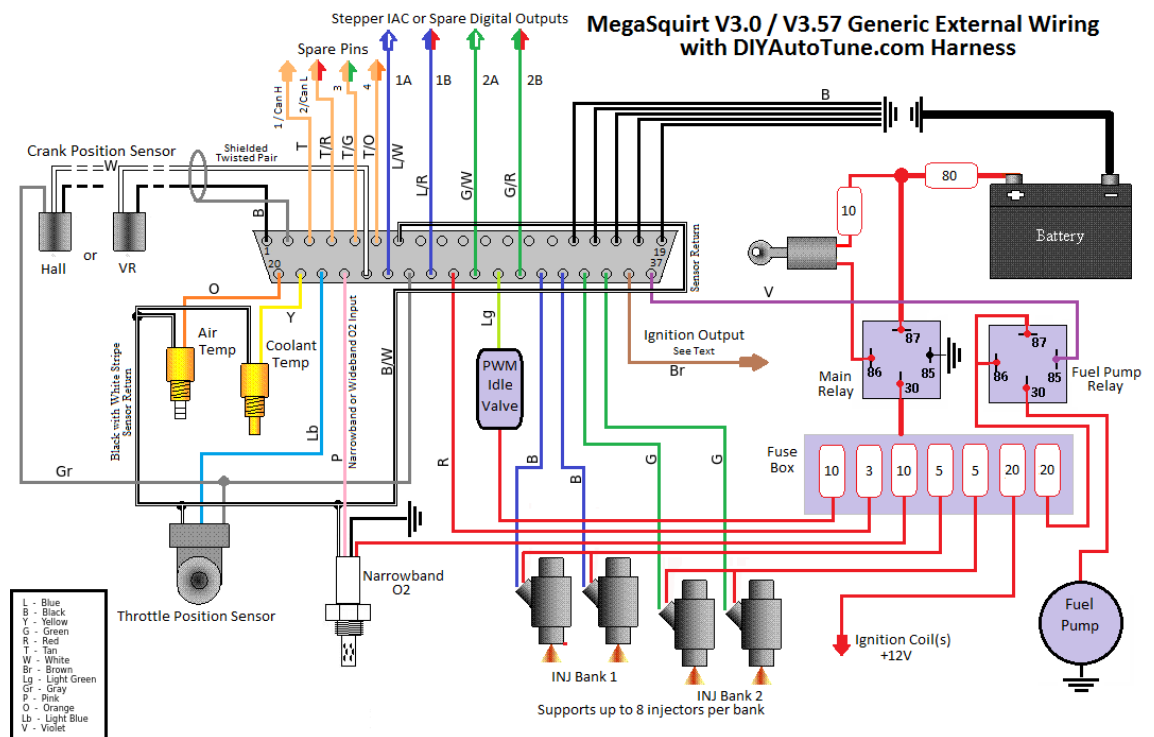
Uusimmat MS2 järjestelmän ohjeet käyttävät V3.0 tai V3.57 piirilevyn nimeämistä. *DIYAutoTune.com* toimittajan kuvan 3 johtosarjan värikoodaus ja johdotusohje nähdään kuviossa 4. Johtimien merkintä helpottaa asennusta. V3.0 tai V3.57 piirilevyä käytettäessä pinnit 3–6 ovat uusia liitospisteitä. Sulakkeille virta syötetään pääreleen kautta ja polttoainepumpulla on oma rele. Kuvan 3 johtosarjan johtimet ovat tyyppiä 20 AWG TXL, jolle löytyy tarkemmat tiedot standardista SAE J-1128. Johtimet ovat valmiiksi puristettuna DB37 -liittimen pinneihin ja moottoritilaan ne tuodaan suojaputkessa. Johtimet ovat kokoa 20 AWG = 0,518 mm².



Kuva 3. MegaSquirt johtosarja (DIYAutoTune.com)



Kuvio 3. Ulkoiset liitännät MS1 V2.2 piirilevyllä (www.msextra.com)



Kuvio 4. Ulkoiset liitännät MS2 V3.0 piirilevyllä (www.diyautotune.com)

2.2 Anturit ja mittaaminen

MegaSquirt mittaa moottorin toimintatilaa antureilla ja ehkä tärkein mitattava tieto on kierrosnopeus, koska ruiskutuksen ja sytytyksen ohjaukset tapahtuvat tahdistettuna tähän signaaliin. Jännite ja paineet mitataan ohjaimen sisäisillä antureilla. Ulkoiset mitaukset tuottavat jännitteen suhteessa referenssijännitteeseen. Lämpötilan mittauksessa jännite saadaan referenssivastuksen ja termistorivastuksen jännitejaon avulla. Paine vaihtelee jakson aikana, joten paineen mittauksessa käytetään jakson keskiarvoa.

MS2 sisältää 10-bittisen muuntimen kahdeksalle analogimittaukselle. 10-bittisessä muuntimessa viiden voltin käyttöjännite jaetaan 1024 osaan. Tällöin mittauksen erottelukyvyksi saadaan $5 V / (2^{10} - 1) \approx 5 mV$. Analogisignaalit suodatetaan piirilevyn alipäästösuodattimilla, jolloin korkeataajuisia sähköisiä häiriöitä voidaan vähentää. Pyörimisnopeusanturin ja kehäpyörän avulla saadaan liipaisu ajoituksille.

2.2.1 Pyörimisnopeusanturi

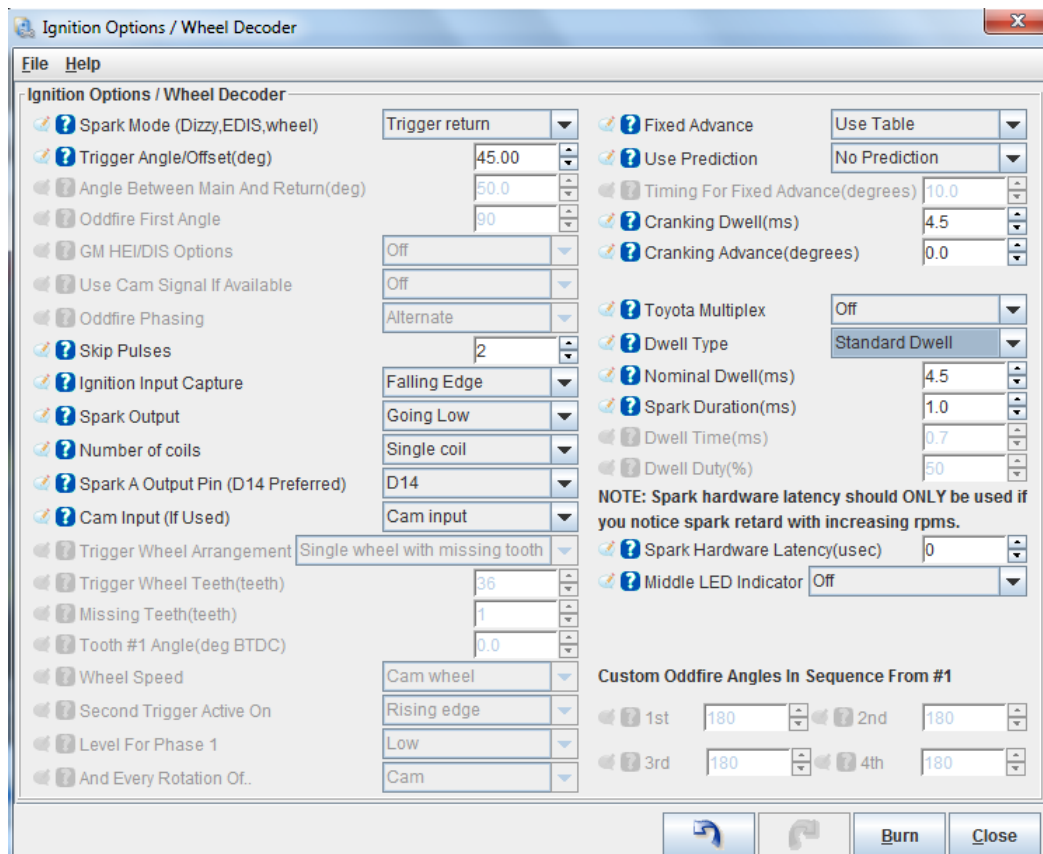
Pyörimisnopeusanturina voidaan käyttää VR- tai Hall-anturilla. VR-anturi tunnistaa magneettikentän muutoksen ja signaali on vaihtosähköä. Työssä käytetään Hall-anturia, joka tunnistaa magneettikentän. Kehäpyörässä on aukkoja ja aukon kohdalla anturi havaitsee magneetin. Havaitessaan magneetin anturin signaalilähtö vedetään maadoitukseen. Kehäpyörän ollessa magneetin ja anturin välissä signaali kelluu. Tarvittaessa signaalille lisätään ylösvetovastus. Käytettäessä liitteen 1 kytkentää ylös vetoa ei tarvita. Syöttöjännite $+5 V_{DC}$ saadaan TPS-anturin syötöstä kuvion 4 mukaisesti.

Moottorinohjain laskee kierrosnopeuden ajasta, joka kuluu liipaisujen välillä. Liipaisu tapahtuu nokka-akselilla olevan kehäpyörän aukkojen reunasta. Liipaisu tapahtuu joko nousevalla tai laskevalla reunalla. Liipaisun ajoitusta käytetään ruiskutuksen ja kipinän ajoitukseen. Moottorin nokka-akseli määrittää venttiilien ajoituksen. Nokka-akseli pyörä jakoketjun välityksellä ja kierrosnopeus on puolet kampiakselin nopeudesta. Nokka-akselin ajoitusta ei ole syytä muuttaa tehdasasetuksesta, jotta venttiilien ajoitus ei muutu. Sytytyksen perusajoitusta muutetaan kääntämällä virranjakajaa, jolloin liipaisukohta siirtyy.

Moottorinohjaimelle määritetään, onko kyseessä kampi- vai nokka-akselin anturi, sekä millaista pulssijonoa anturilla luetaan. Hall-anturille määritin kuvion 6 mukaiset asetukset. ”Spark Mode” asetuksesta löytyy yli 30 erilaista vaihtoehtoa. Hall-anturin ja symmetrisen kehäpyörän kanssa sopivia moodeja ovat: ”Basic trigger” ja ”Trigger return”. ”Trigger Angle” tulee asettaa samaksi kuin fyysinen liipaisukulman asento. Liipaisukulman tulee olla 0–19 tai 50–80 ennen yläkuoloa, jotta sytytyksen ajoitus toimii parhaalla tavalla. Tarkistus tehdään ajoituslampulla. ”Trigger return” moodi valitsee ratkaisun, jossa nousevaa tai laskevaa reunaa käytetään ajoituksessa ja käynnistyksessä toista reunaa. ”Ignition Input Capture” määrittää liipaisun nousevaksi vai laskevaksi. ”Spark Output” määrittää kipinän ohjauspulssin ylöspäin tai alaspäin.

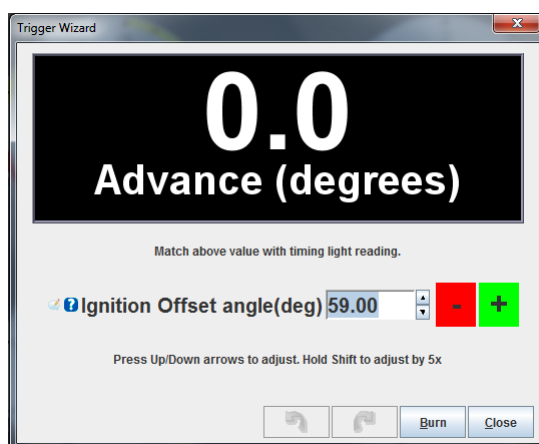
Sytytysasetuksissa ”Fixed Advance” vaihtoehtoina ovat joko ”Use Table” tai ”Fixed Timing”. Jälkimmäistä käytetään, kun ajoituksen ei haluta muuttuvan kuormituksen mukaan. Liipaisukulmalla 45 astetta ajoituksessa oli havaittavissa epämääräisyyttä. Ennakko muuttuu virranjakajaa kääntämällä. ”Trigger return” moodissa tämä vaikuttaa myös käynnistyksessä käytettävään ajoitukseen. Ajoituksen tarkistamiseen käytetään ”Fixed Timing” -asetusta, jolloin ennakko pysyy vakiona. Ennakko asetetaan kohdassa ”Timing For Fixed Advance”. Uudeksi liipaisukulmaksi löytyi 59 asetetta.

Käynnistysmoottori ottaa suuren virran kylmää moottoria käynnistettäessä ja sisäinen resistanssi aiheuttaa akkujännitteen vajoamisen. Akkujännite vaikuttaa induktiivisissa kuormissa virran kasvunopeuteen. ”Skip Pulses” kohdassa suositus on 3, jotta moottori saadaan kunnolla pyörimisliikkeeseen. Symmetrisellä kehäpyörällä kipinäpulssi ohjataan virranjakajan avulla oikealle sytytystulpalle.



Kuvio 6. Liipaisukulman tunnistuksen asetukset ovat vasemmalla ja sytytyksen oikealla.

Liipaisukulma aseteltiin kuvion 7 ”Trigger Wizard” ikkunassa. Tarkistus tapahtuu ajoituslampun avulla, joka tuottaa valonvälähdyksen sytytyskipinän hetkellä. Ajoituslampu ottaa induktiivisesti signaalin sytytystulpan yksi johdosta. Valo suunnataan ajoitusmerkkeihin, jotka sijaitsevat vauhtipyörällä. Ennakolla 20 astetta ja kierrosnopeudella 2000 RPM etsittiin liipaisukulma. Ajoituslampulla ennakko näytti samaa, kun liipaisukulmaksi asetti 59 astetta. ”Use Table” asetuksella ennakko seuraa sytytystaulukossa määriteltä kuormituksen mukaista karttaa.



Kuvio 7. Liipaisukulman määrittäminen

2.2.2 Lämpötila-anturit

Jäähdytysnesteen (CLT) ja imuilman (MAT) lämpötilaa mitataan NTC -termistoreilla. Näiden resistanssi pienenee lämpötilan kasvaessa. MS2-järjestelmälle kalibrointi tapahtuu mittaamalla termistorien resistanssit kolmessa eri lämpötilassa. Kolmen kalibrointipisteen avulla sovitetään yhtälön 3 mukainen *Steinhart-Hart* lämpötilariippuvuusmalli.

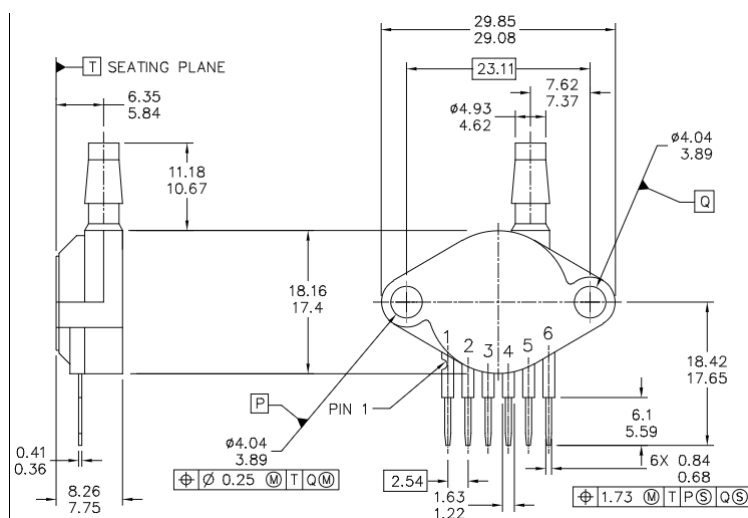
$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3 \quad (3)$$

, missä:

- T on lämpötila [°K]
- R on termistorin resistanssi [Ω]
- A, B, C ovat mallin kertoimet

2.2.3 Paineanturit

Imusarjanpainetta mitataan paineanturilla, joka sijaitsee ohjaimen piirilevyllä. Anturi liitetään pneumatiikkaputkella imusarjaan. Kalibroinnissa paineanturi valitaan listalta, josta anturille löytyy valmiit arvot. Kuvion 8 paineanturi kuuluu yleensä piirilevyn mukana tuleviin komponentteihin. Paineanturi MPX4250AP mittaa datalehden perusteella absoluuttista painetta väliltä 20–250 kPa. Pinnissä 1 on lovi ja tästä saadaan ulostulojännite. Ohjaimesta 0 V kytketään pinniin 2 ja käyttöjännite +5 V_{DC} kytketään pinniin 3.



Kuvio 8. MPX4250AP absoluuttipaine-anturi (<http://www.npx.com>)

Ilmanpaineeseen vaikuttaa sää ja korkeus suhteessa merenpintaan ja tämä huomioidaan barometrin avulla mittaamalla ulkoilman painetta. Barometri mitataan yleensä käyttämällä ensimmäistä MAP anturin mittausta, kun ohjain kytketään päälle. Ohjaimen sammuminen kesken ajon aiheuttaa suuren virheen barometriin. Erillisellä anturilla barometri arvo päivittyy jatkuvasti ja ohjaimen sammuminen kesken ajon ei haittaa. Barometrin tulee olla samantyyppinen kuin MAP, koska kalibrointi tehdään vain yhdelle anturityypille. Anturi tarvitsee käyttöjännitteen ja ulostulon kytketään alipäästösuodatuksen kautta analogiamittausporttiin. Datalehti ilmoittaa anturille MPX4250AP maksimivirheeksi 1,5 % eli $\pm 3,45$ kPa lämpötilassa 0–80 °C. 10-bittinen AD-muunnin mahdollistaa noin 0,1 % erottelutarkkuuden.

2.2.4 Kaasuläpän asentoanturi

Kaasuläpän asento muunnetaan potentiometrin avulla jännitteeksi. Anturi on kolmenapainen. Anturiin kytketään käyttöjännite +5 V_{DC} liittimen DB37 pinnistä 27 ja 0 V pinnistä 7. Potentiometrin asentotieto saadaan jännitteinä pinniin 22. Kalibroinnissa asetetaan anturin minimi ja maksimi, jotka skaalataan moottorinohjaimessa asteikolle 0–100 %.

2.3 Moottorin ohjaukset

Polttomoottori tarvitsee useita järjestelmiä toimiakseen. Jäähdytys, voitelu ja akkujännitteen lataus toimivat itsenäisesti, mutta jäähdytyspuhallinta ja magneettiventtiileitä on mahdollista ohjata myös MS2-ohjaimen kautta. Tärkeimpiä MS2-ohjaimen toimintoja ovat polttoaineensyöttö ja sytytyksen ajoitus. Nämä tahdistetaan moottorin kierrosnopeusanturin signaaliin.

Pulssinleveysmoduloituja ohjauksia käytetään tyhjäkäyntiventtiilin ja ahtopaineen säätöön ilman tahdistusta moottorin käyntinopeuteen. V3.0 piirilevyllä pulssinleveysmoduloina lähtöinä voidaan käyttää seuraavia: *IAC1*, *IAC2*, *JS11* sekä *Fidle*. Lähdöt *IAC1* ja *IAC2* ovat vapaina, kun ei käytetä askelmoottoriohjausta tyhjäkäyntiventtiilille.

Tyhjäkäyntiventtiilin ja ahtopaineen säätö on jatkuvia prosesseja, joita ohjataan valitulla taajuudella pulssinleveyssuhdetta muuttamalla. Säätoventtiilien asentoa säädetään pulssinleveysmoduloidulla signaalilla. Matalalla taajuudella venttiili on auki ja kiinni pulssin mukaan. Ohjaustaajuutta kasvatettaessa venttiilin dynamiikka rajoittaa liikenopeutta ja venttiilin jää välitilaan. Ahtopaineen säätöön MS2 tarjoaa seitsemän ohjaustaajuusvaihtoehtoa.

Kuvassa 4 näkyy moottoritila ja joidenkin osien sijainti moottoriin nähden. Vasemmalla kuvassa on auton keula, jossa sijaitsevat jäähdytyskenno ja kaksi jäähdytyspuhallinta. Näiden päällä kuvassa näkyy magneettiventtiili ja sytytyspuola. Sytytyspuolasta lähtee korkeajännitejohto virranjakajalle. Virranjakajalta lähtee johdot sytytystulpille. Starttimoottori ja nakutusanturi sijaitsevat imusarjan alapuolella. Ruiskusuuttimet ovat imusarjassa lähellä moottorin kantta. Suuttimilla on yhteinen polttoaineputki, jonka vasemmassa päässä on paineensäätöventtiili.

Kampikammioon muodostuu painetta, koska männänrenkaat eivät voi olla täysin tiiviit. Venttiilikoneiston kautta kampikammion huohotusilma johdetaan imusarjaan, koska ohivuotokaasut ovat myrkyllisiä, eikä niitä saa päästää käsittelemättömänä ulkoilmaan. Imusarjan ja venttiilikoneiston välinen venttiili rajoittaa virtausta.



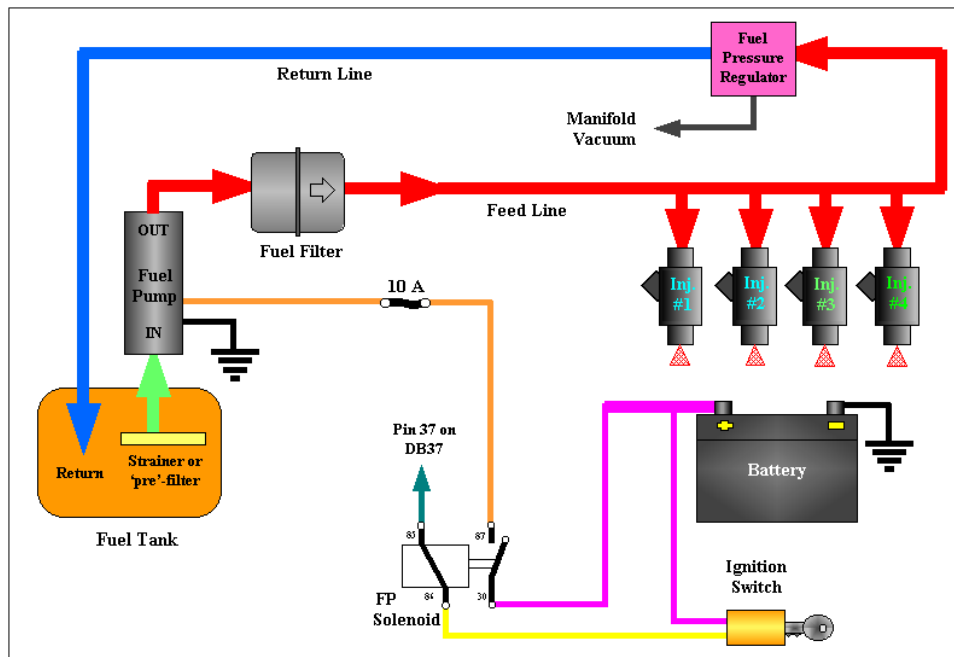
Kuva 6. Moottoritila näkyy ylhäältä kuvattuna.

Imusarja on kiinni kannessa ja imusarjassa on paikat suuttimille. Imusarjan painetta mitataan paineanturilla ja kaasuläpällä rajoitetaan imusarjaan virtaavaa ilmaa. Kaasuläpän asentoa mitataan potentiometrin avulla. Imuilman lämpötilaa mitataan ahtoputkistosta ennen kaasuläppää välijäähdyttimen jälkeen. Anturin avoin rakenne nopeuttaa mitausta kaasuilla ja se soveltuu paremmin ilmanlämpötilan mittaukseen. Jäähdytysnestelle taas käytetään suljettua anturia, joka sijaitsee termostaattikotelossa.

Polttoaineensyöttöjärjestelmän tehtävä on laskea moottoriin virtaavan imuilman määrä ja ohjata suuttimia ruiskuttamaan haluttu määrä polttoainetta imuilman sekaan. Ilman ja polttoaineen toteutunutta seossuhdetta tarkkaillaan pakokaasuista Lambda-anturilla. Seoksen tavoitearvot määritellään taulukossa kuormituksen ja kierrosnopeuden suhteen. Takaisinkytketty piiri muodostuu tavoitetaulukon ja Lambda-anturin avulla. Takaisinkytkentä on suhdesäätö, jossa PID -säätimen ulostulo on korjauskerroin ja tämä esiintyy MS2 -ohjaimessa nimellä EGO. Korjauskerroin 100 % on säätöalgoritmin lähtötaso ja tätä käytetään, kun algoritmin aktivoitumisehdot eivät täyty.

Jäähdytysjärjestelmän oikea toiminta on tärkeää, koska vajaatoiminta johtaa ylikuumenemiseen ja moottorivaurioon. Jäähdytysjärjestelmässä jäähdytysneste kiertää moottorissa ja virtaukseen vaikuttaa moottorin kierrosnopeus, koska jäähdytysnestepumppu pyörii hihnavälityksellä. Termostaatti vaikuttaa jäähdytysnesteen kiertoreittiin. Moottorin ollessa kylmä termostaatti ohjaa virtauksen pieneen kiertoon, jolloin moottori lämpenee nopeammin. Moottorin lämmettyä yli toimintalämpötilan termostaatti avautuu ja ohjaa nesteen kiertämään jäähdytyskennon kautta, kunnes lämpötila laskee alle termostaatin sulkeutumisrajan. Auton liikkuessa ilmanvirtaus jäähdyttää jäähdytyskennoa. Jäähdyttimen tuuletin käynnistyy, kun jäähdyttimen lämpötila nousee siinä kiinni olevan termostaattikytkimen asetusarvon yli. Tuuletin pysähtyy, kun lämpötila laskee termostaatin hystereesin verran kytketymispistettä alemmas.

Polttoainejärjestelmä on yksikertaisimmillaan kuvion 9 mukainen, missä paineensäätimen tavoitteena on pitää paine-ero suuttimien yli vakiona. Suuttimen paine-ero vaikuttaa suuttimen virtausarvoon. Paineensäädin saa vertailupaineen imusarjasta ja imusarjan paineen kasvaessa, myös polttoaineen paine kasvaa. Imusarjan paineen laskiessa paineensäädin avaa paluureitin ja laskee polttoaineen painetta. Polttoainepumppua ohjataan releen avulla. Rele sammutetaan, jos kierrosnopeustietoa ei saada muutamaa sekuntiin.



Kuvio 9. Polttoainejärjestelmä (<http://www.megamanual.com>)

Venttiilien ajoitus ja koko vaikuttavat moottorin virtaukseen, mutta ne eivät vaikuta suoraan moottorinohjaimen arvoihin. Venttiilien ajoitus eri moottorityypeillä nähdään taulukosta 1. Ajoitus tapahtuu mekaanisesti nokka-akselilla. Työssä käytetyn tyyppinä oli B201 Turbo APC, jossa on vain yksi nokka-akseli.

TAULUKKO 1. Venttiilien ajoitus asteina

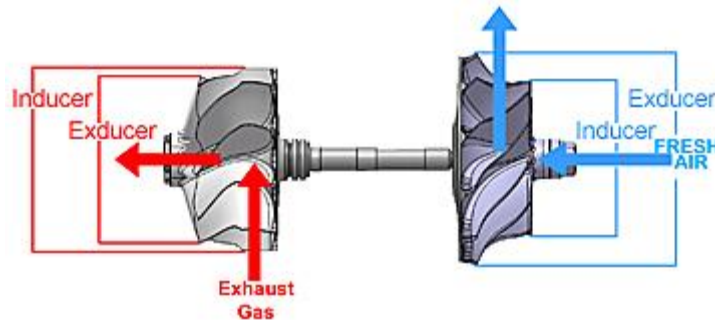
Moottorityyppi	Imu		Pako	
	Avautuu	Sulkeutuu	Avautuu	Sulkeutuu
	(eykk)	(jakk)	(eakk)	(jykk)
B201 kaasutin, 1981-	10	54	46	18
B201i, 1981-	10	54	46	18
B202i, 1986-	16	44	61	13
B212i, 1991-	16	44	61	13
B201 Turbo, -1982	12	40	62	2
B201 Turbo APC, 1981-	10	54	46	18
B202 Turbo, -1985	16	56	56	10
B202 Turbo, 1986-	16	56	61	13

Taulukon 1 perusteella imuventtiili on auki $10+180+54=244$ astetta. Vastaavasti pakoven-
venttiili on auki $46+180+18=244$ astetta. Venttiilien ajoitus vaikuttaa moottorin VE
arvoihin. Imuventtiilin aukeaminen alkaa hieman ennen kuin mäntä on yläkuolokohdas-
sa, jotta se olisi kunnolla auki imutahdin alkaessa. Imuventtiilin sulkeutumishetki vai-
kuttaa dynaamiseen puristussuhteeseen, joka on pienempi kuin staattinen puristussuhde.
Pakoven-venttiilin aukeaminen alkaa, kun mäntä lähestyy työtahdin lopussa alakuolokohtaa.

2.4 Turbohtaminen ja ahtopaineen säätö magneettiventtiilillä

Turbohtimen avulla tuotetaan paineistettua ilmaa ahtoputkistoon, jolloin moottoriin voidaan syöttää enemmän ilmaa. Tällöin voidaan polttaa enemmän polttoainetta ja vapautetaan enemmän kemiallista energiaa. Turboahdin on yleensä heti pakosarjan jälkeen, jotta kuumien pakokaasujen energia saadaan hyödynnettyä. Pakokaasut pyörittävät turbiinia ja tämä pyörittää akselin kautta kompressorin, jolloin paine ahtoputkistossa kohoaa. Kuviossa 10 on turbohtimen virtauksien suunnat. Kompressorin imee ilmaa ilmansuodattimelta ja nostaa painetta ahtoputkistossa. Virratessaan turbiinille pakokaasut tekevät työtä ja pyörittävät turbiinipyörää. Vasemmalla on turbiini ja oikealla on kompressorin. Trim lasketaan kompressorisiiville yhtälön 5 mukaan. Siipien kokosuhteella vaikutetaan kompressorin hyötysuhteeseen sekä ilmamäärään, joka ahtimella voidaan tuottaa.

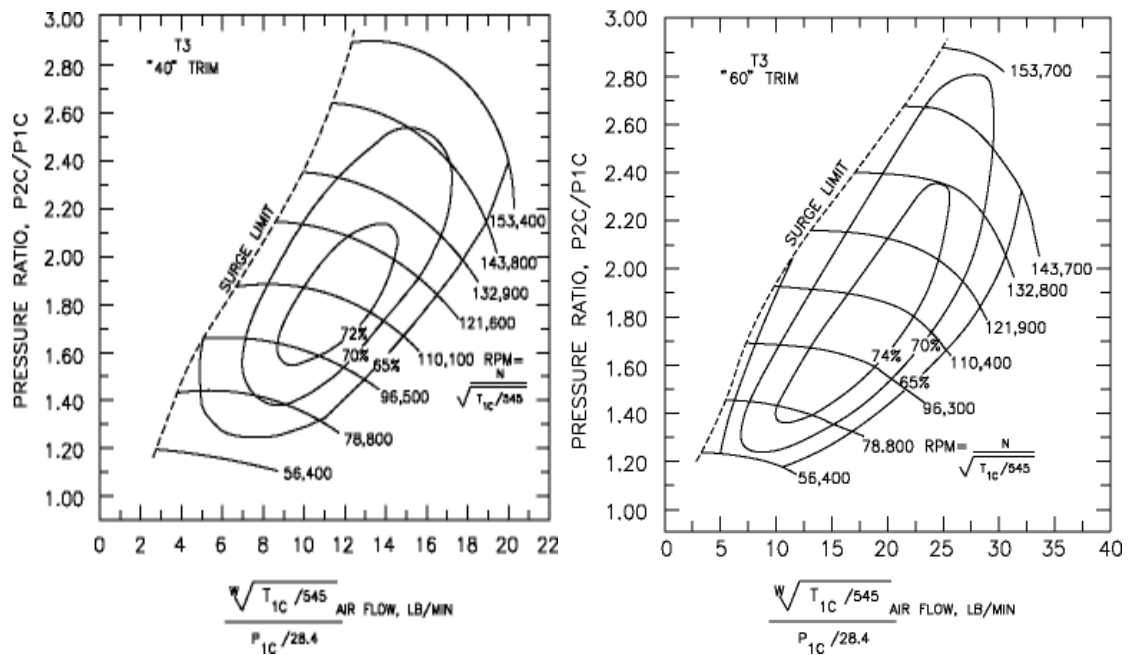
$$Trim = \left(\frac{Inducer^2}{Exducer^2} \right) * 100 \quad (5)$$



Kuvio 10. Turbohtimen siipipyörät (www.turbobygarrett.com)

Hukkaportin ollessa suljettuna, kaikki pakokaasu virtaa turbiinin kautta ja tämä pyörittää akselin kautta kompressorin. Kuvioista 11 nähdään, että turbohtimen kierrosnopeuden tulee olla korkea, jotta kompressorin voi kasvattaa painetta. Ahtimen kierrosnopeuden noustessa liikaa ahtimen hyötysuhde laskee. Pystyakselilla on painesuhde $P2C/P1C$. Vaaka-akselilla on massavirta, joka on normeerattu imuilman lämpötilassa $545\text{ }^{\circ}\text{R} \approx 29,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja absoluuttisessa paineessa $28,4\text{ inHg} \approx 96,2\text{ kPa}$. Kuviossa 11 turbohtimen eri kierrosnopeuksille on piirretty massavirran ja painesuhteen riippuvuuskaivat. Ahdinkarttaa rajoittaa vasemmalla puolella on sakkausraja, jossa ilmanvirtaus on liian pieni. Ahdinkartan oikealla puolella on tukehtumisraja ja täällä ahtimen kierrosnopeus on liian suuri. Paras hyötysuhde löytyy ahdinkartan keskivaiheilta.

Työssä käytetty turboahdin oli TB0321, jonka trim on 40. Ahtimen kierrosnopeutta rajoitetaan avaamalla hukkaporttia ja painetta säädetään magneettiventtiilin avulla. Ahtimen kierrosnopeuden jäädessä alhaiseksi, myös hyötysuhde jää alle 65 %. Magneettiventtiiliä ohjaamalla, painesuhdetta voidaan kasvattaa ja päästään paremmalle hyötysuhdealueelle. Trim arvolla 60 olevaa turboahdinta myydään päivityksenä. Erona on suurempi massavirta ja hieman parempi hyötysuhde. Moottorin ilmansaanti rajoittuu, kun ahdin ei kykene tuottamaan riittävää virtausta. Ahtimen kierrosnopeuden noustessa myös virtaus kasvaa. Kompressoripuolen vaihtaminen ei muuta painesuhdetta kovin paljon, mutta siirtää virtausalueen minimiä ja maksimia.

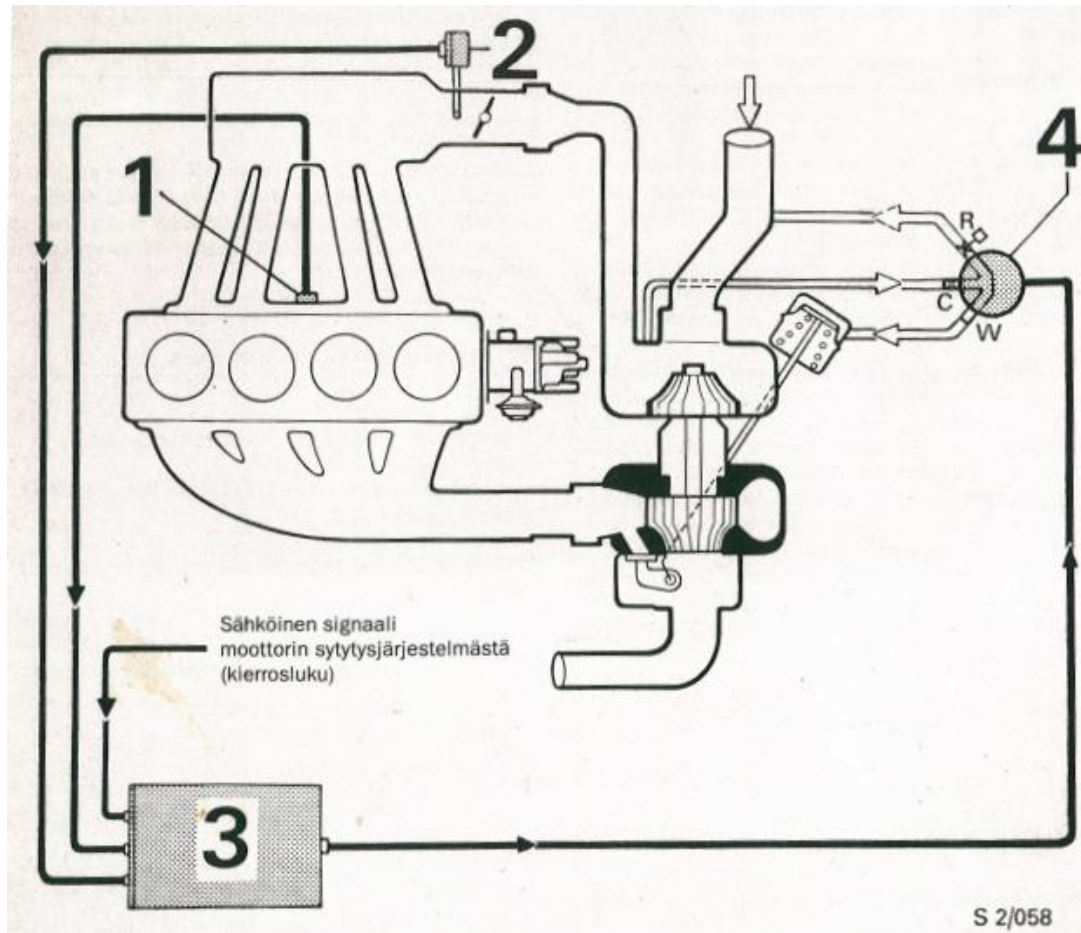


Kuvio 11. T3 turboahhtimen kompressorikartat (<http://turbocharged.com>)

Kaasuläpän nopea sulkeminen suurilla ahtopaineilla estää ilman virtauksen kaasuläpän kautta moottoriin. Kompressoripyörällä ja ilmanvirtauksella on inertiaa, joten ilman tuotto ahtoputkistoon jatkuu. Tästä seuraa nopeasti kohoava ahtoputkiston paine. Paineiskun rajoittamiseksi ahtoputkistoon on asennettu ohitusventtiili, joka aukeaa imusarjan alipaineella ja tarjoaa ahtopaineelle purkautumisreitit. Ohitusventtiili sulkeutuu, kun imusarjan paine kasvaa. Painetta saadaan nopeasti myös kaasuläpän uudelleen avauksen jälkeen, koska paine putkistossa ei hidasta ahdinta liikaa.

Kuvio 12 esittää Saabin APC järjestelmän, jonka tarkoitus on tunnistaa nakutus ja säätelee ahtopainetta. Ahtopaineen säätö tapahtuu magneettiventtiilillä. Ahtopaine asettuu korkeintaan peruspaineen tasolle, kun magneettiventtiiliä ei ohjata. Magneettiventtiilin

ohjaaminen alentaa toimielimen painetta, jolloin ahtopaineen pitää nousta suuremmaksi ennen kuin hukkaportti avautuu.



Kuvio 12. Saabin APC -järjestelmä, jossa 1=nakutusanturi, 2=paineanturi, 3=ohjain ja 4=magneettiventtiili (Saab 900 1979–93 korjausopas)

MS2 säätelee ahtopainetta kuviossa 12 esitetyllä magneettiventtiilillä. Oikein säädettyinä hukkaportilla pystytään lisäämään ahtopainetta, moottorin tehokkuutta ja kiihtyvyyttä. Tavoitepaineen asettaminen liian korkealle aiheuttaa nopean ylityksen, josta seuraa paineen laskeminen pidemmällä aikavälillä.

Turboahtimella moottorille voidaan siis tuoda ilmaa, jonka paine on normaalia ilmanpainetta suurempi. Ahtamisen yhteydessä ilma kuitenkin lämpenee ja välijäähdyttimen avulla ahdetun ilman lämpötilaa voidaan taas alentaa. Lämpötilan alentaminen kasvattaa ilmantiheyttä, jolloin moottorin täyttöaste ja teho nousevat. Välijäähdyttämisen muita tavoitteita on vähentää moottorin lämpökuormaa ja parantaa kestävyyttä. Välijäähdytin on lämmönvaihdin, jolle voidaan laskea tehokkuus yhtälön 6 avulla, kun tunnetaan ahdetun ilman lämpötila ennen ja jälkeen välijäähdytintä sekä ympäristön lämpötila.

$$IC_{eff} = \frac{T_{sisään} - T_{ulos}}{T_{sisään} - T_{ympäristö}} \quad (6)$$

Hyötysuhteeksi saadaan esitetyllä yhtälöllä $IC_{eff} = 63,7 \%$, kun oletetaan lämpötiloiksi seuraavat: $T_{ympäristö} = 9 \text{ °C}$, $T_{sisään} = 100 \text{ °C}$ ja $T_{ulos} = 42 \text{ °C}$. Välijäähdyttimestä lähtevän ilman lämpötila on sisään tulevaa ilmaa kylmempää, kun ympäristön lämpötila on alhaisempi. Lämmönsiirron määrään vaikuttaa lämpötilaerot sekä lämmönsiirtokennon koko. Välijäähdyttimessä ilmanvirtaus synnyttää myös hieman painehäviöitä.

Turboahtimen paineensäätö tapahtuu kuvan 4 magneettiventtiilin avulla. Magneettiventtiili muuttaa sähköisen ohjauksen paineohjaukseksi. Paineen kasvu hukkaportinkellossa avaa hukkaportin, joka toimii ohivirtauskanavana pakokaasuille. Tällöin turbiinin yli oleva paine laskee, ahtimen kierrosnopeus hidastuu ja ahtopaine laskee. Peruspaine on normaalisti noin 30 kPa suurempi kuin ilmakehän paine. Magneettiventtiilin kytkeminen päälle laskee painetta hukkaportinkellossa ja jousi sulkee turbon hukkaportin. Tällöin ahtimen kierrosnopeus kasvaa. Myös ahtoputkiston paine kasvaa ja virtaus moottoriin kasvaa. Kun magneettiventtiiliä ei ohjata, ahtoputkiston paine vaikuttaa suoraan turboahtimen hukkaportinkellolle. Tällöin maksimi paine asettuu hukkaportille säädetyn peruspaineen tasolle.

Jos magneettiventtiiliä ohjataan liian suurella taajuudella ($>26 \text{ Hz}$), niin sen ohjaus käyttäytyy kuin siinä olisi hystereesiä. Esimerkiksi venttiilin aukeaminen alkaa 50 % ohjauksella ja on täysin auki 90 % ohjauksella. Sulkeutuminen alkaa 65 % ohjauksella ja on täysin kiinni 30 % ohjauksella. Pienellä taajuudella (11 Hz) magneettiventtiilin venttiilistä kuuluu ääni, kun venttiili vaihtaa tilaa.



Kuva 4. Magneettiventtiili turboahtimen paineenohjaukseen

2.5 Moottorinrakenne ja voimansiirto

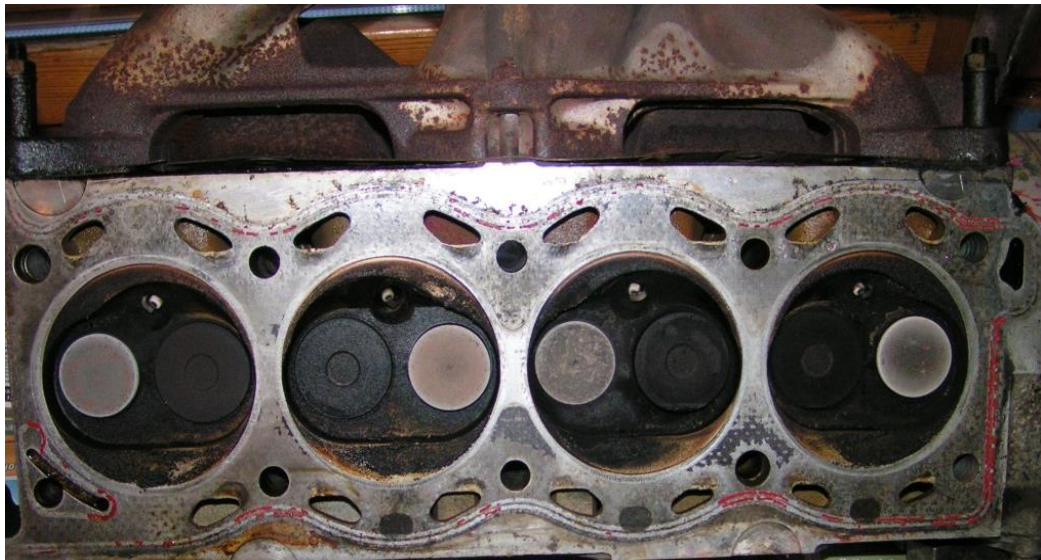
Moottori koostuu moottorilohkosta ja sylinterikannesta. Näiden välissä on kannentiiviste. Sylinterikansi kiinnitetään lohkoon erityisillä kansipulteilla, joita on tässä tapauksessa kymmenen. Kannen ja lohkon kohdistamisen apuna käytetään kohdistusholkkeja. Kannenpultit kiristetään momenttiavaimella korjausoppaan mukaiseen kireyteen. Kanteen liitetään lisäksi imusarja ja pakosarja. Kannentiiviste tiivistää moottorilohkon ja kannen välisen tilan ja pitää erillään toisistaan palotilan kaasut, jäähdytysnesteen ja moottoriöljyn.

Kuvassa 5 näkyy männän yläosan kuppimainen muoto, joka on tyypillistä ahdetuille moottoreille. Kampikammion tuuletuskaasut tulee ohjata poltettaviksi ja näissä on usein öljyä mukana. Tummat jäljet palotilassa ovat karstaa. Polttoaineen tarkan annostelun avulla karstan muodostumista voidaan vähentää. Moottorissa jäähdytysneste kiertää sylinteriputkien ympärillä ja kannentiivisteiden pienien reikien kautta. Jäähdytysnesteellä pyritään pitämään moottorin lämpötila hallinnassa. Jäähdytyskanaviin kertyy vanhemmiten likaa, jolloin lämmönsiirtoteho heikkenee.



Kuva 5. Moottorilohko ja männät

Sylinterikansi on kuvassa 6, josta näkyy B201 moottorin yläpalotilan muoto, venttiilien sijainnit sekä sytytystulpan sijainti. Sylinteri 1 on vasemmalla ja sylinteri 4 oikealla. Imuventtiilit ovat pakoventtiilejä suuremmat. Sytytystulppa sijaitsee kuvassa 6 venttiililautasten yläpuolella. Sylinterikansi kiristetään moottorilohkoon kymmenellä kansipultilla.



Kuva 6. 8-venttiilinen sylinterikansi ja pakosarja.

Männän ja kannen väliin muodostuu palotila, jossa ilman ja polttoaineen seos poltetaan. Seos imeytyyn palotilaan imuventtiilin ollessa auki ja männän liikuessa alaspäin. Venttiilien sijainti suhteessa palotilaan aiheuttaa palotilaan voimakasta pyörteilyä, jolloin polttoainepisarat sekoittuvat tasaisemmin ilman kanssa. Männän muotoilu vaikuttaa männän painoon ja puristussuhteeseen taulukon 2 mukaisesti.

TAULUKKO 2. Puristussuhteista johtuvat eri männät (Saab 900 korjaamon käsikirja)

	B201, kaasutin 1981–	B201i, 1981–	B201 Turbo 1981–1982	B201 Turbo APC 1982–
Upotuksen halkaisija (mm)	58	58	70	70
Upotuksen syvyys (mm)	0,4	0,4	6,6	2,65
Männän paino (g)	482–492	485–495	481–493	497–509
Puristussuhde	9,5:1	9,5:1	7,2:1	8,5:1

Puristussuhteen noston tiedetään parantavan moottorin hyötysuhdetta ja lisäävän nakutusherkkyyttä. Imuilman lämpötila nousee ahtamisen yhteydessä turboahdetuissa moottoreissa ja myös tämä lisää nakutusherkkyyttä. Lämpötilaa voidaan alentaa välijäähdytimellä.

Moottori on suunniteltu toimimaan tietyllä käyntinopeusalueella, johon vaikuttaa moottorin rakenne. Vaihdelaatikolla voidaan valita välityssuhde. Ajoneuvon nopeuden kasvaessa myös moottorin kierrosnopeus kasvaa. Valitsemalla suurempi vaihde, voidaan moottorin kierrosnopeutta laskea. Välityssuhde muuttaa moottorin vääntömomenttia suuremmaksi ja akseleiden kierrosnopeutta pienemmäksi. Osa moottorin tuottamasta

tehosta menee vaihdelaatikon häviöihin. Valitsemalla pieni vaihde saadaan suuri vääntömomentti renkailta, mutta nopeus rajoittuu, koska moottorin kierrosnopeus saavuttaa ylärajan.

Kemiallisesta reaktiosta vapautuu energiaa, joka muunnetaan männän liikkeeksi ja männän liike muunnetaan kampiakselin pyörimisliikkeeksi. Kaikkea kemiallisessa reaktiossa vapautunutta energiaa ei saada mekaaniseksi liikkeeksi edes ideaalisessa tapauksessa. Noin kolmannes energiasta poistuu kuumien pakokaasujen mukana ja toinen kolmannes lämpöenergiasta siirtyy palotilan seinämien kautta jäähdytysnesteeseen. Jäähdytysnesteen lämpöä voidaan hyödyntää auton sisätilojen lämmitykseen. Turboahdin hyödyntää kuumia pakokaasuja ja tuottaa ahtopainetta ahtoputkistoon.

Kampiakselilla vauhtipyörän tehtävänä on tasata moottorilta tulevia voimaimpulsseja. Vauhtipyörästä voima siirtyy käsivalintaisessa vaihdelaatikossa kytkimen kautta vaihdelaatikolle. Jousivoima painaa kytkimen kitkapinnat toisiinsa kiinni, kun kytkinpoljinta ei paineta. Vaihdelaatikolla moottorin voima välitetään renkaille. Rengaskoko vaikuttaa sen akselin kierrosnopeuden ja ajonopeuden suhteeseen.

Vaihdelaatikon välityssuhde riippuu ensiövaihteesta, valitusta vaihteesta ja lopuksi tausaupyörästä välityksestä. Työssä käytettiin GM45606 vaihdelaatikkoa. Tyypikkoodista voidaan lukea, että kyseessä on vuoden 1984 jälkeinen manuaalivaihteisto, jonka versionumero on 4, vaihteiden lukumäärä eteenpäin on 5, ensiövälitys riippuu käytetyistä rattaista ja välityssuhteeksi saadaan taulukon 3 avulla 31/26. Tyypikkoodin lopussa on vaihteiston kehitysversio 06.

TAULUKKO 3. Ensiövälitys (<http://www.900aero.com/>)

	Manual					Automatic	
Primary	4	5	6	7	8	3	4
Tooth in/out	31/30	30/27	31/26	32/25	33/24	40/37	41/36
Gearing	0,97	0,90	0,84	0,78	0,72	0,93	0,88

Yhtälössä 3 on laskettu teoreettinen säde renkaan tietojen perusteella. Uuden renkaan ympärysmittasta laskettu säde on suurempi, koska kulutuspintaa on jäljellä enemmän. Tämän kuluessa myös säde pienenee. Taulukon 4 ajonopeudet on ilmoitettu käytettäessä rengaskokoa 195/60R15, kun renkaan dynaamiseksi säteeksi on oletettu 0,299 m. Ren-

kaiden dynaaminen säde on hieman pienempi kuin teoreettinen, koska auton massa aiheuttaa renkasiin painumaa. Renkaan ilmanpaine ja rakenteellinen kantavuus vähentää painumaa. Testien renkaissa oli merkintä 195/60R15 88H. Tämä on ISO standardin mukainen tapa kertoa renkaan tiedot eli tässä tapauksessa:

- 195 = renkaan leveys (millimetreissä)
- 60 = renkaan profiili prosentteina leveydestä ($195 \text{ mm} \cdot 60 \% = 117 \text{ mm}$)
- R = teräsvyörengas
- 15 = vanteen koko (tuumina)
- 88 = renkaan kantavuus, 570 kg
- H = renkaan nopeusluokka, 210 km/h

$$195 \text{ mm} \cdot 60 \% + 15/2 \cdot 25,4 \text{ mm} = 307,5 \text{ mm} \quad (3)$$

Taulukosta 4 saadaan nopeuden ja moottorinkierrosnopeuden suhde eri vaihteiden välityssuhteilla. Tätä suhdetta on havainnollistettu kuviossa 13. Kierrosnopeuden noustessa myös teoreettinen ajonopeus nousee. Vaihdettaessa suurempi vaihde, pitää moottorin kierrosnopeutta pudottaa ja nopeuskäyrää seuraamalla nähdään moottorin teoreettinen kierrosnopeus kullakin vaihteella.

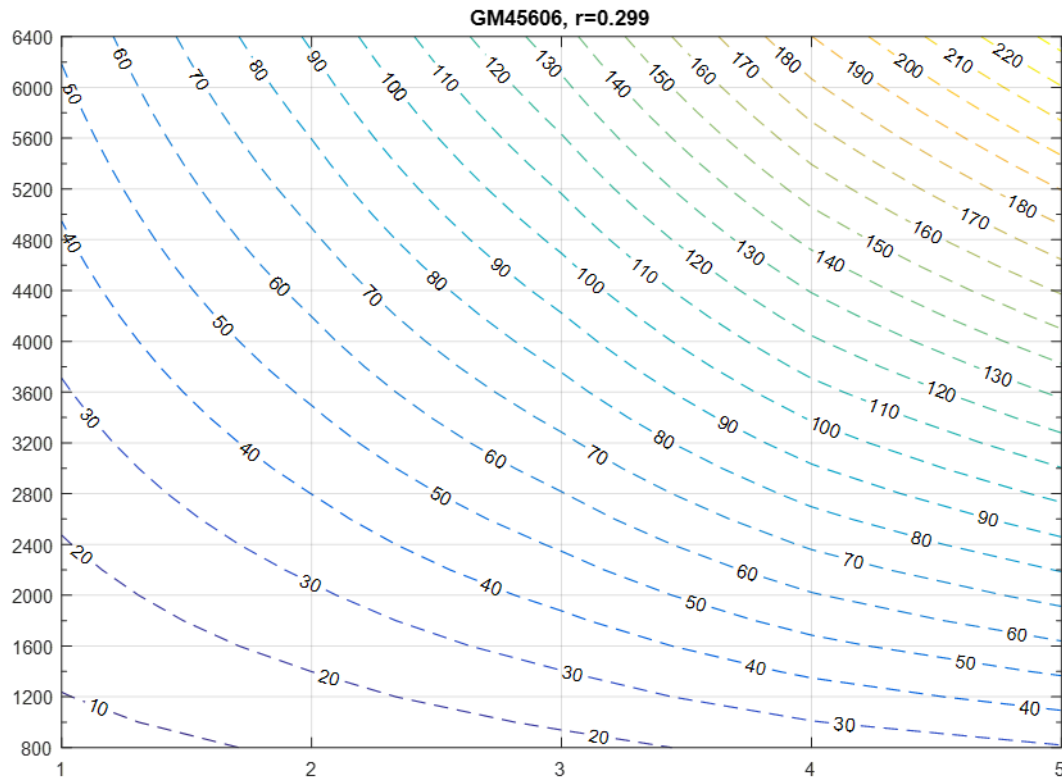
TAULUKKO 4. GM45606 vaihelaatikon välityssuhteet (Saab 900 korjaamon käsikirja)

Vaihde	1	2	3	4	5	R
Kokonaisvälityssuhde	13.94	7.88	5.29	3.8	3.08	15.34
km/h@1000 RPM	8.1	14.3	21.3	29.6	36.7	7.4

Saab 900 käyttöohjekirja ehdottaa taulukon 5 vaihtamisnopeuksia, kun halutaan ajaa polttoainetaloudellisesti. Polttoainetaloudellisessa ajotavassa pyritään pitämään kierrosnopeus melko alhaisena. Tällöin moottorin suurin vääntömomenttialue jää saavuttamatta. Nopeassa kiihdytyksessä pyritään käyttämään suurimman vääntömomentin aluetta. Myös peräkärryä vedettäessä kuormitus on suurempi ja käytetään hieman korkeampia kierrosnopeuksia. Kierrosnopeus ja nostetaan korkeammaksi, jotta saavutetaan suurempi teho.

TAULUKKO 5. Vaihtamisnopeudet (Saab 900 käyttöohjekirja)

Vaihto	1-2	2-3	3-4	4-5
Vaihtamisnopeus (km/h)	25	40	65	75



Kuvio 13. Teoreettiset nopeudet käyrinä [km/h] moottorin kierrosnopeuden [RPM] ja eri vaihteiden suhteen.

2.6 Ruiskusuuttimet ja polttoaineen syöttö

Polttoaineen ruiskutuksella pyritään tuottamaan haluttu ilman ja polttoaineen seossuhde moottoriin. Ruiskusuuttimet sijaitsevat imusarjassa lähellä imuventtiilejä, joten käytössä on epäsuora polttoaineen ruiskutus. Polttoaine ruiskutetaan imuilman sekaan ja imutahdin aikana seos siirtyy imuventtiilin kautta sylinteriin.

Ruiskusuuttimien virtausarvot on määritelty paine-erolle 300 kPa. Polttoaineen painesäätö tapahtuu paineensäätöventtiilillä, joka pyrkii pitämään paine-eron imusarjaan vakiona. Paineensäätöventtiili päästää ylimääräisen polttoaineen takaisin tankkiin, jolloin suutintukin ja imusarjan välinen paine-ero riippuu säätöventtiilin paineasetuksesta.

Ruiskutuksenohjaus mittaa kuormitusta imusarjan paineen ja moottorin kierrosnopeuden avulla. VE -kerroin saadaan kuormitustilan perusteella taulukosta, joka kuvaa moottorin virtaustehokkuutta. VE -kerroin on osa ruiskutuspulssin pituuden laskentaan käytettävää yhtälöä 1. Lisäksi huomioidaan olosuhdekertoimet yhtälöllä 2.

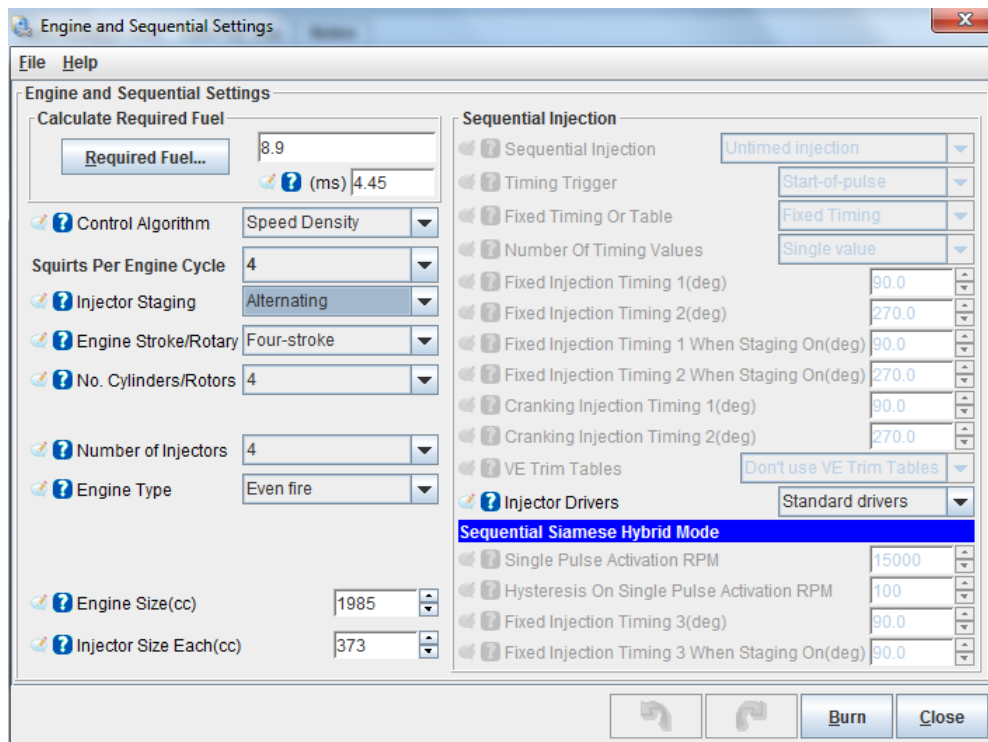
$$PW = REQ_FUEL * VE * MAP * E + Accel_PW + DEADTIME \quad (1)$$

$$E = \frac{FUEL_WARMUP}{100} * \frac{EGO}{100} * \frac{AIR_COR}{100} * \frac{BARO_COR}{100} * \frac{EAE}{100} \quad (2)$$

, missä:

- PW on suuttimen ohjauspulssinpituus.
- REQ_FUEL on polttoaineen tarvekerroin, jolla huomioidaan moottorin tilavuus ja suuttimien virtaus.
- VE on sylinterin täytön tehokkuus.
- MAP on imusarjan paine.
- E on korjauskertoimet, joissa käytetään prosentuaalista korjausta.
- Accel_PW on kiihdytysrikastus AE kompensoinnissa.
- DEADTIME on suuttimen avautumisaika.
- FUEL_WARMUP on kylmäkäynnistys rikastuskerroin.
- EGO on Lambda-anturin takaisinkytkennän tuottama korjauskerroin.
- AIR_COR on ilmantiheyden korjauskerroin taulukosta lämpötilan perusteella.
- BARO_COR on korjauskerroin ilmanpaineen mukaan.
- EAE on ennakoivan kompensoinnin korjauskerroin.

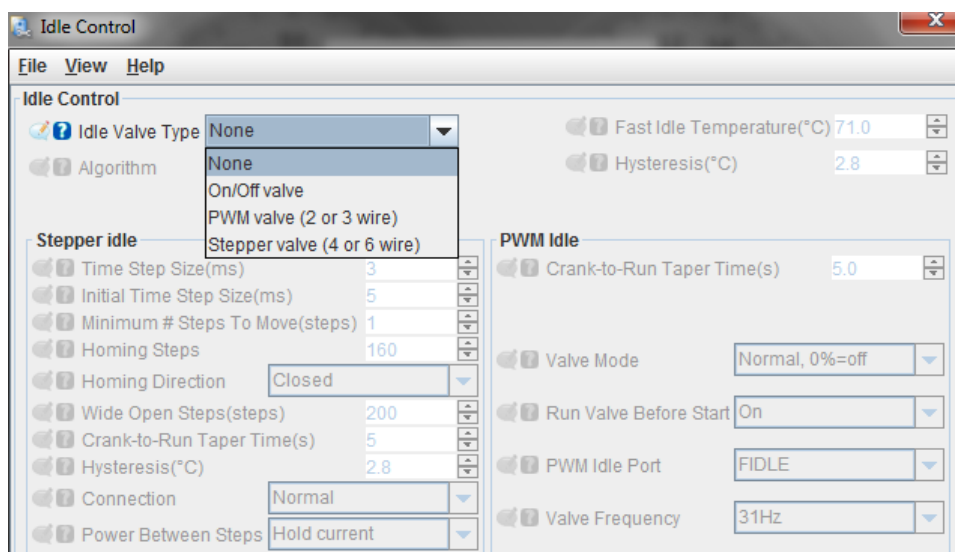
Suuttimille tuodaan akun positiiviselta navalta käyttöjännite ja suuttimia ohjataan maa-doittamalla. Kuviossa 14 asetetaan vakiot ja suuttimien ohjaustapa. Sekvenssin mukais-ta ohjaustapaa ei voi käyttää symmetrisen kehäpyörän tapauksessa. Tällöin valintana on ohjata suuttimia joko samanaikaisesti (Simultaneous) tai vuorotellen (Alternating). Vuo-rottelu vähentää paineen vaihtelua ja voidaan käyttää pidempiä ohjauspulsseja. Ohjaus-pulssin pituuden lähestyessä suuttimen aukeamisaikaa ohjauksen tarkkuus heikkenee.



Kuvio 14. Moottorin vakioiden määrittely

2.7 Tyhjäkäyntiventtiili

Tyhjäkäyntiventtiili toimii kaasuläpän ohivirtauskanavana ja tällä kasvatetaan virtausta. Kaasuläpän virtauksen minimi asetetaan säätöruuvilla. Tyhjäkäyntiventtiiliä on tarkoitus käyttää ilmanvirtauksen hienosäätöön, kun kaasuläppä on kiinni asennossa. Tyhjäkäyntiventtiilin tyyppi valitaan kuvion 15 ”Idle Valve Type” valikosta.

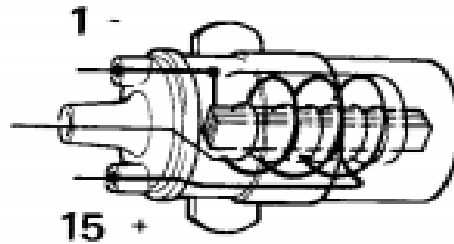


Kuvio 15. Tyhjäkäyntiventtiilin asetukset.

Tyhjäkäyntiventtiilin puuttuessa valitaan ”None”. Moottorin lämpötilan mukaan kytkettävä ”On/Off”-venttiili nostaa tyhjäkäyntiä kylmällä moottorilla ja sammuttaa venttiilin ohjauksen, kun saavutetaan tavoitelämpötila. ”PWM” ja ”Stepper” mahdollistavat takaisinkytketyn ohjaustavan. Avoimensilmukan (Open Loop) ohjaustapa perustuu jäähdytysnesteeseen lämpötilamittaukseen ja ohjaus saadaan taulukosta. Takaisinkytkettyohjaus huomioi kierrosnopeustavoitteen ja käyttää PID-säädintä tavoitteen saavuttamiseen. Takaisinkytketty (Closed Loop) algoritmi huomioi kierrosnopeuden ja pyrkii venttiiliä säätämällä kierrosnopeuden tavoitteeseen, kun kaasuläppä on kiinni. PWM-venttiili käyttää pulssisuhdemoduloitua ohjausta. PWM-venttiilin resistanssi on alle 6 ohmia ja kytkentätaajuus on 31 Hz tai suurempi. Fidle lähdössä V3.0 piirilevyn vakio transistori ZTX450 ei ole riittävä tähän käyttöön, vaan tulee käyttää esimerkiksi TIP122 transistoria. Askelmoottoria ohjataan lähdöillä IAC1A, IAC1B, IAC2A ja IAC2B. Askelmoottori muuttaa virtausaukkoa askelittain (MS2V30_Hardware-3.4.pdf, 36–40)

2.8 Sytytyksen ohjaus

Ilman ja polttoaineen seos sytytetään moottorissa sytytystulpan avulla. Sytytyskipinän vaatima energia tuotetaan sytytyspuolalla. Käämityksiä puolassa on kaksi, joista ensiö on pienjännitekäämi ja toisio on suurjännitekäämi. Ensiökäämitykseen tuodaan latausjännite, jolloin sytytyspuolan virta kasvaa ja magneettikenttä muodostuu sytytyspuolan rautasydämeen. Ensiövirran katkaisu äkillisesti aiheuttaa sytytyspuolan magneettikentän purkautumisen. Tästä syntyy toisiokäämiin korkeajännitteinen sytytysvirta, joka johdetaan sytytysjohdoilla sytytysvuorossa olevalle sytytystulpalle. Jännite on useita kymmeniä kilovoltteja, jolla saadaan läpilyönti tulpan kipinävälissä ja voimakas kipinä. Tämä sytyttää ilman ja polttoaineen seoksen palotilassa. Kuviossa 15 näkyy korkeajännitesytytyspuolan rakenne, jossa napa 15 on positiivinen jännite akulta ja napa 1 on sytytysmoduulilla ohjattava negatiivinen jännite. Keskimäinen napa on korkeajännitelähtö ja kytketään virranjakajan kautta sytytystulpille.



Kuvio 15. Sytytyspuola (Saab 900 korjaamon käsikirja)

Puolan ensiökäämin virtaan vaikutetaan latausajalla ja tätä tulee ohjata, jottei käämin virta kasva liian suureksi. MegaSquirt prosessorin looginen signaali pitää vahvistaa. Vahvistin suojaa prosessoria ylijännitteeltä ja vahvistaa heikon signaalin. Vaihtoehtoina on käyttää MS2-ohjaimen sisäistä tehotransistoria BIP373 tai ulkoista sytytysmoduulia.

Puolan latausvirransäätö tapahtuu kuvan 7 sytytysmoduulilla. Sytytysmoduulia ohjataan vetämällä ohjausta maihin, jolloin moduuli aktivoituu. Tässä moduulissa on sisäinen latausajan säätö, mutta ohjaussignaalin tulee olla sopiva tai sytytyksessä voi havaita katkoksia. Liian suuri virta aiheuttaa komponenttien kuumenemista.



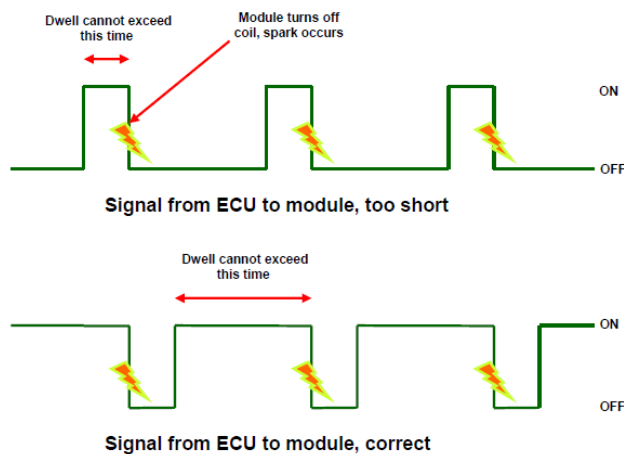
Kuva 7. Sytytyksen ohjausmoduuli BIM 139.

Taulukossa 6 on kuvan 7 sytytysmoduulin napojen kytkentä. Alkuperäisessä kytkennässä Hall-anturin sähkö syötettiin navoista 3 (-) ja 5 (+). Navasta 7 lähtee signaali pulssivahvistimen kautta kierrosnopeusmittarille mittaritauluun. Navat 1 ja 4 kytketään sytytyspuolalle ja napaan 4 kytketään releen kautta +12 V tasajännite, jonka tulee olla päällä aina, kun virta-avain on asennossa käy tai käynnistys. Napaan 6 tulee ohjausjännite moottorinohjaimesta ja ohjausjännitteen nousevalla reunalla sytytysmoduuli aktivoituu ja laskevalla reunalla katkaistaan latausvirta sytytyspuolalta, jolloin sytytystulpalle saadaan kipinä. Ensimmäinen ohjauspulssi käytetään tahdistukseen.

TAULUKKO 6. BIM 139 napojen kytkentä

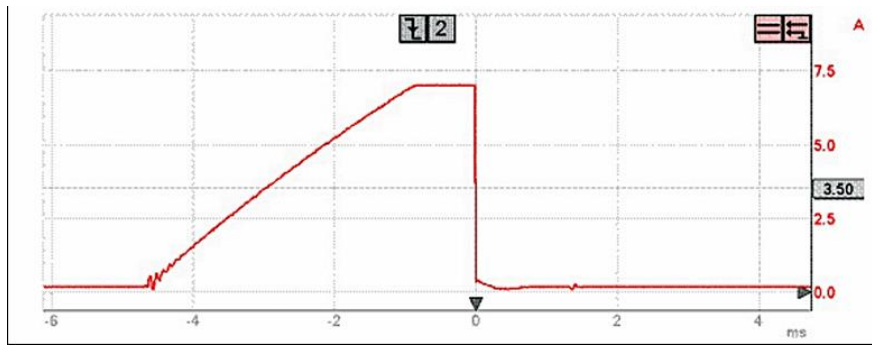
Napa	KytKentä
1	Sytytyspuolan napa 1
2	Maadoitus
3	n/c
4	Sytytysvirta +12 V _{DC} , sytytyspuolan napa 15
5	n/c
6	MegaSquirt ohjaus
7	n/c

Dtec: Dwell Calibration -julkaisu käsittelee sytytysmoduulin toimintaa. Sytytysmoduulin ohjauspulssin tulee olla tarpeeksi pitkä, kuten kuvista 16 nähdään. Ohjauspulssin pituudeksi määritin kokeellisesti 5,1 ms. Kipinä ei ollut tarpeeksi voimakas, jos aika oli alle 4 ms. Suurilla kierrosnopeuksilla ohjauspulssin pituus rajoittuu ja MS2 suhteuttaa tämän kipinälle varattuun aikaan.



Kuvio 16. Sytytysmoduulille asetettava signaalin muoto (Dtec: Dwell Calibration)

Moduulin tuottama ensiövirta puolalle on muodoltaan kuvion 17 mukainen. Laskevalla reunalla tuotetaan kipinä. Suuri virran muutosnopeus aiheuttaa suuren jännitteen induktiivista kuormaa kytkettäessä. MS2 asettaa pulssipituuden (Dwell) ja sytytysketken. Sytytysmoduulin tehtäväksi jää rajoittaa puolan latausvirran huippuarvoa. Kuviossa 18 puolan ensiövirtaa on ohjattu moduulilla BIM 024, jota käytetään induktiivisen anturin kanssa. BIM 139 on toiminnaltaan vastaava, mutta moduulin ohjaustapa on pulssimuotoinen. MegaSquirt tuottaa pulssimuotoisen signaalin ja kipinä ajoitetaan signaalin reunan avulla. Virran muutosnopeus riippuu piirin resistanssista, induktanssista ja jännitteestä.



Kuvio 17. BIM 024 moduulin ensiövirta puolalle (Dtec: Dwell Calibration)

Kuviossa 17 sytytysmoduulin virta kasvaa, kunnes saavutetaan moduulin virtaraja, jonka jälkeen virtaa pidetään vakiona. Virran katkaisulla aiheutetaan erittäin nopea ensiövirran muutos ja magneettikentän purkautuminen. Lenzin lain mukaan induktanssi pyrkii vastustamaan virran muutosta ja aiheuttaa yhtälön 4 jännitteen E_{ind} . Sytytyspuola toimii muuntajan tavoin ja häviöttömässä tapauksessa muuntosuhteet noudattavat yhtälöä 5. Sytytyspuolassa käämitysuhde on suunnilleen $N_1:N_2 \approx 1:80$. Sytytystulpan kärkivälissä tuotetaan kipinä, kun toisioin suurjännite ohjataan sytytystulpalle. Kipinä käynnistää ilman ja polttoaineen välillä nopean palamisreaktion. Palaminen päättyy, kun palamisen edellytykset eivät enää toteudu.

$$E_{\text{ind}} = -L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

, jossa:

- e on induktanssin aiheuttama jännite
- L on induktanssi
- di/dt on virran muutosnopeus

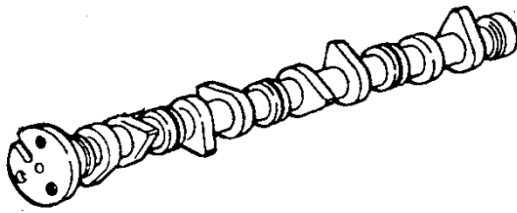
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (5)$$

, jossa:

- U on jännite
- N on käämin kierrosmäärä
- I on virta

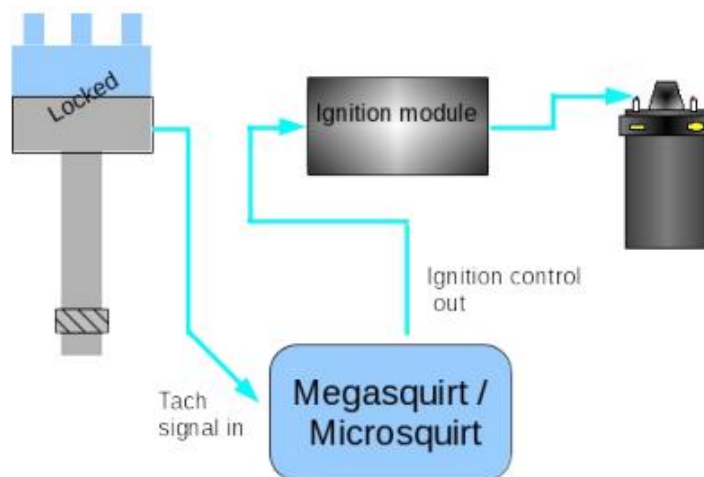
Moottorin mekaaninen ajoitus eli kampiakselin ja nokka-akselin välitys on tehty jakopäänketjulla ja rattaila. Kuvion 18 nokka-akselin nokat painavat venttiilejä auki. Nok-

ka-akseli määrää ajoituksen, jolla venttiilit aukeavat. Moottorin kohdistusmerkkien avulla nokka-akselin ajoitus saadaan tehdasasetuksiin. Nokka-akselin toisessa päässä on virranjakaja. Virranjakajassa on sisällä Hall-anturi ja kehäpyörä. Anturin syöttöjännite tulee pinneihin 1 ja 3. Signaali saadaan pinnistä 2. Korjaamo-oppaassa sytytyksen perusajoitus on 20 astetta ennen yläkuolokohtaa moottorin kierrosnopeudella 2000 1/min. Sytytysjärjestys määräytyy nokka-akselin perusteella, joka on 1-3-4-2. Tulpanjohdot kytketään virranjakajalta sytytysjärjestyksen mukaan. Kipinän tulee ajoittua sylinterille, jonka puristustahti on lopussa ja työtahti on alkamassa seuraavaksi.



Kuvio 18. Nokka-akseli (Saab 900 korjaamon käsikirja)

Sytytyskartan mukainen ennakonsäätö toteutetaan poistamalla mekaaninen ajoitusmekanismi, lukitsemalla ajoitusmekanismi ja tuomalla asentoanturin signaali MS2-ohjaimeen. Tyypillinen toteutus on esitetty kuviossa 19. MS2 tulkitsee signaalin ja käyttää sytytyskarttaa sytytyssignaalin luomiseen. Sytytysmoduuli ohjaa sytytyspuolaa.



Kuvio 19. Sytytyksen ohjaus moottorinohjaimen avulla (www.msextra.com)

Jos käytetään tehotransistoria BIP373 puolan ensiövirran ohjaukseen, niin sytytys tapahtuu nousevalla reunalla. Datalehdellä transistorin virranrajoituksen tyypillinen arvo on 11,5 A. Sytytyspuolalle ja johdotukselle tämä voi olla liikaa. Ensiövirtaa rajoitetaan

latausaikaa (Dwell) säätämällä. Tavoite on pitää kipinä tarpeeksi voimakkaana ilman komponenttien ylikuumentumista. Sytytysjärjestelmässä on vaaralliset jännitteet ja kytkennät tehdään jännitteettömänä. Ohjaimen firmware päivityksen ajaksi sytytysjärjestelmän sulake pitää irrottaa.

2.9 Polttoaineen ominaisuudet

Bensiini koostuu useista eri hiilivety-yhdistelmistä. Bensiinillä on useita lisäaineita, joita jalostamot ovat kehittäneet. Oktaaniluku on määritelty N-heptaanin ja Iso-oktaanin avulla. N-heptaani C_7H_{16} edustaa oktaanilukua 0. Iso-oktaani C_8H_{18} puolestaan edustaa oktaanilukua 100. Suomessa on myynnissä 98E5, 95E10 sekä E85 polttoainelaadut. 98 ja 95 tarkoittavat polttoaineen oktaanilukua RON, joka on polttoaineen puristuskestävyys kevyessä kuormituksessa. E5, E10 ja E85 puolestaan kertovat polttoaineen maksimi etanolipitoisuuden tilavuusprosentteina. Lambda-arvon ja seossuhteen välinen riippuvuus eri polttoaineilla voidaan lukea taulukosta 7. Etanoli on happea sisältävä polttoaine, jonka ilmamäärän tarve on pienempi kuin bensiinillä. Standardi SFS: EN 228 määrittelee raja-arvot polttoaineen koostumukselle. Polttoaineen koostumus vaikuttaa stoikiometriseen seossuhteeseen. Seossuhdetta voidaan säätää, kun mitataan happitasapaino Lambda-anturilla. Tällöin päästöt pysyvät hallinnassa ja moottorin tehokkuus ei kärsi.

TAULUKKO 7. Lambda-anturin näyttämä eri polttoaineiden ilma/polttoainesuhteilla (www.megamanual.com)

Air/Fuel Ratio Equivalents					
Lambda	Gasoline	Propane	Methanol	Ethanol	Diesel
0.70	10.3	11.0	4.5	6.3	10.2
0.75	11.0	11.8	4.9	6.8	10.9
0.80	11.8	12.5	5.2	7.2	11.6
0.85	12.5	13.3	5.5	7.7	12.3
0.90	13.2	14.1	5.8	8.1	13.1
0.95	14.0	14.9	6.1	8.6	13.8
1.00	14.7	15.7	6.5	9.0	14.5
1.05	15.4	16.5	6.8	9.5	15.2
1.10	16.2	17.2	7.1	9.9	16.0
1.15	16.9	18.0	7.4	10.4	16.7
1.20	17.6	18.8	7.8	10.8	17.4
1.25	18.4	19.6	8.1	11.3	18.1
1.30	19.1	20.4	8.4	11.7	18.9

Taulukossa 8 on vertailtu bensiinimoottoreille soveltuvien polttoaineiden ominaisuuksia. Nakutusherkkyyteen vaikuttavat moottorin puristussuhde, palotilan muotoilu, lämpötila, paine, sytytysennakko sekä polttoaineen oktaaniluku. Tällöin nakutuksen torjuntaan on useita eri vaihtoehtoja. Oktaaniluku ilmaistaan polttoaineen puristuskestävyyttä. Polttoaine kaasuuntuu sitä herkemmin mitä matalampi höyrystymislämpö on.

TAULUKKO 8. Polttoaineiden ominaisuuksia

(<http://www.faqs.org/faqs/autos/gasoline-faq>)

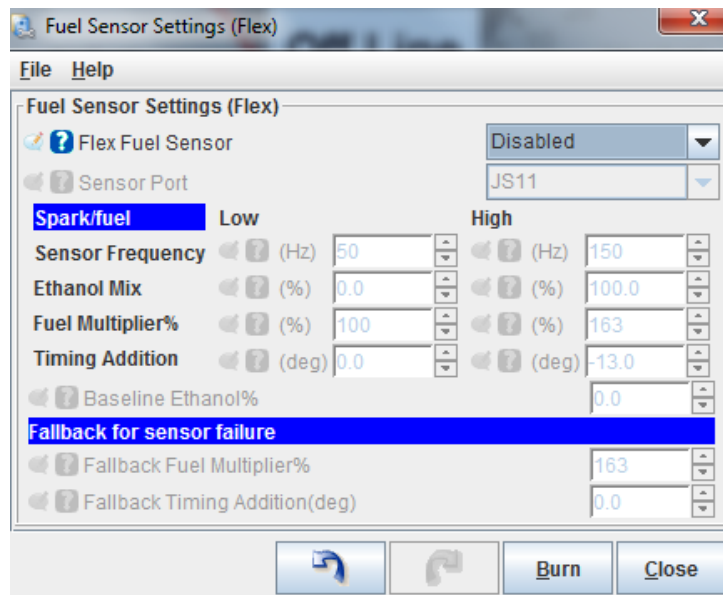
	Metanoli	Etanoli	Bensiini
RON	106	107	92–98
MON	92	89	80–90
Höyrystymislämpö (MJ/kg)	1.154	0.913	0.3044
Nettolämpöarvo (MJ/kg)	19.95	26.68	42–44
Höyrinpaine @ 38 °C (kPa)	31.9	16	48–108
Liekin lämpötila (°C)	1870	1920	2030
Pienin sytytys energia (mJ)	0.14	-	0.29
Alempi syttymisraja (vol%)	6.7	3.3	1.3
Ylempi syttymisraja (vol%)	36	19	7.1
Itsesyttymislämpötila (°C)	460	360	260–460
Leimahduspiste (°C)	11	13	-43– (-39)

Etanolipitoisuus voidaan tunnistaa polttoainelinjaan asennettavalla kuvan 8 anturilla. Tämä mittaa etanolipitoisuuden ja antaa ulostulona taajuusviestin välillä 50–150 Hz. Polttoaineen etanolipitoisuuteen perusteella voidaan asettaa kompensatio sytytykselle ja polttoainemäärälle.



Kuva 8. Polttoaineen etanolipitoisuusanturi (paceperformance.com)

Kuviossa 20 on esitetty MS2-järjestelmän asetukset etanolipitoisuusanturille. Etanolipitoisuusanturin käyttäminen vaatii anturin asennuksen polttoaineen syöttöletkuun, jännitteensyötön ja signaalijohdon kytkennän piirilevyille. Signaalin häviäminen ottaa käyttöön vikatilaa ja sille määritellyt asetukset. Etanolipitoisuusanturia ei työssä käytetä ja asetukset näkyvät harmaana.



Kuvio 20. Flexfuel anturin asetukset MS2-järjestelmässä.

3 TUTKIMUSONGELMAT

3.1 Moottorin parametrien etsiminen

Polttomoottorin toiminta vaatii, että polttoaineensyötön ja sytytyksen asetukset ovat riittävän lähellä optimaalisia arvoja. Sytytyksen asetukset saadaan oikealle alueelle käyttämällä korjausoppaissa esitettyjä säätöarvoja. Kuvion 21 taulukko on luotu työkalulla *VE Table Generator*, joka sisältyy *TunerStudio MS* -ohjelmaan. Taulukko luodaan yhtälöä 6 käyttämällä, kun tunnetaan moottorin ominaisuudet. Moottori kyllä käynnistyi, mutta mittaustietojen perusteella tämä taulukko on aivan liian suurilla arvoilla. Kaikkia taulukon arvoja sai pudottaa noin 10–40 %.

$$VE = A * rpm^2 + B * rpm + C \quad (6)$$

, jossa kertoimet A, B ja C ovat vakioita moottorin ominaisuuksien mukaan.

Kuvio 21. VE Table Generator.

3.2 Ilman ja polttoaineen suhdesäätö

Pakokaasupäästöistä voidaan päätellä mihin suuntaan asetuksia pitää korjata. Lambda-anturi *Bosch LSU4.2* toimii, kun pakokaasujen lämpötila on välillä 350–930 °C. Laaja-kaista Lambda-anturi tarvitsee myös ohjaimen, joka tässä työssä oli *Tech Edge 2A0*, joka soveltuu *LSU4.0* ja *LSU4.2* antureille.

Ajoneuvojen katsastuksessa mitataan pakokaasupäästöistä: HC, CO, O₂ ja CO₂. Muita pakokaasuissa esiintyviä kaasuja ovat: H₂, N₂, NO, NO₂ ja H₂O. HC päästöt ovat hiilivety yhdisteitä, jotka ovat peräisin epätäydellisesti palaneesta polttoaineesta tai öljystä. Pakokaasupäästöille on määrätty rajat, jotta ajoneuvo voidaan hyväksyä tieliikennekäyttöön. Henkilöautojen katsastuksessa käytetään taulukon 9 päästörajoja. Taulukko 9 perustuu julkaisuun: Katsastuksen arvosteluperusteet. Uudempien ajoneuvojen päästörajat ovat tiukemmat, koska päästöjä halutaan vähentää ja uudempi tekniikka mahdollistaa pakokaasujen jälkikäsittelyn. Taulukosta 9 puuttuu Euro 5 ja Euro 6, jotka määrittävät lisäksi pienhiukkasille ja haihtuville orgaanisille yhdisteille päästörajat.

TAULUKKO 9. Pakokaasujen päästörajat katsastuksessa

Moottorityyppi tai auton käyttöönottoaika	Joutokäynti			Väh. 2000 1/min		
	OBD	CO (%)	HC (ppm)	CO (%)	HC (ppm)	Lambda
Ennen 1.10.1986	-	4,5	1000	-	-	-
1.10.1986 tai jälkeen	-	3,5	600	-	-	-
Varustettu kolmitoimisella katalysaattori-laitteistolla	-	0,5	100	0,3	100	1±0,03
Ey-tyyppihyväksytty direktiivin 98/69/Ey-mukaisesti (EURO 3 ja 4)	Tarkastus	-	-	0,2	100	1±0,03
1.7.2002 jälkeen	Tarkastus	-	-	0,2	100	1±0,03

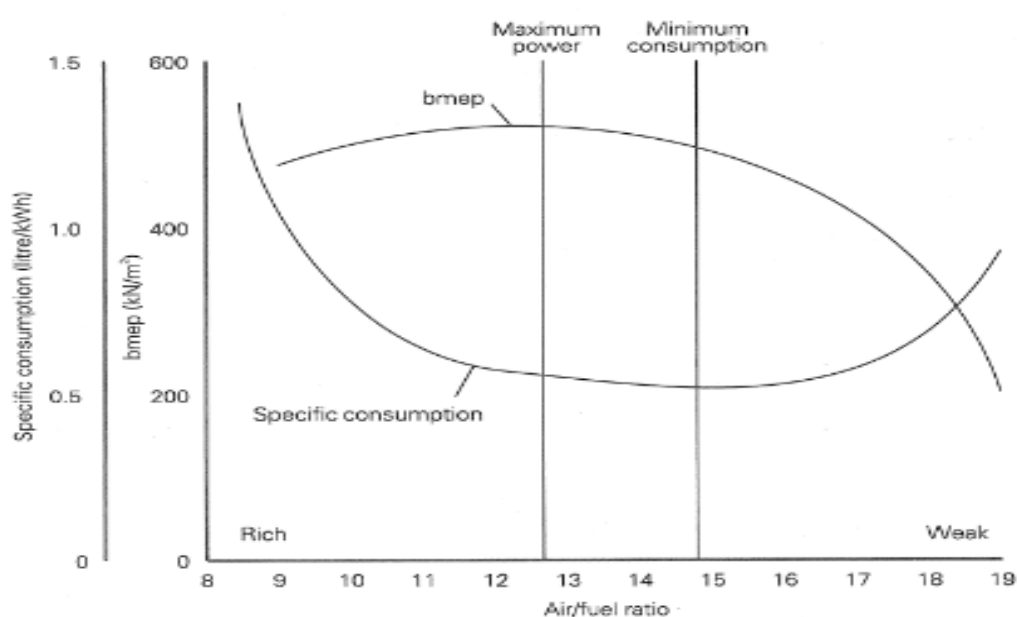
Seossuhde vaikuttaa polttoaineen kulutukseen ja moottorin tehoon. Lisäksi se vaikuttaa pakokaasupäästöihin. Useimmilla moottoreilla paras vääntö saavutetaan seossuhteen ollessa hieman polttoainerikas. Moottorin vääntömomentin ja tehollisen keskipaineen ”BMEP” välillä on yhtälön 7 mukainen riippuvuus.

$$BMEP \text{ (Brake Mean Effective Pressure)} = n \cdot t \cdot 2 \cdot \pi / d \quad (7)$$

, jossa:

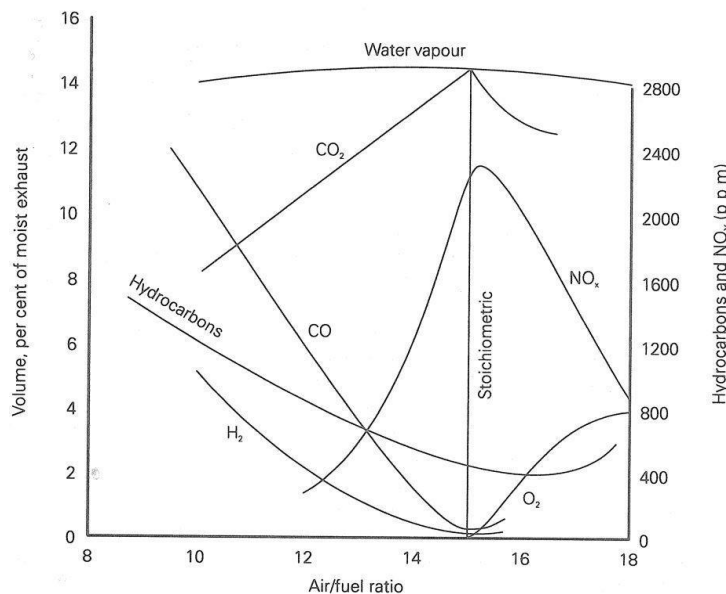
- n = kierrosten lukumäärä työ kierrossa
- t = vääntömomentti (Nm)
- d = iskutilavuus (m³)

Moottorin iskutilavuus on noin 1980 cm^3 ja liitteestä 2 voidaan lukea moottorin vääntömomentiksi 240 Nm kierrosnopeudella 3000 RPM . Tehollinen keskipaine on tällöin $1523 \text{ kN/m}^2 \approx 15,2 \text{ Bar}$. Ahtamattomalla moottorilla BMEP on yleensä alle 10 Bar ja ahdetulla moottorilla BMEP on yleensä yli 15 Bar . BMEP on täysin teoreettinen, eikä tämä ole sama kuin palotilan paine. BMEP toimii kuitenkin vertailutyökaluna moottorin vääntömomentin ja iskutilavuuden suhteen. Seossuhde vaikuttaa polttoaineen kulutukseen ja BMEP arvoon, kuten kuviosta 22 nähdään. Seossuhteen optimointi tapahtuu tavoitteen perusteella: suurempi teho ja vääntömomentti, pienempi kulutus tai pienemmät päästöt. Kaikkia näistä ei voida kuitenkaan saavuttaa samaan aikaan.



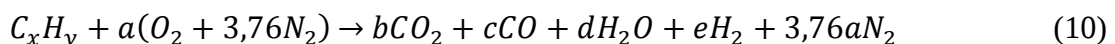
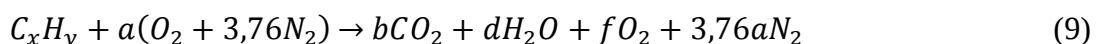
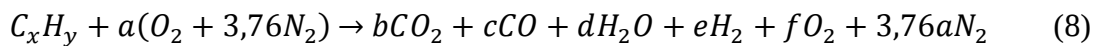
Kuvio 22. Moottorin tehollisen paineen BMEP ja polttoaineen kulutuksen riippuvuus seossuhteesta AFR (Engine Testing, 2007. s.188)

Seossuhde vaikuttaa päästöihin kuvion 23 mukaisesti. HC eli hiilivetypäästöjen kasvu on merkki huonosta palamisesta tai sytytysongelmista. CO ja HC päästöt kasvavat, kun polttoainetta syötetään enemmän kuin stoikiometrinen määrä. O₂ ja HC päästöt kasvavat, kun polttoainetta syötetään vähemmän kuin stoikiometrinen määrä. Typenoksidien määrä on suurimmillaan, kun seossuhde on hieman laihalla ja palamislämpötila on korkea.



Kuvio 23. Lambda-arvon suhde päästöihin (Engine Testing. 2007. s.213)

Yhtälössä 8 on hiilivedyille yleinen palamisreaktio, jossa nuoli kuvaa reaktiosuuntaa. Lambda (λ) on palamisen ilmakerroin. Stoikiometrian tapauksessa kerroin on yksi. Reaktioyhtälössä 9 käsitellään laihaa seosta ($\lambda > 1$). Rikasta seosta ($\lambda < 1$) käsitellään reaktioyhtälössä 10. Reaktioyhtälöiden kerroin 3,76 saadaan, kun oletetaan ilmassa olevan 21 % happea ja 79 % typpeä. Stoikiometrian tapauksessa $a = x + y/4$. Stoikiometrinen ilman ja polttoaineen massasuhte lasketaan yhtälöllä 11. (Luentomateriaali A Oksanen, L Aarikka: Polttotekniikka 2005, luku 2.6)



$$(A/F)_{stoic} = (m_{air}/m_{fuel})_{stoic} = (4,76a \cdot M_{air})/(1 \cdot M_{fuel}) \quad (11)$$

Ilman moolimassaksi oletetaan $M_{air} = 28,96 \text{ g/mol}$. Tarkastellaan stoikiometrian avulla palamisreaktioita. Stoikiometrian painotuskertoimia voidaan laskea *Matlab* -ohjelmiston *Stoichiometry Tools* -työkalulla. Käskyt on osoitettu ”>>” -merkeillä. Isooktaanin C_8H_{18} palamisreaktiolle lasketaan painotuskertoimet:

```
>> s={'C8H18','O2','CO2','H2O'};
>> V=stoich(s);
>> disp_reaction(V,s);
2 C8H18 + 25 O2 <=> 16 CO2 + 18 H2O
```

Etanolin $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ palamisreaktiolle lasketaan painotuskertoimet:

```
>> s={'C2H5OH','O2','CO2','H2O'};
>> V=stoich(s);
>> disp_reaction(V,s);
C2H5OH + 3 O2 <=> 2 CO2 + 3 H2O
```

Moolipainot näissä reaktioissa mukana olleille aineille saadaan seuraavasti:

```
>> s={'C8H18','C2H5OH','O2','CO2','H2O'};
>> molweight(s);
```

Species	Mol. Wt.
-----	-----
C8H18	114.23
C2H5OH	46.07
O2	32.00
CO2	44.01
H2O	18.02

Ilma/polttoaine suhde iso-oktaanille:

```
>> a_C8H18=8+18/4;
>> AFR_C8H18=4.76*a_C8H18*28.96/114.23
AFR_C8H18 =
    15.0847
```

Ilma/polttoaine suhde etanolille:

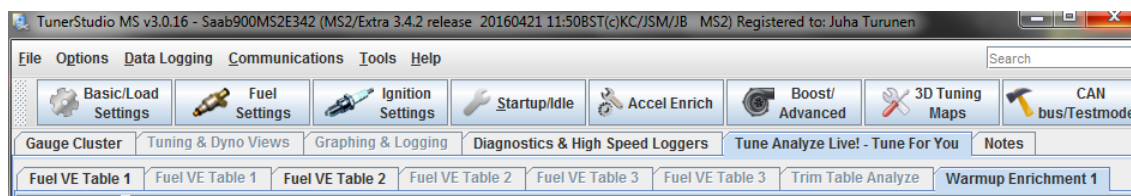
```
>> a_C2H5OH=2+6/4-0.5;
>> AFR_C2H5OH=4.76*a_C2H5OH*28.96/46.07
AFR_C2H5OH =
    8.9765
```

Etanolin ilma/polttoaine suhde on pienempi kuin iso-oktaanin. Koska nykyisiin bensinilaatuuihin on sekoitettu etanolia, niin lähestyy seossuhde etanolin arvoa. Polttoainelaa-

tua E85 käytettäessä polttoaineen syöttöä tulee kasvattaa lähes 50 %, jos ilmanvirtaus kaasuläpällä pysyy samana. Suuttimia valittaessa tavoitellaan alle 85 % käyttöastetta. Testeissä suuttimien käyttöaste oli suurimmillaan noin 70 %, kun käytetty polttoaine oli 98E5. Suuttimien syöttö muodostuu rajoittavaksi tekijäksi polttoaineella E85, koska suuttimien käyttöaste ei voi olla yli 100 %.

3.3 Moottorin kompensointien viritys

Tarkoituksena on selvittää kompensoinnin vaikutuksia ja onko mahdollista parantaa moottorin käyntiä virittämällä kompensointi taulukoita. Ennen kompensointitaulukoiden viritystä tulee VE taulukoiden olla kunnossa. Versiosta *TunerStudioMS* 2.2 lähtien VE taulukoiden viritys voidaan tehdä automaattisesti välilehdellä ”Tuning Analyze Live!”. Käytössä on ”Dual Table”, jolloin nähdään kuvion 24 välilehdet. VE1 ja VE2 taulukoita ei pidä virittää samanaikaisesti, kun käytössä on vain yksi Lambda-anturi. Joko viritetään yksi taulukko tai otetaan ”Dual Table” pois käytöstä virituksen ajaksi. Taulukoiden väliset erot pitää tasata, jotta toiset sylinterit eivät ole rikkaalla ja toiset laihalla.

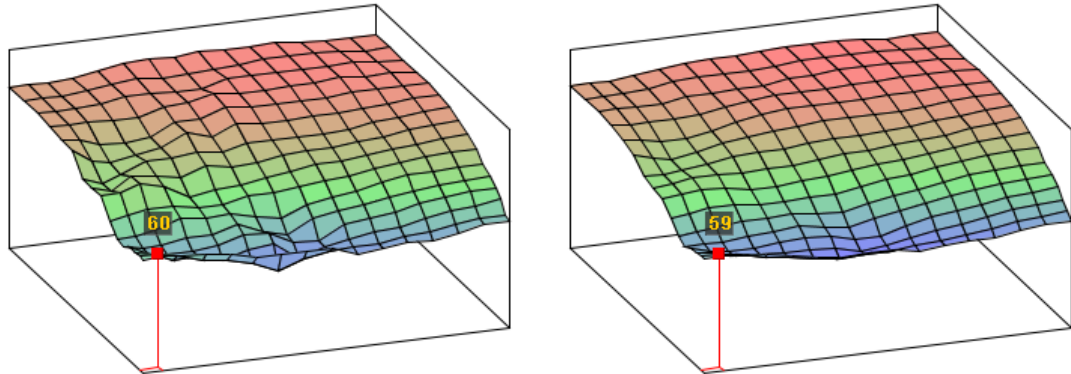


Kuvio 24. TunerStudio MS 3.0.16 välilehdet ja valikot.

Kuviossa 25 välilehden ”Tune Analyze Live!” alla näkyy ”Fuel VE Table 1”, ”Fuel VE Table 2” ja ”Warmup Enrichment 1”. Ennen kuin siirrytään kylmäkäyntirikastukseen pitää virittää VE -taulukot. Taulukoiden tulee olla samanlaiset, kun suuttimet ovat samanlaiset. AFR tavoite taulukot pitää määrittää, jotta automaattiviritys ”Tune Analyze Live!” antaisi järkeviä tuloksia. Kun automaattivirityksen muutokset ovat pieniä ja voidaan siirtyä kylmäkäyntirikastuksen ”Warmup Enrichment 1” viritukseen.

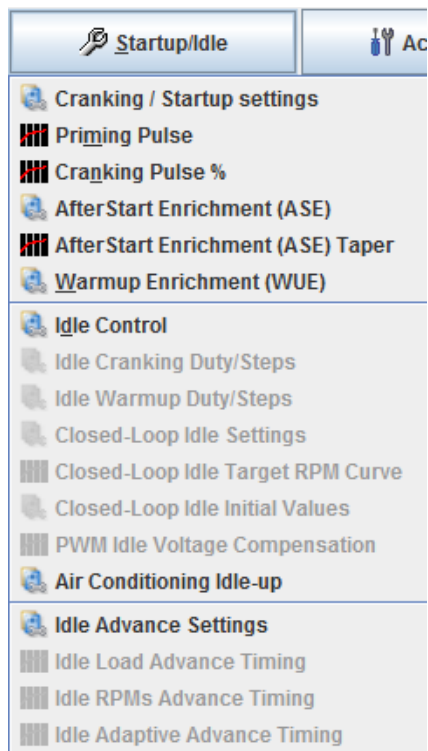
Kuviossa 25 VE -taulukko esitetään kolmiulotteisena pintana. Joskus automaattiviritys tuottaa hyvinkin rosoisia pintoja ja on syytä epäillä virheellisiä mittauksia. Vasemmalla on automaattivirityksen tuottama rosoinen pinta. Oikealla rosoisuutta on vähennetty pehmenne työkalulla, joka ottaa painotetun keskiarvon säätöpisteestä ja sen ympäris-

töstä. Työkalussa ympäristön painotuksen voi valita väliltä 0–1. Suurempi painotus ta-soittaa enemmän ja oletuksena se on 0,70. Taulukko tulee tallettaa ohjaimen muistiin, jotta sitä käytetään seuraavalla kerralla.



Kuvio 25. VE taulukko kolmiulotteisena pintana.

Kylmissä olosuhteissa polttoaineen höyrystyminen on hidasta ja kylmäkäynnistyksessä moottori on kylmä. Tällöin polttoaineen määrää tulee lisätä. Kylmäkäynnistykseen on MegaSquirt2-järjestelmässä useampi taulukko. Kuviossa 26 näkyy, että käynnistykseen ja tyhjäkäyntiin liittyviä kompensointitaulukoita on useita. Nämä löytyvät TunerStudio -ohjelman valikosta ”Startup/Idle”.



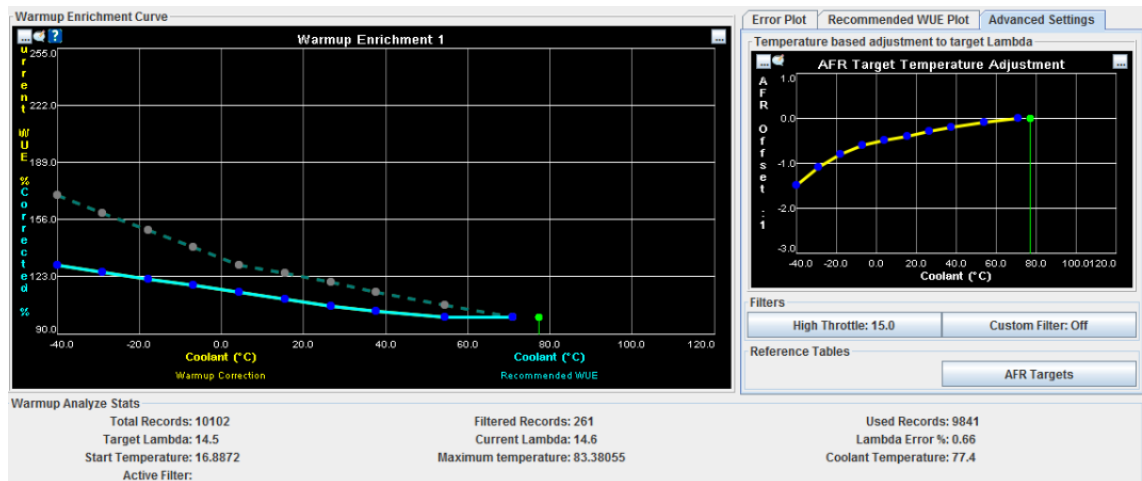
Kuvio 26. Käynnistykseen ja tyhjäkäyntiin vaikuttavat valikot ja taulukot.

”Priming Pulse” asetuksessa määritetään moottorinlämpötilan mukaan suuttimien ohjauspulssin pituus, kun sähköt kytketään päälle. Pulssinpituuden ollessa 0,0 ms ei polttoainepumppu käynnisty ohjaimen käynnistyksen yhteydessä. Tästä on hyötyä, jos moottoria ei yritetä käynnistää, mutta virrat kytketään moottorinohjaimeen päälle useaan kertaan.

Käynnistysrikastuksia tarvitaan moottorin käynnistyksen aikana. Koska käynnistyksen aikana Lambda-anturi ei ole toimintavalmiina, niin ei saada palautetta siitä millainen seos moottorissa on ja käynnistysrikastusten säätö voi olla haastavaa. Kun käynnistysmoottorilla pyöritetään moottoria hitaasti, niin ruiskutuspulssien pituus määräytyy arvoista ”Required Fuel” ja ”Cranking Pulse %”. Näistä ensimmäinen lasketaan moottorin tilavuuden ja suuttimien virtauksen avulla ja jälkimmäinen on kerrointaulukko jäähdytysnesteeseen lämpötilan suhteen. Moottorin kierrosnopeus kasvaa ja ylitetään raja-arvo ”Cranking RPM”.

Käynnistyksen jälkeiseen rikastukseen käytetään taulukoita: ”ASE”, ”ASE Taper” ja ”WUE”. Nämä kytkeytyvät päälle moottorin käynnistyessä, kun kierrosnopeus ylittää raja-arvon ”Cranking RPM”. Tällöin ASE ja ASE Taper luetaan taulukoista, ASE Taper määrittää kuinka pitkään ASE rikastus vaikuttaa. ASE on summaava rikastus ja kylmänä rikastus on normaalisti 50 % ja lämpimänä 5 %. ASE Taper asettaa rampin, jolla tämä rikastusvaikutus katoaa. WUE on lämpötila riippuva kerroin, joka lämpimänä pitää olla 100 %.

VE -taulukoiden haetaan arvot, kun moottori on lämmin. Kylmänä seossuhde asetetaan hieman rikkaalle, jotta moottori käynnistyy ja pysyy käynnissä. Kylmäkäynnistys taulukoiden viritystä ei voi yrittää montaa kertaa päivässä, koska moottorin pitää olla kylmä ja jäähtyminen kestää useita tunteja. WUE taulukon viritystä voi yrittää *TunerStudio MS* -ohjelmassa. Valitaan ”Tune Analyze Live!” välilehden ”WarmUP Enrichment 1” välilehti, jolloin saadaan kuvion 27 näkymä.



Kuvio 27. Moottorin kylmäkäynnistyksen (WUE) viritys TunerStudio-ohjelmassa

”Warmup Enrichment 1” -välilehdellä on nappi ”Start Auto Tune”. Moottori käynnistetään ja nappia painetaan, jolloin ohjelma kerää tietoa seossuhteista moottorin lämpötilan mukaan. Analyysi vertaa tavoitetta AFR_target ja mittausta AFR. Tuloksista tulee suodattaa mittaukset, joissa Lambda-anturin arvot eivät vielä ole mittauskelpoisia. AFR_target arvoon tehdään analyysissä lämpötilasta riippuva korjaus. Tuloksena saadaan WUE taulukkoon uudet arvot, jotka tulee hyväksyä ennen kuin moottori sammutetaan. Sitä ennen tulee pysäyttää tiedon kerääminen napista ”Stop Auto Tune”. Jos ohjain sammutetaan ilman muutoksien hyväksyntää, niin ne menetetään.

Kuviossa 27 oikealla AFR tavoitteen poikkeama normaalista lämpötilan mukaan. Vasemmalla kylmäkäyntirikastuksen vanhat arvot näkyvät pistekatkoviivalla ja uudet ohjelman ehdottamat yhtenäisellä viivalla. Testissä saatiin 10102 näytettä, joista 261 hylättiin suodatusehtojen perusteella. Liian suuri kaasuläpän avaus tai Lambda-anturin aloitusviive ovat suurimmat syyt näytteen hylkäämiseen. Testin suorituksessa kierrosnopeus pidetään hieman korotetulla tyhjäkäynnillä. Lisäksi Lambda-anturin takaisinkytkentä oli poistettu päältä asettamalla sen auktoriteetti arvoon 0 %. Aloitus tapahtui jäähdytysnesteiden lämpötilan ollessa 16,8 °C, joten kylmemmät lämpötilat ovat ennustettuja. Testin korkein lämpötila oli 83,3 °C. Ohjelman ehdottamat arvot saattavat poiketa oleellisesti, jos kuormitus vaihtelee testin aikana. ”Lambda Error %” oli lopussa 0,66 %, vaikka takaisinkytkentä oli poissa päältä.

3.4 Moottorin tehon arviointi

Tarkoituksena on laskea moottorin teho ja verrata sitä tehtaan ilmoittamaan, joka on liitteessä 2. Moottorin maksimiteho vaikuttaa maksiminopeuteen ja kiihtyvyyteen, jota arvioidaan kiihdytystestillä. Kiihdytystesti voidaan suorittaa suljetulla alueella, koska huippunopeus ylittää yleisellä tiellä sallitut nopeusrajoitukset. Lappeenrannan ilmailuyhdistys järjesti 5.9.2015 Lappeenrannan lentokentällä kiihdytysajo tapahtuman. Kiihdytysajon säännöt ja toimintaohjeet ovat liitteessä 3 ja liitteessä 4 on kiihdytysajon kartta. Tulokset löytyvät osoitteesta: <http://www.liy.fi/>

Moottorin kierrosnopeudesta voidaan laskea auton nopeus, kun tiedetään vaihteiston välityssuhteet, käytetty vaihde ja renkaan koko. Voidaan myös laskea auton nopeudesta moottorin kierrosnopeus, kun tiedetään välityssuhteet. Auton nopeusmittarin lukemaan vaikuttaa renkaan koko, rengaspaineet ja renkaan luisto tienpinnassa. Renkaiden ja tienpinnan välinen luisto voidaan jättää huomiotta, kun nopeuden mittausta suoritetaan tutkalla tai satelliittipaikannuslaitteella (GPS).

GPS käyttää WGS84 karttakoordinaatistoa ja koordinaatit tallentuivat tiedostoon, jonka pääte on ".gpx". WGS84 koordinaatiston tarkkuus on noin metrin luokkaa ja tiedot ovat XML muodossa. Tiedostoon on tallennettu nopeus metreinä sekunnissa. Keskinopeus saadaan myös laskemalla koordinaatti muutoksesta ajan muutoksen suhteen. Jotta kiihdyttävä voima voidaan laskea, on tiedettävä kiihtyvyyden. Auton liikettä vastustaa pyörien vierintävastus ja ilmanvastus. Moottorin voima välittyy kytkimen kautta vaihdelaatikolle ja vaihdelaatikolta vetäville pyörille. Vierintävastuksen yhtälöön 12 vaikuttavat renkaiden ja alustan välinen vierintävastus kerroin μ ja pinnan normaalin suuntainen voima $N = m \cdot g$. Ilmanvastuksen yhtälöön 13 vaikuttavat ilmantiheys ρ , auton nopeus v , ot sapinta-ala A ja muotokerroin C_d . Laskennassa käytetään muotokerrointa 0,34 ja ot sapinta-ala $2,027 \text{ m}^2$. Kiihdytystesteissä 1 ja 2 ilman lämpötila oli $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kostea keli. Ilmanpaineeksi MS2 antoi $98,4 \text{ kPa}$. Ilmantiheydeksi voidaan laskea $1,19 \text{ kg/m}^3$. Testissä 3 ilman lämpötila oli $9 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kuiva keli. Ilmanpaineeksi MS2 antoi $99,1 \text{ kPa}$. Tällöin ilman tiheydeksi voidaan laskea $1,22 \text{ kg/m}^3$. Jälkimmäisessä tapauksessa ilmantiheys oli 2,5 % suurempi.

$$F_r = \mu \cdot N \quad (12)$$

$$F_d = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A \quad (13)$$

Kiihdytystesteissä 1 ja 2 suurin saavutettu nopeus oli molemmissa 186 km/h. Ensimmäisessä testissä tämä saavutettiin viitosvaihteella kierrosnopeudella 4720 RPM. Toisessa testissä nelosvaihteella kierrosnopeudella 5860 RPM. Kiihdytystestissä 3 suurin saavutettu nopeus oli 194 km/h ja tämä saavutettiin kierrosnopeudella 4875 RPM. Erot kuvion 29 teoreettisten ja mitattujen arvojen välillä ovat pienet, mutta erityisesti renkaan säde vaikuttaa välityssuhteeseen. Renkaan säde voi muuttua, kun renkaan lämpötila ja paine kasvavat kiihdytyksen aikana. Renkaan vierimiskehän pituudeksi mittasin 1956 mm, josta renkaan säteeksi saadaan $\frac{1,956\text{ m}}{2 \cdot \pi} \approx 0,311\text{ m}$. Hieman yllättäen nopeusmittari näytti lukematarkkuuden puitteissa samaa kuin GPS. Renkaan kuluessa renkaan säde pienenee ja nopeusmittari näyttää suurempaa nopeutta.

Testissä käytettyjen renkaiden luokitukset olivat: vierintävastus C ja märkäpito A. Testit 1 ja 2 suoritettiin märällä asfaltilla. Testi 3 suoritettiin kuivalla kelillä. Renkaiden vierintävastukseksi arvioin taulukon 10 perusteella 84 N/1000 kg. Tällöin 1400 kg massan liikkeellä pitämiseen tarvitaan voima, jonka suuruus on 120 N.

TAULUKKO 10. Vierintävastus (<http://www.rengas-online.com/FAQs/>)

Luokka	HA-rengas vierintävastus (CR) kg/t	Pakettiauton rengas vierintävastus (CR) kg/t	Kuorma-auton rengas vierintävastus (CR) kg/t
- A -	≤ 6,5	≤ 5,5	≤ 4,0
- B -	6,6 - 7,7	5,6 - 6,7	4,1 - 5,0
- C -	7,8 - 9,0	6,8 - 8,0	5,1 - 6,0
- D -	-	-	6,1 - 7,0
- E -	9,1 - 10,5	8,1 - 9,2	6,1 - 7,0
- F -	10,6 - 12,0	9,3 - 10,5	≥ 8,1
- G -	≥ 12,1	≥ 10,6	-

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

4.1 Moottorin tehon arviointi

Moottorin virityksellä pyritään parantamaan suorituskykyä. Moottorin suorituskyvyn parantamista ovat tehon ja vääntömomentin lisäys, mutta myös polttoainetaloudellisuus ja päästöjen vähentäminen. Moottorin tehoa voi lisätä kasvattamalla virtausta tai parantamalla hyötysuhdetta. Teho lasketaan moottorin kulmanopeuden ja vääntömomentin tulona. Moottorin vääntömomentti on voima, jolla moottori pyörittää kampiakseliin liitettyä kuormaa. Moottorin voima välittyy vaihteiston kautta pyörille ja pyörien liike välittyy alustaan renkaiden kitkan avulla.

Tehoa voidaan arvioida, kun tunnetaan ajoneuvon kiihtyvyyssominaisuudet. Nämä voidaan laskea yleisen liikeyhtälön perusteella seuraavasti yhtälöllä 14. Vierintävastuksen F_R ja ilmanvastuksen F_D voimat on hidastavat liikettä. Mäessä vaadittava lisävoima F_g lasketaan yhtälöstä 15, kun mäen kaltevuuskulma tiedetään. Kaltevuuskulman ollessa nolla jätetään tämä tarkastelematta.

$$F_{tr} - F_r - F_d - F_g = m_v \cdot \frac{dv}{dt} \quad (14)$$

$$F_g = v \cdot m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (15)$$

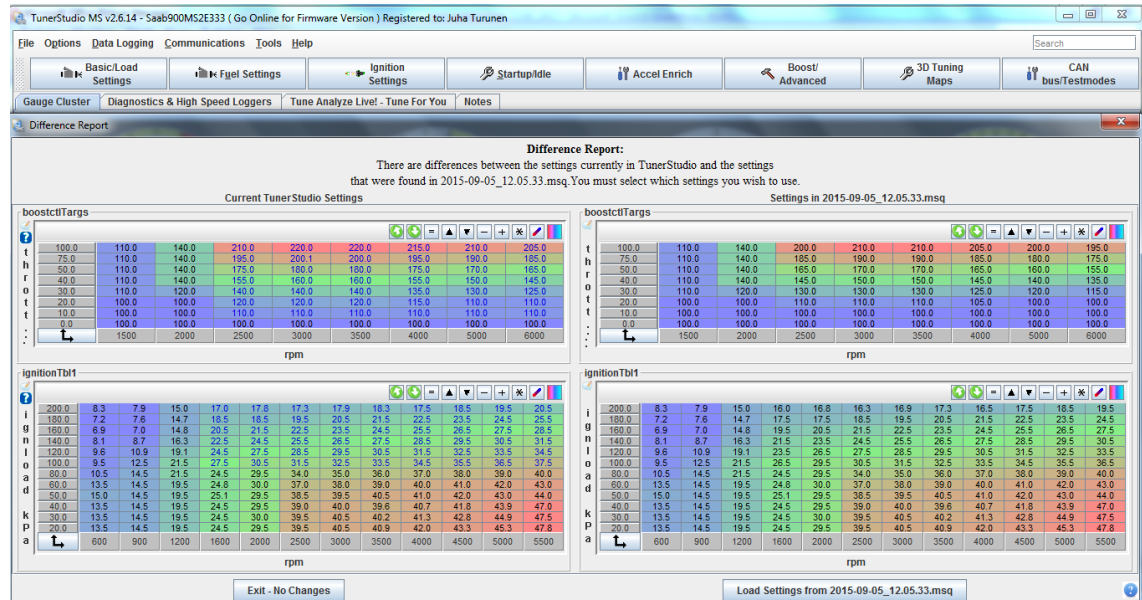
F_{tr} on ajoneuvon vetävistä pyöristä alustaan kohdistama tangentin suuntainen voima. Ajoneuvon massa m_v ja nopeudenmuutos dv/dt . Ajoneuvon nopeus ei muutu, kun voimien summa on nolla. Voiman F_{tr} avulla lasketaan seuraavan yhtälön 16 mukaan vääntömomentti T_{tr} vetävien pyörien akselilla, kun renkaan säde r tunnetaan. Teho P_{tr} saadaan laskettua yhtälöllä 17, kun tiedetään pyörän kulmanopeus ω_{tr} . Teho ei riipu välityssuhteesta, vaikka välityssuhteella muutetaan kulmanopeutta ja vääntömomenttia.

$$T_{tr} = F_{tr} \cdot r \quad (16)$$

$$P_{tr} = T_{tr} \cdot \omega_{tr} = F \cdot v \quad (17)$$

Testi asetusten erot sai valitsemalla *File->Compare Tune*, ja valitsemalla nykyisen lisäksi vertailtavan. Kuviossa 28 esimerkkinä *2015-09-05_12.05.33.msq* -tiedosto. Tässä

näkyvyy vasemmalla viimeksi käytetyt ja oikealla vertailtavan tiedoston asetukset. Vertailu näyttää, että paineen tavoitearvoja on nostettu 10 kPa ja sytytysennakkoa on kasvatettu yhdellä asteella. Testien 1 ja 2 välillä ahtopaine ei kasvanut, vaikka tavoitetta nostettiin 10 kPa. Koska ahtopaineen ohjaus oli rajoitettu samaan maksimiarvoon, niin tavoitteen kasvatus ei auttanut.



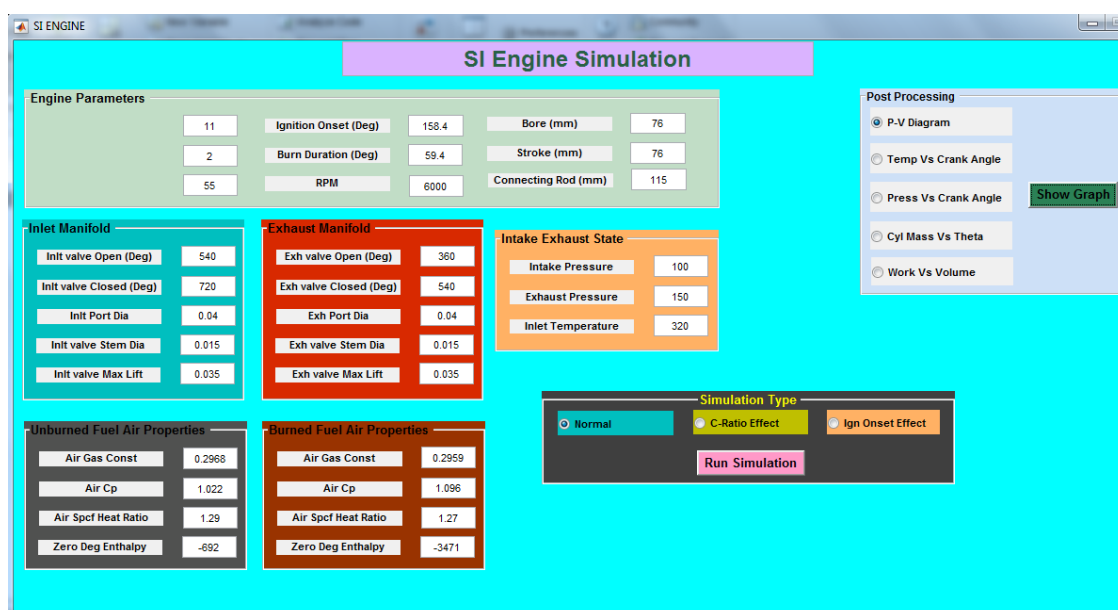
Kuvio 28. Asetusten erot kiihdytystesteissä

4.2 Seossuhteen vaikutus

Ilman ja polttoaineen seossuhde vaikuttaa moottorin tehoon sekä palamisessa syntyviin päästöihin. Polttoainerikkaalla seossuhteella happea on liian vähän täydelliseen palamiseen ja pakokaasuissa on tällöin enemmän hiilimonoksidia ja hiilivetyjä. Seossuhde vaikuttaa myös palamislämpötilaan. Korkeassa lämpötilassa myös typpi reagoi hapen kanssa ja syntyy typenoksideja NO ja NO₂. Typenoksideja voidaan vähentää joko estämällä niiden syntyminen tai käsittelemällä pakokaasuja. Pakokaasun lisäys imuilman sekaan alentaa palolämpötilaa ja tämä vähentää typenoksideja. Katalysaattoria käytettäessä seossuhteen tulee olla lähes stoikiometrinen.

4.3 Sytytyksen ajoituksen vaikutukset

Kuviossa 29 on MATLAB ohjelma *SI Engine Simulation*, jonka on kehittänyt Rakesh Mandal. Tällä ohjelmalla voi simuloida sytytyksen ajoituksen vaikutusta ja simulointi tuottaa tulokseksi esimerkiksi kiertoprosessin P-V kuvaajan. Palotilan tilavuus V muuttuu männän liikkeen mukaan ja paineeseen P vaikuttaa tilavuus sekä palamisessa syntyvä lämpö. Simulointi huomioi venttiilien ajoituksen, mutta esimerkiksi palamisaika pitää arvata. Simulointia varten tarvitaan moottorin teknisiä mittoja. Kaasuvakiot ei-palaneelle ja palaneelle ilmaseokselle jätin perusasetuksiin. Simulointi ei vastaa täysin todellisuutta, mutta tällä voi hahmottaa mihin suuntaan eri parametrit vaikuttavat.

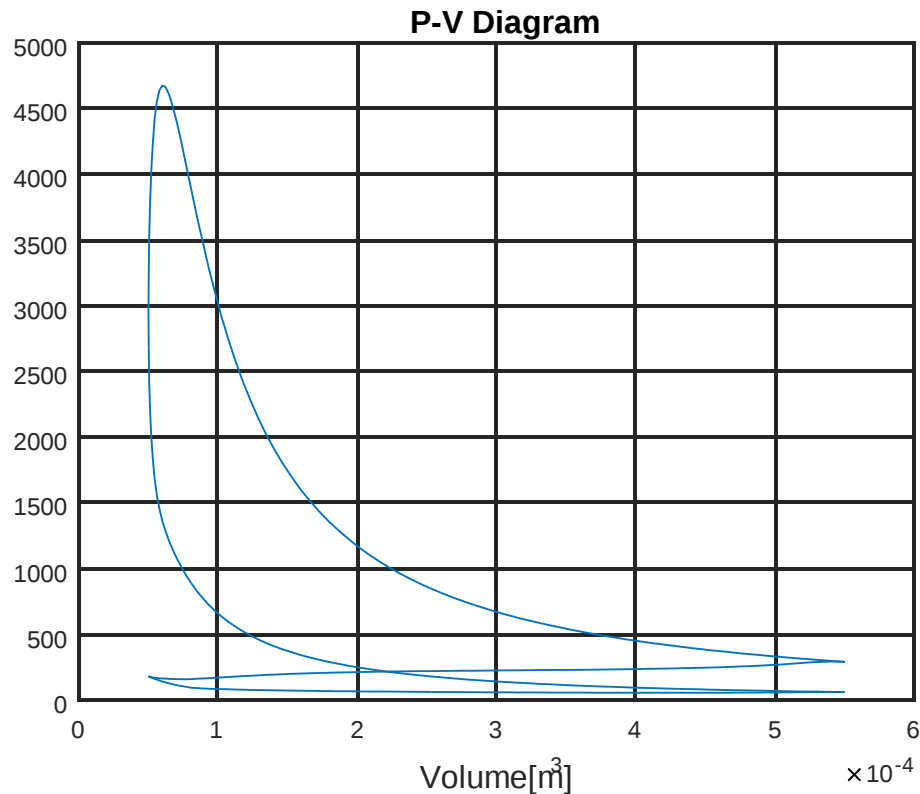


Kuvio 29. Moottorin simulointi-ohjelma perustilassa.

Useisiin simuloinnin parametreihin joutui antamaan sivistyneen arvauksen, koska näitä on vaikea mitata. Simulointi käyttää oletuksena metaanin (CH_4) ominaisuuksia. Muille polttoaineille tulee etsiä sopivat kertoimet kohtiin ”Unburned Fuel Air Properties” ja ”Burned Fuel Air Properties”. Sytytyksen alkupiste asetetaan kohdassa ”Ignition Onset”. Asteet ovat laskettuna puristustahdin alusta, joten $158,4$ tarkoittaa $180 - 158,4 = 21,6$ astetta ennen yläkuoloa. Muita laskennassa vaikuttavia parametreja ovat:

- Paloaika (Burn Duration)
- Kierrosnopeus (RPM)
- Imusarjanpaine (Intake Pressure)
- Pakosarjanpaine (Exhaust Pressure)
- tulevan ilman lämpötila (Inlet Temperature)

Kiertoprosessin P-V kaavio antaa työkalun arvioida eri parametrien vaikutuksia. Kuviossa 30 käyrä muodostaa kaksi suljettua aluetta, joista alempi on prosessissa tapahtuvat pumppaushäviöt ja ylempi on prosessista ulos saatava työ. Yhden työ kierroksen työmäärä saadaan teoriassa vähentämällä ylemmästä suljetusta pinta-alasta alempi.



Kuvio 30. Kiertoprosessin P-V kaavio, jossa tilavuus [m^3] ja y-akselilla paine [kPa].

Kuviossa 31 ohjelmalle on kerrottu sylinterin halkaisija, männän iskunpituus, kiertokangen pituus, puristussuhde, kiertokangen ja iskunpituuden suhde sekä venttiilien ajoitukset ja mitat. Kuviossa 31 esitetyillä arvoilla simuloitiin kuvion 34 mukaiset käyrät, muuttaen vain sytytyskulmaa ja kierrosnopeutta. Ohjelmaa tarkemmin tutkittuani huomasin, että simulointia on yksinkertaistettu, eikä se huomioi näitä kaikkia mittoja.

Kierrosnopeuden kasvaessa ilmanvirtaus sylinteriin kasvaa. Ilmanvirtauksen kasvu aiheuttaa virtausvastuksen kasvua ja sylinterin täyttö ei pysy vakiona. Sytytystä säättämällä pyritään optimoimaan paineen kehittymistä. Kuviossa 32 sytytysennakolla 25 ja kierrosnopeudella 2000 1/min nähdään kuinka liian suurella ennakolla paine kasvaa rajusti ennen yläkuoloa. Paineen liian aikainen nousu jarruttaa mäntää ja rasittaa moottoria.

SI Engine Simulation

Engine Parameters

8.5	Ignition Onset (Deg)	155	Bore (mm)	90
1.718	Burn Duration (Deg)	60	Stroke (mm)	78
55.6	RPM	6000	Connecting Rod (mm)	134.01

Inlet Manifold

Inlt valve Open (Deg)	530
Inlt valve Closed (Deg)	774
Inlt Port Dia	0.042
Inlt valve Stem Dia	0.008
Inlt valve Max Lift	0.0108

Exhaust Manifold

Exh valve Open (Deg)	314
Exh valve Closed (Deg)	558
Exh Port Dia	0.0345
Exh valve Stem Dia	0.008
Exh valve Max Lift	0.011

Intake Exhaust State

Intake Pressure	100
Exhaust Pressure	150
Inlet Temperature	320

Unburned Fuel Air Properties

Air Gas Const	0.2968
Air Cp	1.022
Air Spcf Heat Ratio	1.29
Zero Deg Enthalpy	-692

Burned Fuel Air Properties

Air Gas Const	0.2959
Air Cp	1.096
Air Spcf Heat Ratio	1.27
Zero Deg Enthalpy	-3471

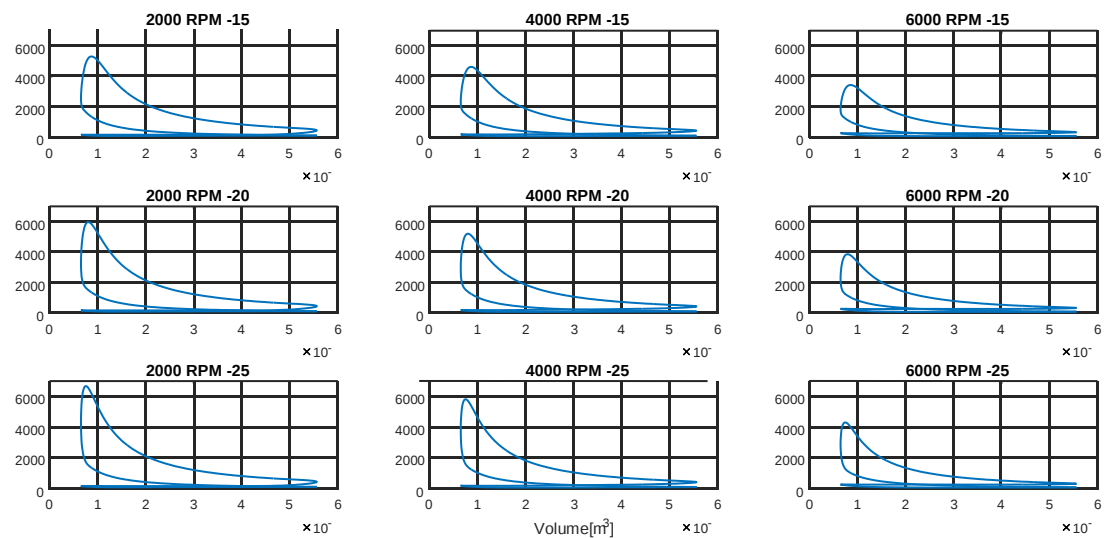
Simulation Settings

☒ Normal

☐ C

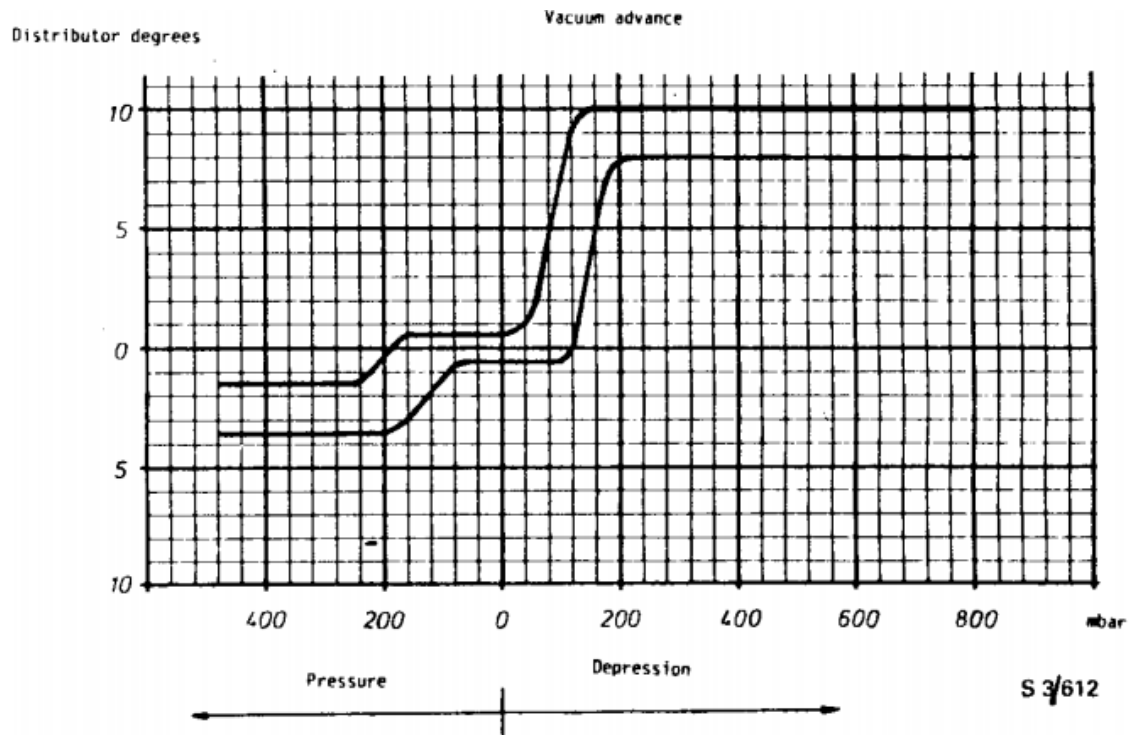
☐ Ru

Kuvio 31. Simuloinnin parametrit moottorille.

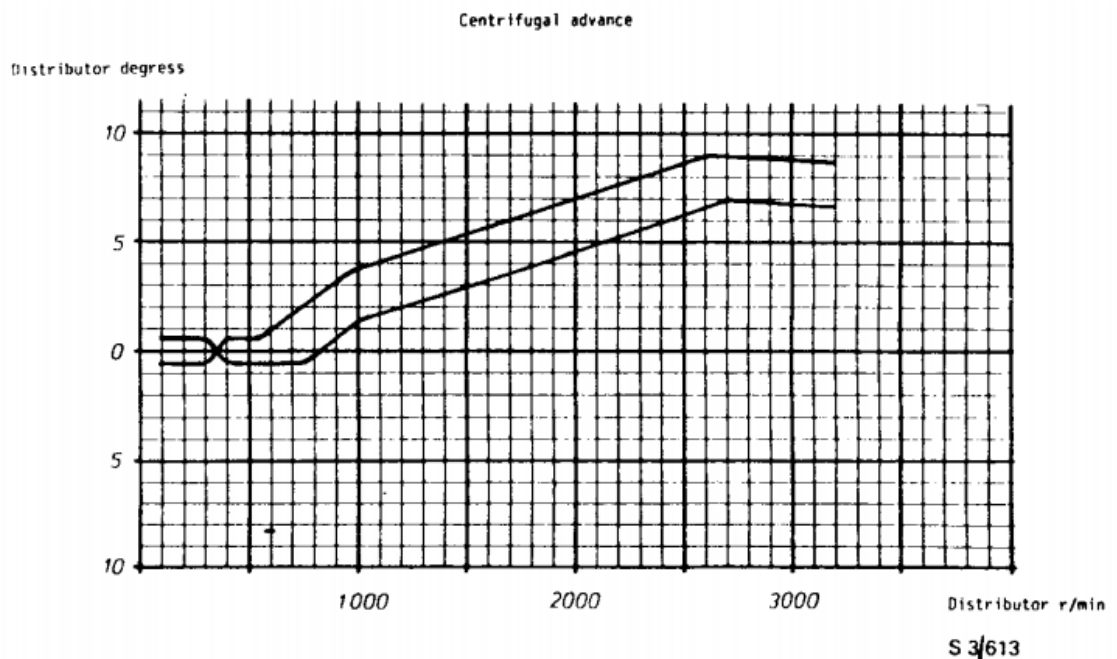


Kuvio 32. Simuloidut P-V käyrät 15, 20 ja 25 sytytysennakoilla ja 2000, 4000 ja 6000 1/min kierrosnopeuksille.

Moottorin alkuperäinen sytytyksen ohjaus oli toteutettu mekaanisella ennakonsäädöllä virranjakajassa. Sytytysennakko riippui kierrosnopeudesta kuvion 33 mukaisesti ja imu-sarjan paineesta kuvion 34 mukaisesti. Sähköisen sytytyksensäädön käyttöönotossa me-kaaniset säädöt lukittiin, jolloin ennakko riippui vain sytytyskartasta.



Kuvio 33. Sytytysennakonsäätö paineen avulla (Saab 900 korjaamon käsikirja)



Kuvio 34. Sytytysennakonsäätö kierrosnopeuden avulla (Saab 900 korjaamon käsikirja)

Sytytysennakko kasvaa kierrosnopeuden kasvaessa ja imusarjan paineen ollessa pieni. Perussäätö tapahtui moottorin kierrosnopeudella 2000 RPM ja painesäädön poiskytkennällä. Tällöin sytytysennakoksi säädetään ajoituslampulla 20 astetta kampiakselilla. Sytytyskartan voi tehdä perustuen kuvioihin 33 ja 34 tai etsimällä milloin moottori nakutus

havaitaan ja vähentämällä ennakkoa muutamalla asteella. Äänitin nakutusanturin signaalia, koska nakutusta on vaikea kuulla moottorin käydessä.

Äänityksestä oli havaittavissa, että moottorin kuormituksen kasvaessa eräät taajuuskomponentit esiintyvät voimakkaammin kuin toiset. Vertaamalla äänityksen aikaleimaa ja MegaSquirt2 ohjaimesta saatua ”.msl” -tiedostoa, on mahdollista etsiä kuormitusalue, jolla nakutusta tapahtuu. Nakutuksen etsiminen äänityksestä ei ole paras menetelmä, kun signaalissa on paljon kohinaa ja muita moottorin ääniä. Lisäksi signaalin voimakkuus suhteessa äänitystasoon oli väärä ja ääni leikkautui.

Paremmen toimiva ratkaisu on suodattaa signaalista kaistanpäästösuodattimella vain nakutussignaalin taajuusalue ja huippuarvon tunnistuksen avulla muodostaa jännitetaso. Jännitetasoa vertaamalla voidaan selvittää nakutuksen voimakkuus. Nakutusvoimakkuutta kuvaava jännite syötetään ohjaimen vapaana olevaan analogiaporttiin. Vapaita analogiaportteja ovat AD6 (JS5) ja AD7 (JS4). Signaalin voimakkuutta voidaan tarkastella asettamalla portti analogi sisääntuloksi. Nakutukseen perustuva sytytyksen säätöstrategia valitaan ohjelmassa TunerStudioMS Ignition Settings->Knock Sensor Settings. Valittavana on ohjaustavat:

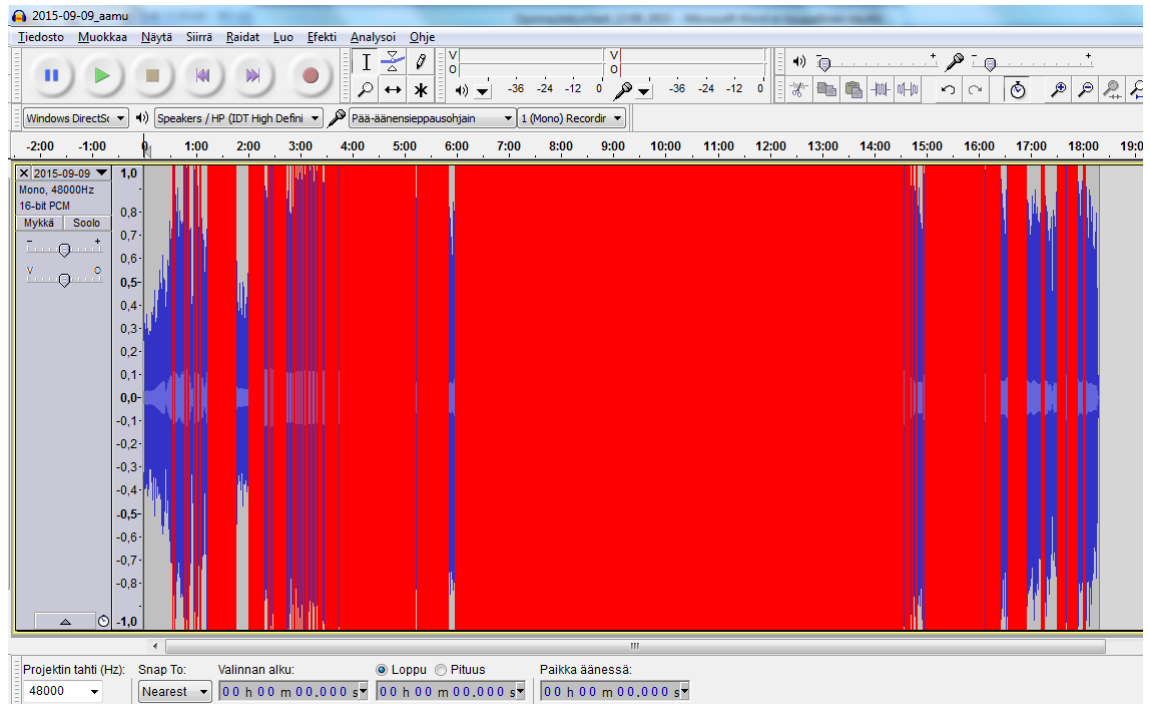
- Disabled
- Safe
- Aggressive.

Ensimmäisessä tavassa ei huomioida nakutusanturia. Toisessa tavassa pudotetaan sytytystä yhdellä pykälällä, kun nakutusta havaitaan. Vasta kuormituksen muutos palauttaa sytytyksen takaisin oletukseen. Viimeinen pudottaa sytytystä aina yhdellä pykälällä, jos nakutusta havaitaan. Kun nakutusta ei ole havaittu vähään aikaa nostetaan ennakkoa hitaasti, kunnes nakutus havaitaan ja pudottaa sitten ennakkoa.

Äänitykseen ja äänisignaalin tutkimiseen käytin ohjelmaa *Audacity*. Kuviossa 35 on esitetty ohjelma ja äänitetty signaali pituudeltaan noin 18 minuuttia. Signaalista nähdään heti, että sen voimakkuus on liian suuri. Signaalin tulee olla alle 70 % maksimista, jotta voidaan olla varmoja, ettei signaalin leikkautumista tapahdu.

Nakutusanturin signaali on analoginen, joka muunnetaan äänityksessä A/D -muuntimen avulla digitaaliseen muotoon. Signaalin maksimialueen ylittäminen aiheuttaa säröä sig-

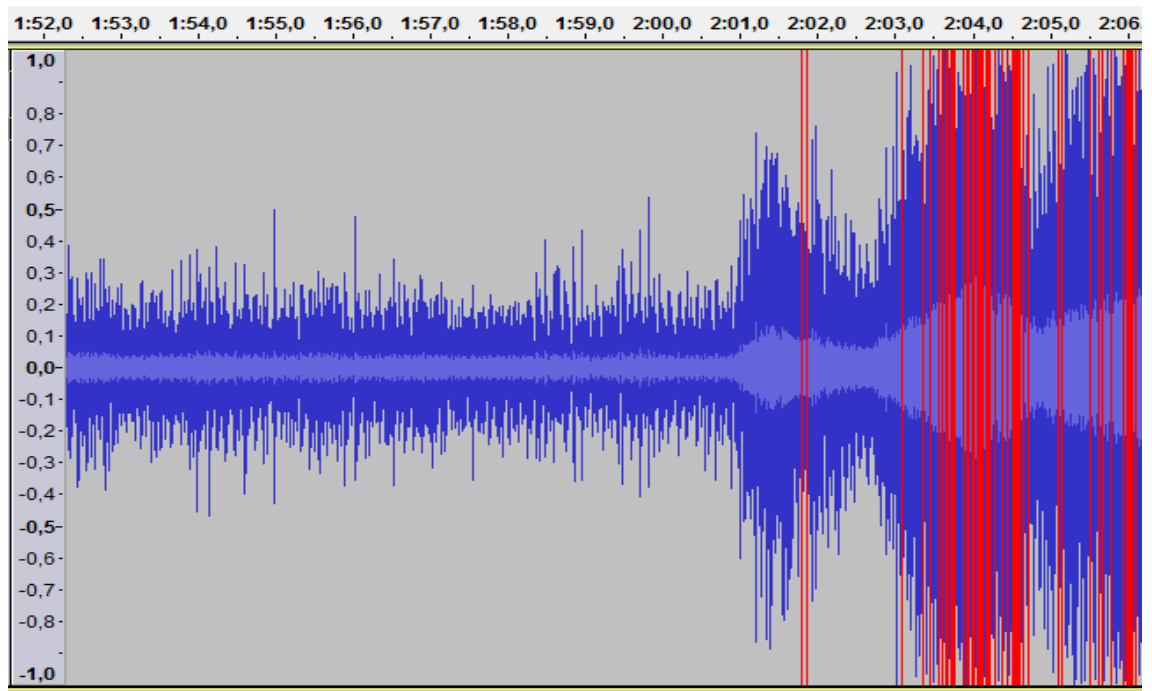
naaliin. Säröytyneessä signaalissa näyttää olevan taajuuksia, joita ei alkuperäisessä olutkaan. Taajuusvaste vääristyneestä signaalista johtaa yleensä vääriin tuloksiin.



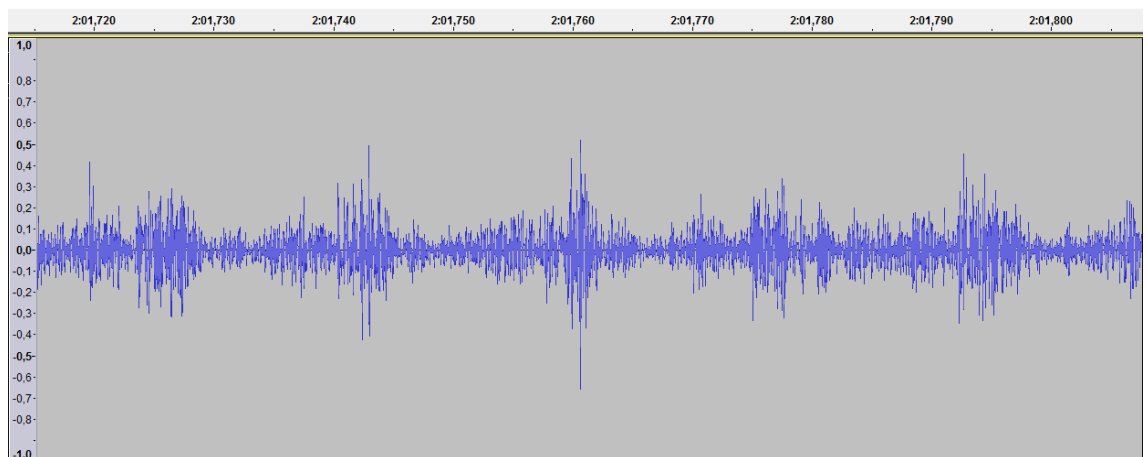
Kuvio 35. Nakutusanturia on äänitetty Audacity -ohjelmalla

Äänityksen maksimi oli $\pm 2 \text{ mV}_p$. Nakutusanturin datalehden perusteella taajuusalue on 1–20 kHz. Anturin herkkyys taajuudella 5 kHz on $26 \pm 8 \text{ mV/g}$. Anturin lämpötilariippuvuus $< 0,06 \text{ mV}/(g \cdot ^\circ\text{C})$ tarkoittaa, että kylmällä moottorilla signaalin voimakkuus on pienempi. Mittausalue on 0,1–400 g, jossa $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Tällöin signaalin voimakkuus ylittää äänitystason jopa mittausalueen alarajalla. Lisäksi signaaliin on summautunut käynnistysmoottorin, suuttimien ja venttiilien äänet.

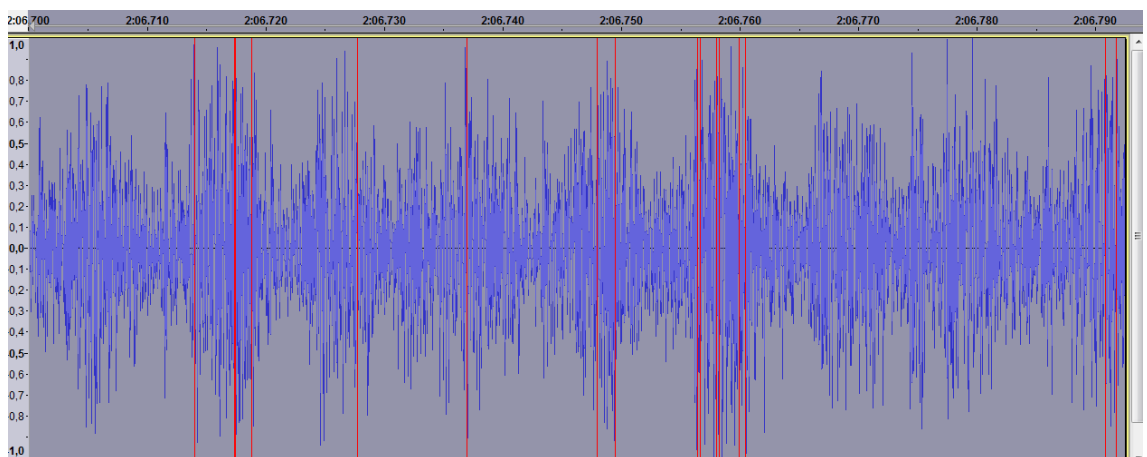
Kuviossa 36 on tarkempi näkymä signaaliin ja hetkellä 2:01,0 oli liikkeelle lähtö, jolloin moottorin kuormitus kasvoi. Hieman ennen liikkeellelähtöä moottori on tyhjäkäynnillä ja kuviossa 37 näkyy 5 kappaletta pulssiryhmiä, jotka vastaavat moottorin työtahteja. Kuviossa 38 moottoria on kevyesti kuormitettu. Taajuusvasteet tyhjäkäynnillä ja kevyessä kuormituksessa ovat kuvioissa 39 ja 40.



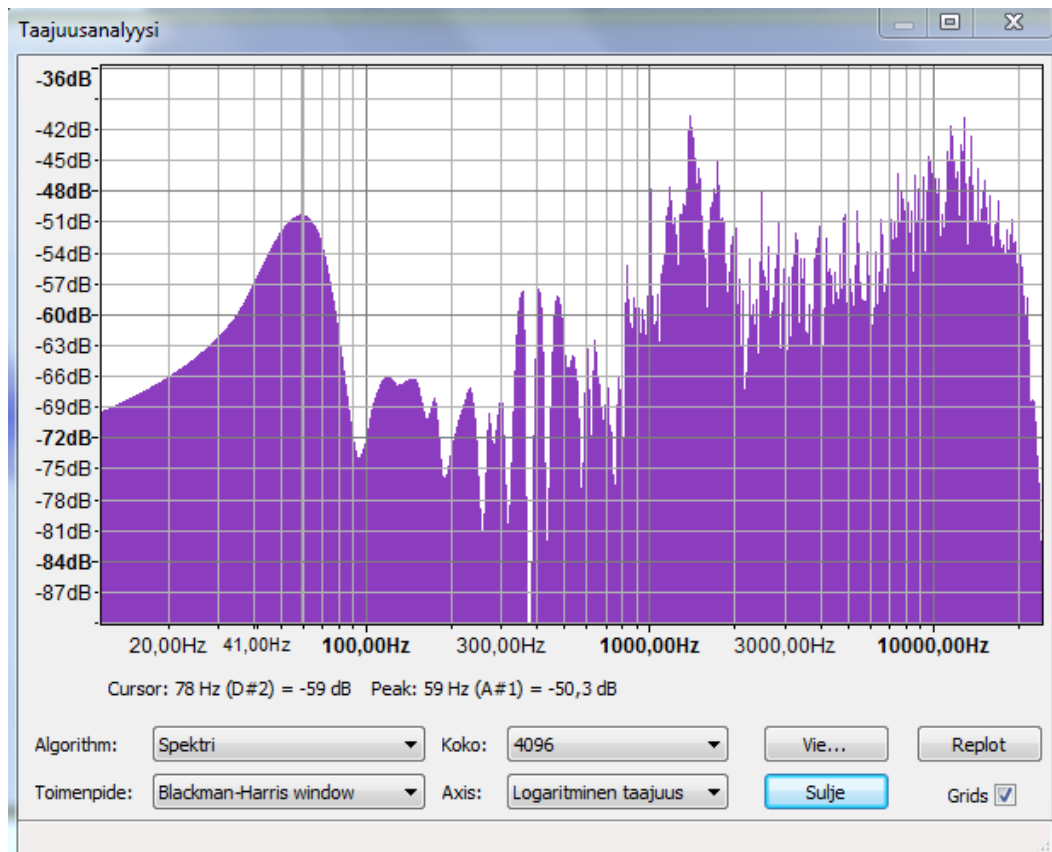
Kuvio 36. Tarkempi yleisnäkymä nakutusanturin signaalista



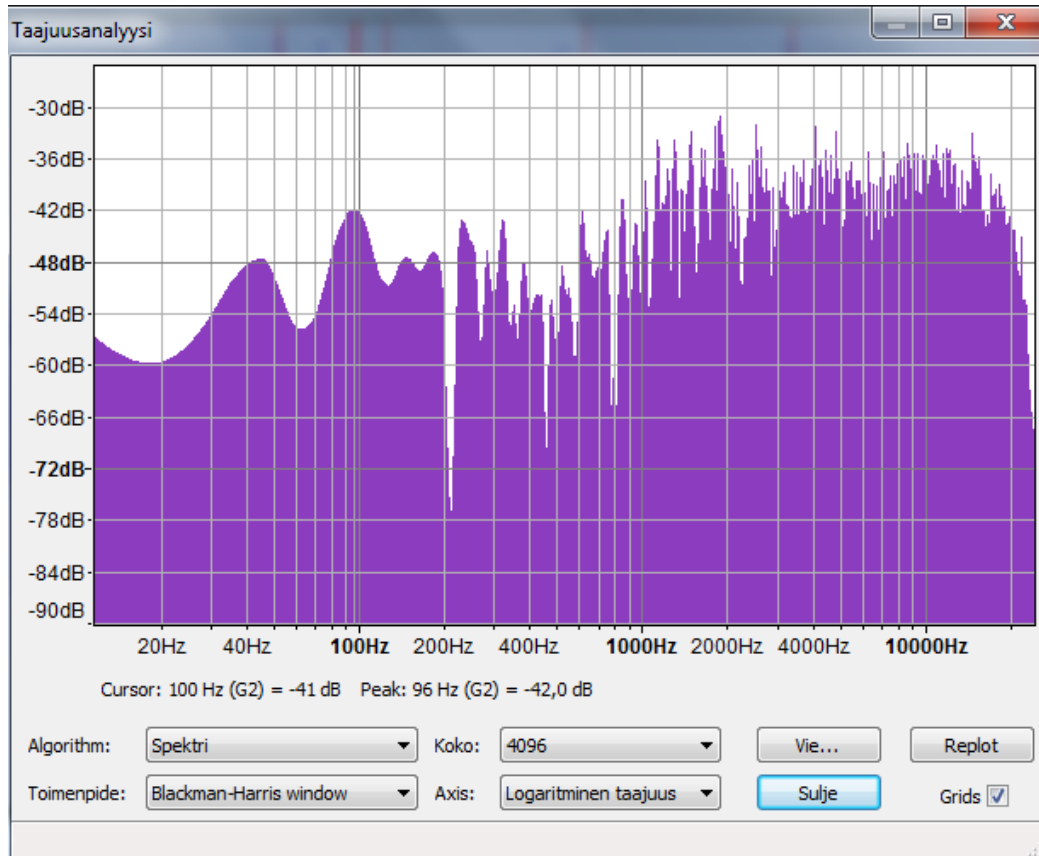
Kuvio 37. Nakutusanturinsignaali, kun moottori on tyhjäkäynnillä



Kuvio 38. Nakutusanturin signaali, kun moottoria kuormitetaan kevyesti



Kuvio 39. Taajuusanalyysi, kun moottori on tyhjäkäynnillä

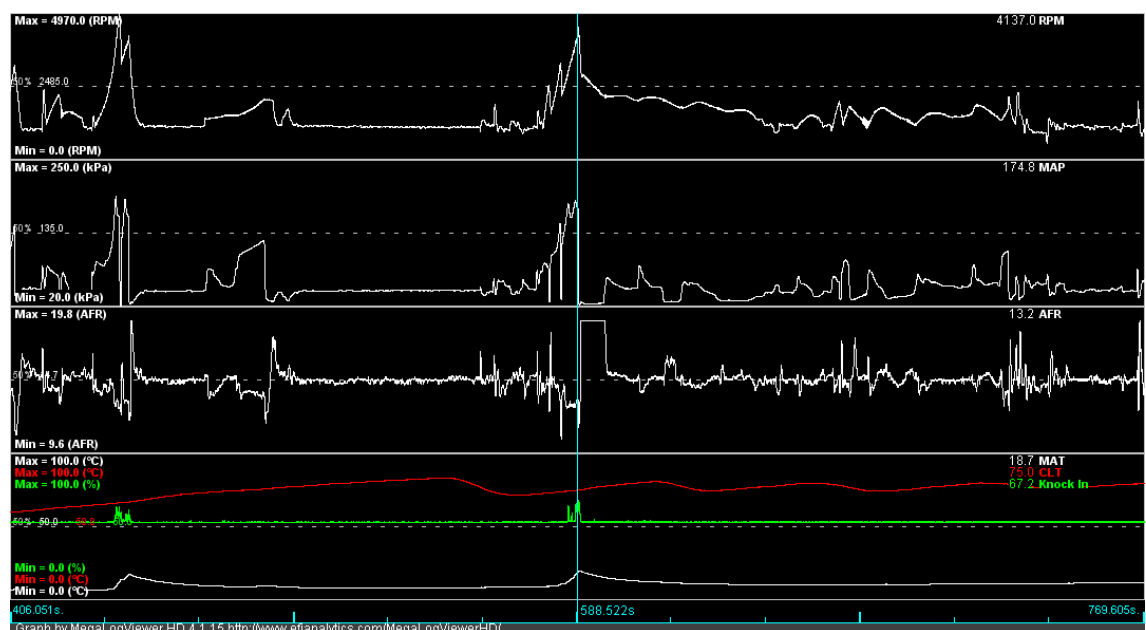


Kuvio 40. Taajuusanalyysi, kun moottori kuormituksessa

Kuvioista 37 ja 38 havaitaan, että signaalin voimakkuus kasvaa ja kuormituksessa mitausraja ylittyy hieman. Taajuusvastekuvioista 39 ja 40 havaitaan, että signaalin voimakkuus kasvaa eniten välillä 3–9 kHz. Koko mitatulla alueella signaalin voimakkuus kasvoi 6 dB, mutta tällä yhdellä alueella signaalin voimakkuus kasvoi noin 20 dB.

Nakutusanturin äänittämistä ei jatkettu, koska suuremmilla kuormituksilla signaali leikautuu ja säröytyy. Nakutuksen tunnistus voidaan toteuttaa suodattamalla ensin signaalia korkeat ja matalat taajuudet. Tätä varten pitää rakentaa kaistanpäästösuodatin, joka vahvistaa tietyn taajuusalueen ja heikentää muut. Suodatettu signaali ohjataan huippuarvon tunnistimeen ja tämä signaali vahvistetaan. Vahvistettu signaali syötetään MS2 ohjaimeen, jolloin voidaan erottaa, millä hetkellä nakutusta tapahtuu. Tällöin myös sytytysennakkoa voidaan vähentää ja estää nakutuksen jatkuminen.

Kuviossa 41 näkyy kuinka kuormituksen kasvu aiheuttaa nakutusta ja nakutuksen tunnistin nostaa signaalitasoaan. *Knock In* -signaali on normaalisti noin 53 % ja kasvaa sen mukaan, kuinka voimakas nakutus havaitaan. Tunnistin on suunniteltu vahvistamaan signaalia taajuusalueella 5,5–7,0 kHz noin 12 dB. Alle 4 kHz ja yli 8 kHz taajuudet vaimennetaan. Kuviossa 41 havaittu 67 % signaali tarkoittaa noin 200 mV anturisygnalia. Anturin herkkyys on 26 ± 8 mV/g ($1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$). Värähtelyn kiihtyvyys on noin 75 m/s^2 . Vertailun vuoksi Lambda-anturin Bosch LSU4.2 värähtelyn sietoraja on korkeintaan 300 m/s^2 .



Kuvio 41. Nakutuksen tunnistus

4.4 Moottorin käyttäytyminen muutostilassa

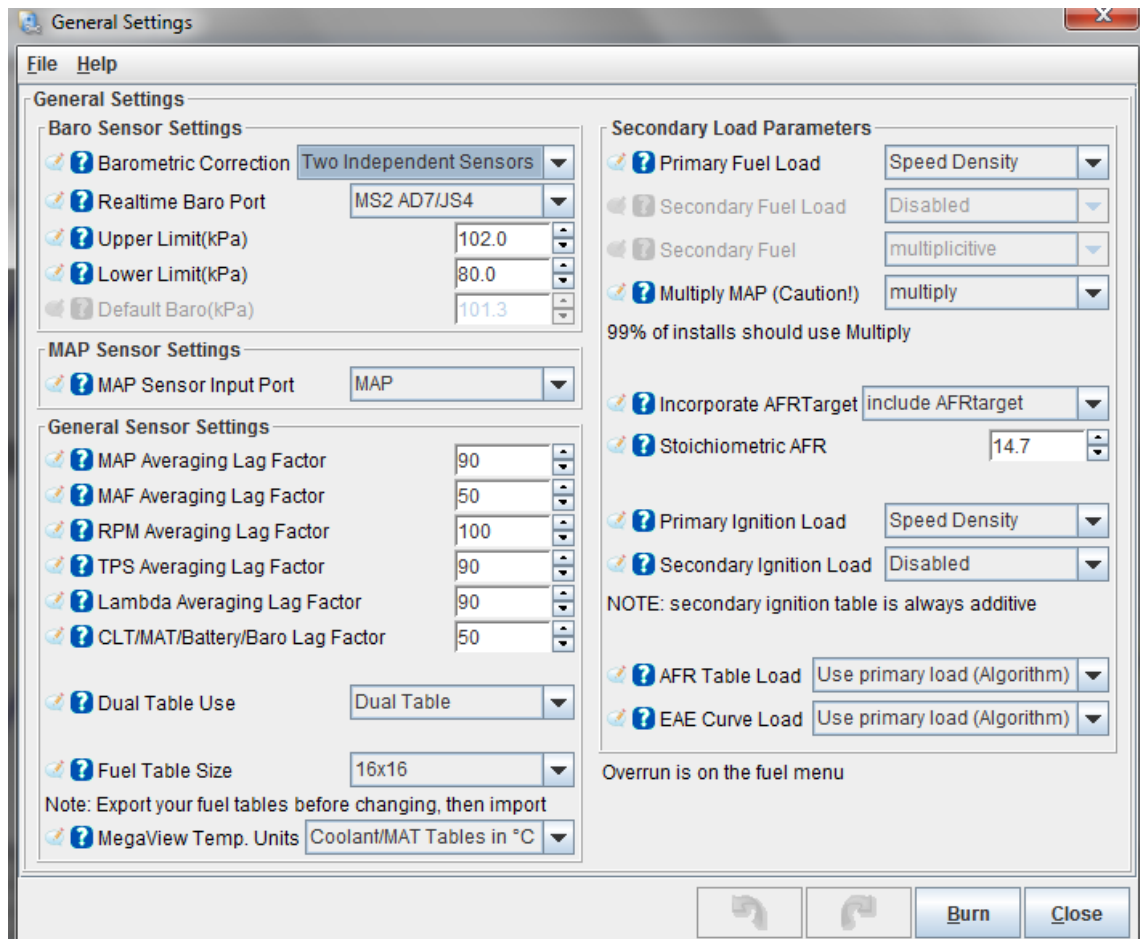
Muutostilat voidaan jakaa nopeisiin ja hitaisiin ilmiöihin. Alle 200 ms ajassa tapahtuvat muutokset ovat useimmiten voimansiirtoon liittyvää värähtelyä. Vauhtipyörä vaimentaa massansa avulla vaihdelaatikon ja moottorin välillä syntynyttä värähtelyä. Moottorissa polttoaineen palaminen ja siitä aiheutuva paineimpulssi painaa mäntää alaspäin. Mäntän edestakainen liike muutetaan kiertokangen avulla kampiakselin pyöriväksi liikkeeksi. Paine laskee, kun mäntä liikkuu alaspäin.

Ruiskutussuuttimilla käytettävissä oleva aika riippuu käänteisesti kierrosnopeudesta. Suuttimien aukioloaika on yleensä alle 25 ms ja tyhjäkäynnillä lähestytään 1 ms aikaa. Suuttimen aukeamisaika on noin 0,7–1,1 ms. Imusarjaan ruiskuttaminen tuottaa esisekoittuneen seoksen, joka siirtyy moottoriin, kun imuventtiili aukeaa. Kaasuläpän avaaminen kasvattaa virtausta ja painetta imusarjaan, jolloin seos muuttuu laihemmaksi. Tätä voidaan kompensoida AE ja EAE rikastuksilla. AE reagoi kaasuläpän ja/tai paineen muutosnopeuteen. EAE huomioi polttoainemäärän, joka on imusarjassa ja paljonko tästä arvioidaan päätyvän moottoriin.

Lämpötilan muutosnopeuteen vaikuttaa lämpötehon summa ja sekä aineen lämpökapasiteetti. Palamislämpötilalla on vaikutusta pakokaasupäästöihin ja palamisreaktion nopeuteen. Jäähdytysnesteen lämpeneminen kylmäkäynnistyksestä kestää useita minuutteja. Ajonopeus ja ilman lämpötila vaikuttavat jäähdytyksen tehokkuuteen jäähdytyskennon koon lisäksi.

Moottorin ohjauksessa käytetään korjaustaulukoita akkujännitteelle BattV, paineille MAP ja Barometer, lämpötiloille MAT ja CLT sekä kierrosnopeudelle RPM. Mitattaville arvoille käytetään digitaalista suodatusta. Suodatustapana on eksponentiaalinen suodatus, jossa mitattua arvoa painotetaan kertoimella ja edelliset mittaukset suppenevat eksponentiaalisesti. Suodatuksessa käytetään kertoimia ”Lag Factor” [%] (kuviossa 42). Nämä kertovat kuinka paljon mittaus muuttuu edellisestä. Jos mittauksessa havaitaan paljon nopeaa vaihtelua, niin kertoimilla voi yrittää tasoittaa mittauksia. Pienillä kertoimilla saadaan enemmän suodatusta, mutta myös enemmän mittausviivettä. Viive tekee moottorin ohjaamisen vaikeaksi ja vasteen huonoksi.

Kuviossa 42 ”Dual Table” on otettu käyttöön, jolloin suutinryhmälle 1 käytetään taulukoita VE1 ja AFRtarget1 ja suutinryhmälle 2 vastaavasti käytetään taulukoita VE2 ja AFRtarget2. EAE rikastusta ja ”Alternate” suuttimien ohjausta käytettäessä se tarkoittaa myös, että EAE rikastukset lasketaan erikseen molemmille suutinryhmille. Voidaan olettaa, ettei ruiskutettu polttoaine virtaa viereisille sylintereille, koska suuttimet ovat imusarjan putkissa. Taulukoita viritettäessä muutokset tehdään molemmille ryhmille.



Kuvio 42. Yleiset asetukset määrittelevät mittauksien suodatuksen ja taulukot

Turboahtimen paine nousee 100 kPa arvosta 200 kPa arvoon muutamassa sekunnissa. Turboahtimen paineen säädön tulee olla riittävän nopea. Ohjauksen toimiessa 19,5 Hz taajuudella voidaan teoriassa saavuttaa 2 kPa paikannustarkkuus, mutta todellisuudessa mitattu paine (MAP) vaihtelee enemmän. Paineensäädössä on myös magneettiventtiilin ja hukkaportin hystereesiä. Nämä vaikeuttavat paineensäätöä.

Lambda-anturi toimii takaisinkytkentänä ”EGO Control” säädölle, jonka asetukset löytyvät kuviosta 43. Lambda-anturin viive noin 100 ms, johon pitää lisätä työkierron johtuva viive 20–200 ms, sekä pakokaasujen siirtymäviive. Säätimen nopeus halutaan

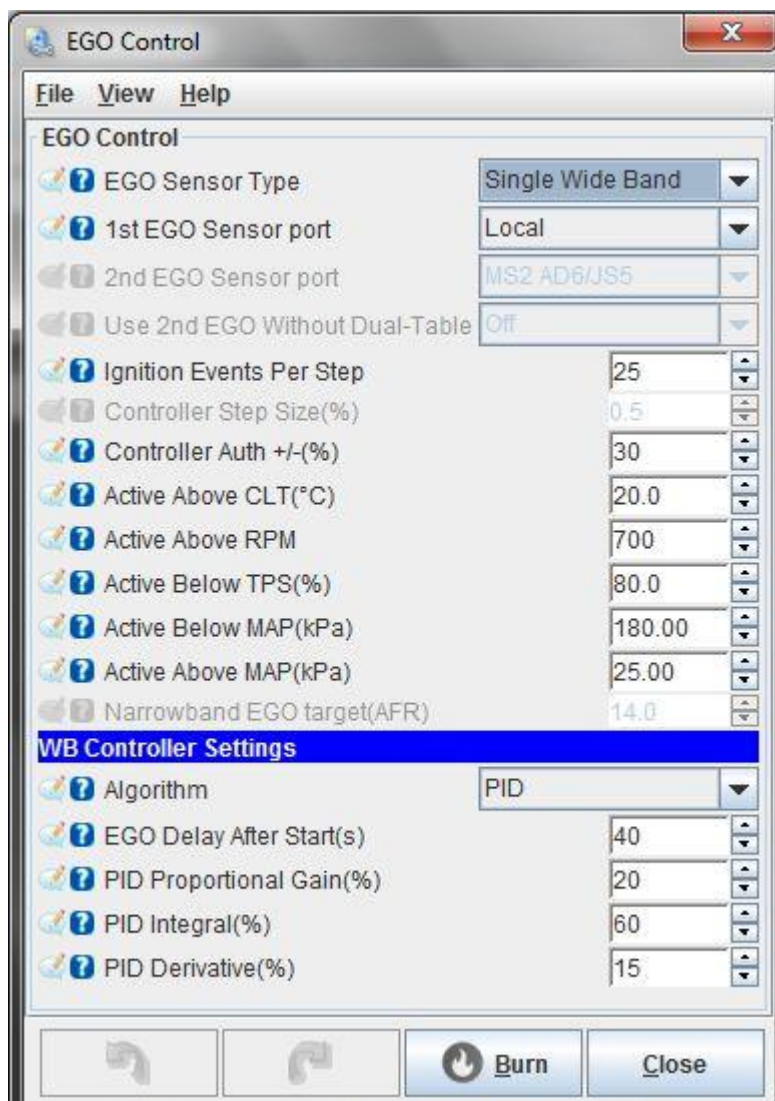
sellaiseksi, että yhden mittausviiveen aikana ei yritetä ohjata kuin kerran. Säätimen ei pidä korjata nopeista muutoksista tulleita värähtelyjä, koska ne vaimenevat itsestään. Lambda-anturin viiveestä voidaan päätellä, että 20–30 sytytysjaksoa on hyvä säätöpiirin nopeus. Säättöpiiri siirtyy avoimen silmukan tilaan, jos asetetut ehdot eivät täyty. Säättöpiiri pidetään tässä tilassa myös käynnistyksen ajan, koska Lambda-anturilla kestää ennen kuin se lämpenee toimintatilaansa. Vaikka säädin on avoimen silmukan tilassa, niin ”AFR target” taulukot vaikuttavat polttoainemääriin. Nämä taulukot ovatkin polttoaineen hienosäätö taulukoita ja näiden käyttö tarkoittaa teoriassa, ettei VE taulukoita tarvitse muuttaa, kun ne on kerran säädetty oikein. Kun säätimelle sallitaan korkeintaan $\pm 30\%$ ohjaus, niin kerroin ”EGO” voi vaihdella välillä 70–130 %. EGO Control on rinnakkaisterminen tyypin C PID-säädin, jota kuvaa yhtälö 18. Yhtälössä 19 erosuure e muodostuu asetusarvosta r ja mittauksesta y . Tyypin A rinnakkaistermistä ideaalista PID-säädintä vastaa yhtälö 20. Tämä voidaan esittää myös yhtälön 21 muodossa. Tyypin A ja C välillä ei ole eroa, kun tarkastellaan häiriökäyttäytymistä, mutta asetusarvon vastetta tarkasteltaessa ero on suuri. Tyypin C säätimessä vain integrointi reagoi asetusarvon muutokseen. Proportionaali reagoi, kun mittaus muuttuu ja derivointi reagoi, kun mittauksen derivaatta muuttuu.

$$u(t) = u(t-1) + k_p(y(t-1) - y(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{dy(t)}{dt}) \quad (18)$$

$$e = r - y \quad (19)$$

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (21)$$



Kuvio 43. Lambda takaisinkytkennän asetukset

Kaasuläpän asennon muuttaminen aiheuttaa virtausvastuksessa muutoksen, jolloin myös ilmanvirtaus moottoriin muuttuu. Kaasuläppää avattaessa ja suljettaessa seossuhde muuttuu, jos mitään korjaavia toimenpiteitä ei tehdä. Paineanturi huomaa imusarjanpaineen muuttuvan, jolloin VE katsotaan uusi polttoainemäärä. Ilmanvirtauksen muutos on kuitenkin niin nopea, että vaaditaan hetkellinen lisärikastus.

4.4.1 Lisärikastukset AE ja EAE

Kuviossa 44 tarkastellaan tilannetta, jossa moottorin kuormitus oli ensin pidetty tasaisena ja kaasuläpän asento (TPS) muuttuu nopeasti. Kaasuläpän avaamisen havaitaan vaikuttavan imusarjan paineeseen (MAP). Lambda-anturin mittaama ilman ja polttoaineen suhde (AFR) muuttuu viiveellä hetkellisesti polttoainelaihaksi. EAE kompensointi lisää

polttoaineen syöttöä kertoimella ”EAE1%”, koska moottorin polttoaine tarve kasvaa. 3,0 sekuntia myöhemmin kaasuläppää suljettaessa polttoaine tarve vähenee ja EAE kompensointi vähentää polttoaineen syöttöä.

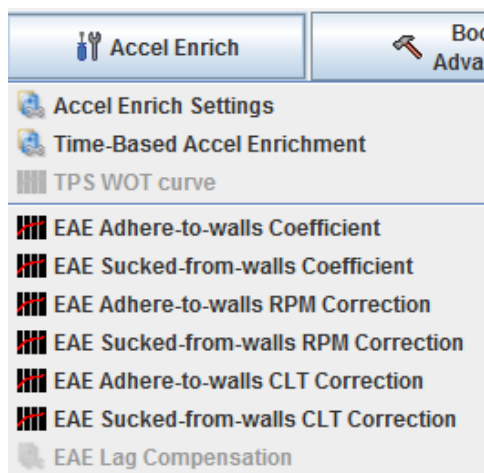


Kuvio 44. Moottorin käyttäytyminen muutostilassa

EAE korjaus oli alkutilassa 100 %, jolloin korjaus oli nolla. Kaasuläpän muutosnopeutta kuvaa ”TPSdot”, joka nousee arvoon 124,9 %/s. Aktivoitumisraja tulee asettaa sellaiseksi, ettei lisärikastus mene päälle signaalihäiriöistä. AE rikastuksessa aktivoitumisrajana oli 500 %/s, jolloin lisärikastus AE oli pois päältä. Tässä tapauksessa EAE korjasi polttoaineen syöttöä arvolla 130 %. Ilman EAE kompensointia AFR poikkeama on suurempi, eikä pysy edes mittausalueella. AFR mittaus nousi alkutilasta 15,0 arvoon 16,7, kun kaasuläpän avaamisesta oli kulunut 200 ± 40 ms. Lambda-anturin kautta tehtävä takaisinkytkentä voi korjata virhettä vasta, kun pakokaasut on mitattu. Muutostila on niin nopea, että takaisinkytkentä ei ehdi reagoida.

Kursorin kohdalla ruiskutuspulssinpituus ”PW” kuviossa 34 oli 3,693 ms. Arvioituksi lisärikastus tarpeeksi lasketaan $3,693 \text{ ms} \cdot (16,7 - 15,0)/14,7 \approx 0,4 \text{ ms}$. Tämä lisäys on helppo tehdä AE rikastuksen taulukkoon, koska tiedetään ”TPSdot” ja lisärikastus tarve. Yksittäinen testi ei kuitenkaan riitä koko taulukon luomiseen. Tulee myös tarkistaa, että muutoksella on toivottu vaikutus. Vaikeutena näissä testeissä on toistettavuus, koska vaikuttavia muuttujia on paljon.

Kuviossa 45 polttoaineen rikastukset muutostiloissa voidaan määrittää TunerStudioMS valikosta Accel Enrich. ”Time-Based Accel Enrichment” tarkkailee ”TPSdot” ja ”MAPdot” arvoja, jotka taas ovat kaasuläpän (TPS) ja imusarjanpaineen (MAP) muutosnopeuksia (kuvio 46). EAE puolestaan perustuu ”Wall Wetting” ilmiön mallinnukseen. Mallia varten pitää määrittää kuusi taulukkoa. Taulukoilla lasketaan kertoimet jäähdytysnesteen lämpötilasta, kierrosnopeudesta ja imusarjan paineesta. ”Adhere-to-walls” taulukot arvioivat polttoaineen tarttumista imukanavien seinämiin. ”Sucked-from-walls” taulukot arvioivat imusarjan seinämiin tarttuneen polttoaineen kulkeutumista moottoriin.



Kuvio 45. Polttoaineen rikastustaulukot



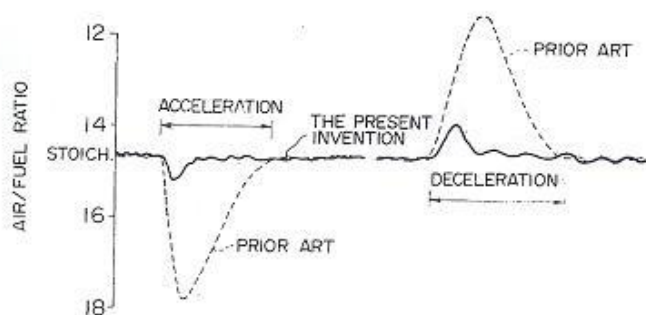
Kuvio 46. Kiihdytysrikastus AE

Käytetyt kiihdytysrikastusarvot olivat pienet, koska käytetään neljää ruiskutusta työkierrosta kohti. Kahdella ruiskutuksella työkierrosta kohti rikastusarvot pitää lähes tuplata. Esitetyt rikastusarvot on etsitty kokeilemalla ja seuraamalla kohtia, joissa ”TPSdot” ja AFR muuttuvat. Kompensoinnin avulla AFR saadaan pysymään paremmin mittausalueella. Lambda-anturin tulkinnessa saattaa esiintyä virhe, jos mittausalueella ei pysytä ja takaisinkytketynsäätimen käyttäytyminen häiriintyy.

4.4.2 Dynaaminen ruiskutusmalli EAE

Moottori voidaan kalibroida tasapainotilassa toimimaan optimaalisella ilman ja polttoaineen suhteella. Parasta tehoa haluttaessa seos asetetaan hieman rikkaaksi ($AFR < 14,7$) ja parasta polttoaine taloudellisuutta haettaessa hieman laihalla ($AFR > 14,7$), ja nämä määritellään kuvion 5 mukaisina alueina. Lambda-anturin takaisinkytketty säätöpiiri pitää huolta, että tavoitteisiin päästää pitkällä aikavälillä. Takaisinkytkentä ei kuitenkaan voi ennustaa, joten tarvitaan ennakoiva kompensointi.

Nopeiden muutoksien kompensointi on välttämätöntä, esimerkiksi kaasuläppää nopeasti avattaessa. Jos kompensointia ei tehdä, niin havaitaan hetkellinen laiha seos moottorin tehossa. Tehon muutos tuntuu kuin jokin ensin jarruttaisi ja sitten työntäisi autoa. Vastaavasti vaihteen vaihtamisen aikana polttoaineen syöttöä voidaan vähentää, koska tehoa ei tarvita. Toyotan patenttihakemus esittelee kompensoinnin, jonka tarkoitus on minimoida muutostiloista syntyvät seossuhteen heilahdukset. Kuviossa 47 katkoviiva kuvaa tilannetta ilman kompensointia.



Kuvio 47. Ennustavan rikastuksen vaikutus seossuhteeseen (Toyota 1983, patentti US4388906)

Ruiskutus suuttimia moottorilla on yksi jokaista sylinteriä kohden ja suuttimia ohjataan pareittain, koska asetuksissa on määritelty neljä ruiskutusta per työkierto ja vuorotteleva ruiskutustapa. Tästä voidaan tehdä päätelmä, että yksi suutin ruiskuttaa kaksi kertaa työkierron aikana ja vain puolet ruiskutetusta polttoaineesta päätyy heti moottoriin. Liitteestä 5 nähdään, että kompensointi tarvitsee noin 20 uutta muuttujaa. EAE rikastuskertoimilla huomiodaan, paljonko aikaisemmista ruiskutuserroista on jäänyt polttoainetta imusarjan seinämiin. Lisäksi laskenta huomioi, paljonko sitä kyseisessä olosuhteissa haihtuu. EAE kompensointi laskee paljonko polttoainetta pitää vielä ruiskuttaa, jotta moottoriin päätyy toivottu määrä.

Alkuarvoiksi taulukoihin määrittelin kuvion 48 mukaiset kertoimet. Näistä muodostuu kokonaiskerroin ”eae_AWC”, jonka yhtälö on esitelty liitteessä 5. Tässä yhtälössä esiintyvälle muuttujalle ”AWF” oletetaan arvoksi 100 %. Lähtötilanteeksi kuviossa 48 on oletettu kaikissa olosuhteissa, että 50 % ruiskutetusta polttoaineesta päätyy imusarjan seinämille. Tämä oletus helpottaa taulukoiden täyttöä. Sitä suurempi rikastusvaikutus havaitaan käytännössä, mitä suuremmat kertoimet taulukoihin asetetaan. EAE -rikastus stabiloituu, kun kokonaiskerroin eae_AWC on alle 48 % ja arvolla 0 % rikastus on sammutettu. Toyotan patentissa esitettyjen käyrien perusteella paineen kasvu lisää seinämiin jäävän polttoaineen määrää. Kierrosnopeuden kasvu vähentää kertymää, koska virtaus kanavissa kasvaa. Matala lämpötila kasvattaa kerrointa, koska polttoaine tiivistyy helpommin kylmiin seinämiin. Patentti ei kuitenkaan käsitellyt tilannetta ahtopaineella.

% (kPa)	Correcti...	RPM (rp...	Correcti...	CLT (deg)	Correcti...
20	50	500	100	-40	100
31	50	1000	100	-29	100
43	50	1500	100	-18	100
56	50	2000	100	-7	100
70	50	2500	100	4	100
85	50	3000	100	15	100
101	50	3500	100	26	100
118	50	4000	100	37	100
136	50	4500	100	48	100
155	50	5000	100	59	100
175	50	5500	100	70	100
196	50	6000	100	81	100

Kuvio 48. ”Adhere-to-walls” taulukot EAE rikastukselle

Liitteessä 5 esiintyvä kokonaiskerroin ”SOW” määrittellään kuvion 49 mukaisilla taulukoilla, jotka määrittävät kuinka paljon EAE algoritmi imusarjaan jääneestä polttoaineesta oletetaan imeytyvän moottoriin. Imusarjan paineen laskiessa polttoaineen höyrystyminen on voimakkaampaa. Virtaus imusarjassa kasvaa, kun kierrosnopeus kasvaa. Lämpötilan nousu lisää höyrystymisnopeutta, jolloin polttoaine kulkeutuu helpommin imusarjan seinämistä moottoriin.

% (kPa)	Correcti...	RPM (rp...	Correcti...	CLT (deg)	Correcti...
20	18.5	100	65	0	70
30	17.5	1000	70	9	80
40	16.4	1500	75	18	85
50	15.4	2000	80	27	88
60	14.5	2500	85	36	90
70	13.7	3000	90	45	91
80	13.0	3500	93	54	92
90	12.4	4000	95	63	92
100	11.9	4500	96	72	92
110	11.5	5000	97	81	94
120	11.2	5500	98	90	96
130	11.0	6000	99	99	100

Kuvio 49. ”Sucked-from-walls” taulukot EAE rikastukselle

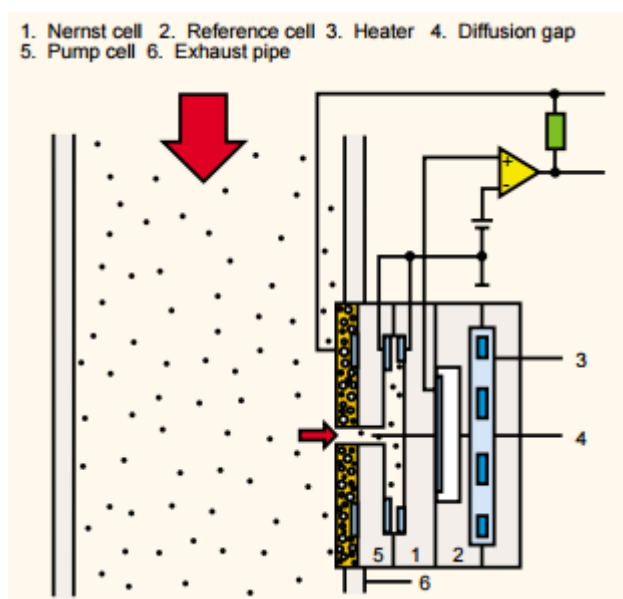
Kuviossa 44 esiintyi hyvin samanlainen ilmiö kuin kuviossa 47 Toyotan patentissa esitetty. Vaikka korjauskerroin oli jo 130 % muutostilanteessa, niin polttoainetta olisi saanut olla enemmän. Kuvion 48 kertoimia ei voida kasvattaa, joten kuvion 49 kertoimia tulee pienentää. Omien testieni perusteella muutostilasta syntyvää häiriötä ei pystytä täysin poistamaan, koska tällöin lähestytään epästabiilia käyttäytymistä.

Liitteessä 6 on mittausdataa, jossa kaasuläppää on avattu kolmen näytteen ajaksi ja sitten suljettu. Kaasuläpän avaus kasvattaa imusarjan painetta, muuttaa seossuhdetta ja aiheuttaa kierrosnopeuden kasvun. Impulssihäiriön vaikutus kestää noin kahden sekunnin ajan. EGO on asetettu kytkeytymään päälle, kun kierrosnopeus on yli 1200 RPM. Tämä on PID -säädin, joka saa asetusarvon AFRtarget1 ja mittauksen AFR. Wallfuel1 on EAE kompensaatioon liittyvä arvio polttoainemäärästä imusarjassa. EAE rikastaa seosta ensin kuuden näytteen ajan ja sitten se yrittää laimentaa seosta. EAE palautuu tasapainotilassa aina korjauskertoimeen 100 %. TPSdot, MAPdot ja RPMdot ovat muutosnopeuksia kyseisillä mittauksilla.

5 MOOTTORIOHJAUKSEN VIRITYS

5.1 TechEdge laajakaistalambda -ohjain

Lambda-anturin avulla voidaan määritellä epäsuorasti ilman ja polttoaineen seossuhde, koska se sijaitsee pakoputkessa ja mittaa pakokaasujen jäännöshapen määrää. Boschin valmistama LSU4.2 koostuu kuvion 50 mukaisesta keraamisesta Nernst pitoisuuskennosta ja happipumppukennosta. Pakokaasu pitoisuuskennoon tuodaan diffuusio raon kautta. Pitoisuuskennon toimintalämpötila on 350–950 °C ja tämän saavuttamiseksi käytetään lämmityskennoa. Pumppuvirran I_p avulla anturin tunnistinosaan tuodaan tai poistetaan happea ja virran suuruudesta ohjain päättelee Lambda-arvon. Pumppuvirta on nolla, kun pitoisuuskennossa on stoikiometrinen tila. Pumppuvirta kalibroidaan ilman happipitoisuuden avulla. Tämä tehdään anturin ollessa irti pakoputkesta ja saadaan yksi kalibroitipiste.



Kuvio 50. Laajakaistalambda-anturin rakenne (Service Tech Magazine/May 2001)

TechEdge A20 -ohjaimen konfigurointi tehdään *WB Util* -ohjelmalla, joka löytyy osoitteesta <http://wbo2.com/>. Yhteys laitteeseen otetaan RS232 -sarjaportin kautta. Liityntäkaapelin voi valmistaa RJ45 johdosta katkaisemalla. Toinen pää tulee Y1 liittimeen kuvassa 51. Katkaistusta kohdasta liitetään RX, TX ja GND -signaalit DB9 liittimeen ja WBlin Y1 liittimen pinnistä 4 kytketään MS2 johtosarjan DB37 liittimessä pinniin 24. Lisäksi Y1 liittimestä pinnin 5 maadoitus kytketään MS2-johtosarjan maadoitukseen.

Lambda-anturin välikaapeli kytketään liittimeen Y3. Toinen pää kytketään Lambda-anturin kaapeliin moottoritilassa. Käyttöjännitteet kytketään liittimeen Y4. PWR johdin suojataan sulakkeella ja kytketään jännitteiseksi ”MAIN” releen kautta kuviossa 4.

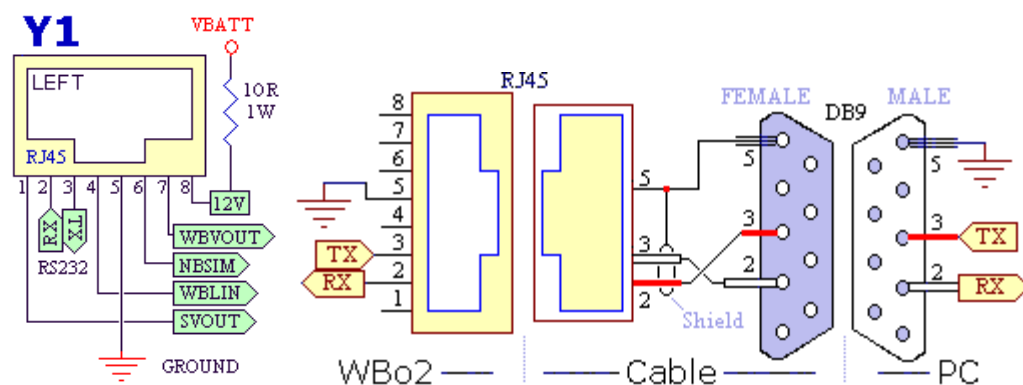


Kuva 9. Liittimet TechEdge 2A0 -ohjaimessa(<http://wbo2.com>)

TechEdge 2A0 mahdollistaa myös mittausdatan keräyksen ja käyttäjä voi kytkeä kuvan 10 liittimeen kolme 0–5 V analogisignaalia, kolme K-tyyppin termoelementtiä sekä kierrosnopeusmittauksen. K-tyyppin termoelementtejä käytetään esimerkiksi pakokaasun lämpötilojen mittaamiseen. Reaaliaikainen tiedonkeräys onnistuu COM1 -sarjaportin kautta ohjelmassa WinLog. Tallennetun mittausdatan katseluun käytetään ohjelmaa WinLogView. Liittimen Y2 mittauksia ei käytetty tässä työssä.

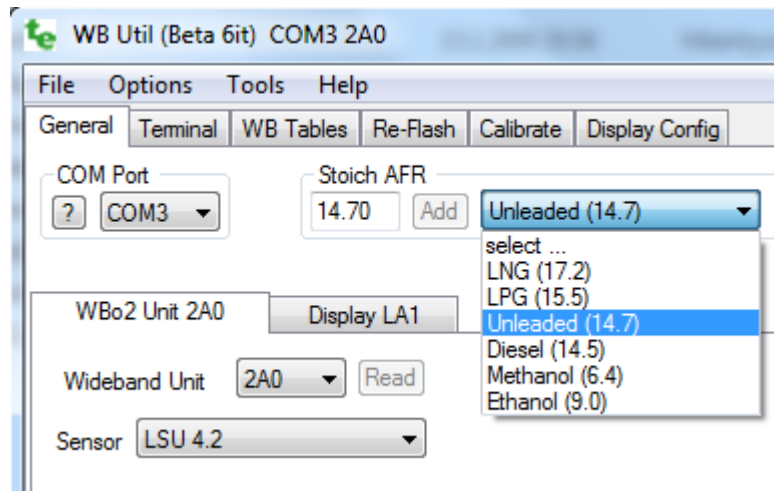


Kuva 10. TechEdge A20 liitin Y2 lisämittauksille (<http://wbo2.com>)



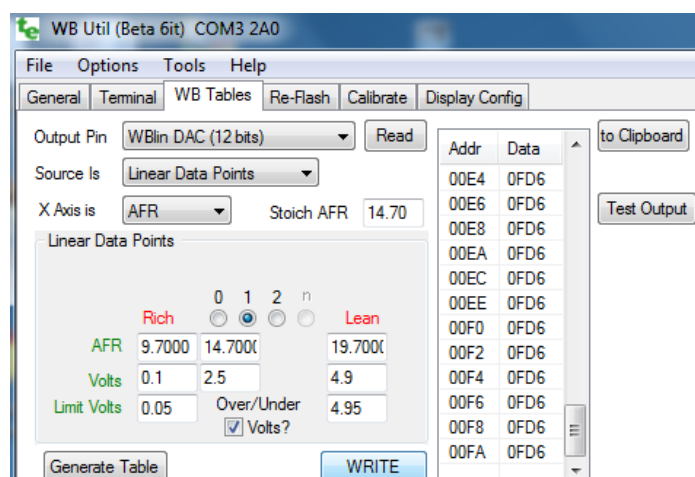
Kuvio 51. TechEdge A20 liittimen Y1 signaalit ja sarjaportin kytkentä tietokoneeseen (<http://wbo2.com>)

”WB Util”-ohjelman ”General”-välilehdeltä valitaan ohjain, anturin tyyppi ja käytettävä polttoaine kuvion 52 mukaisesti. Polttoaineen valinta määrittää laskennassa käytetyn stoikiometrisen AFR-arvon.



Kuvio 52. WB Util -ohjelman yleiset asetukset.

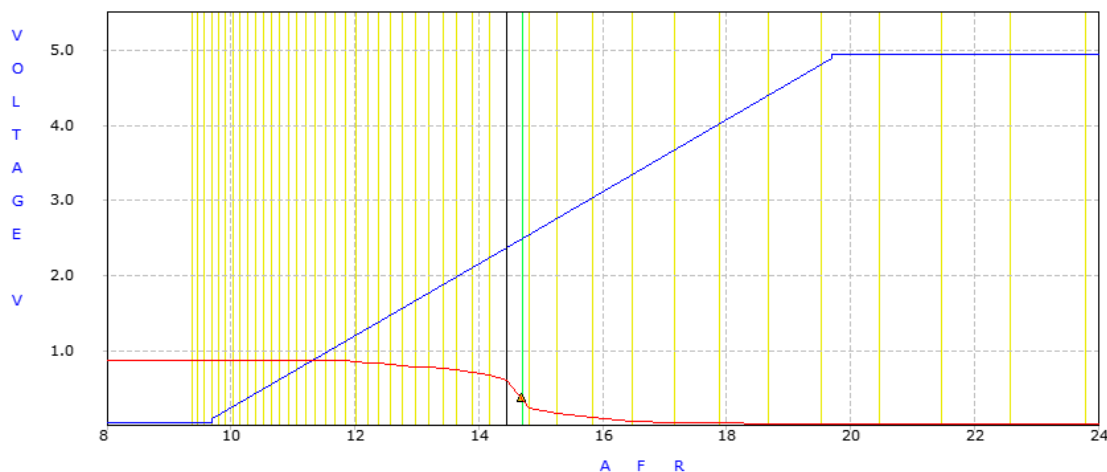
Kuviossa 53 ”WB Tables” -välilehdellä määritetään, kuinka mitatut AFR -arvot muunnetaan jänniteviestiksi. Ohjaimen *WBlin* -ulostuloa käytetään lähettämään jänniteviesti MS2 -ohjaimeen. Ulostulona käytetään tarkempaa 12 bittistä muunnosta. MS2 -ohjain vastaanottaa jänniteviestin, joka mitataan 10 bittisellä muuntimella takaisin digitaaliseen muotoon. Kuviossa 20 asetettuja jännitetasoja käytetään kalibroinnissa, kun määritetään Lambda-anturin jännitetasot MS2 -ohjaimessa.



Kuvio 53. TechEdge 2A0 jännitepisteiden asetukset

Kuviossa 54 näkyy tummansinisellä *WBlin* käyrä, joka määriteltiin kuviossa 53. Matalampi käyrä esittää vertailun vuoksi *NBsim* -ulostulon, joka simuloi kapeakaistaisen

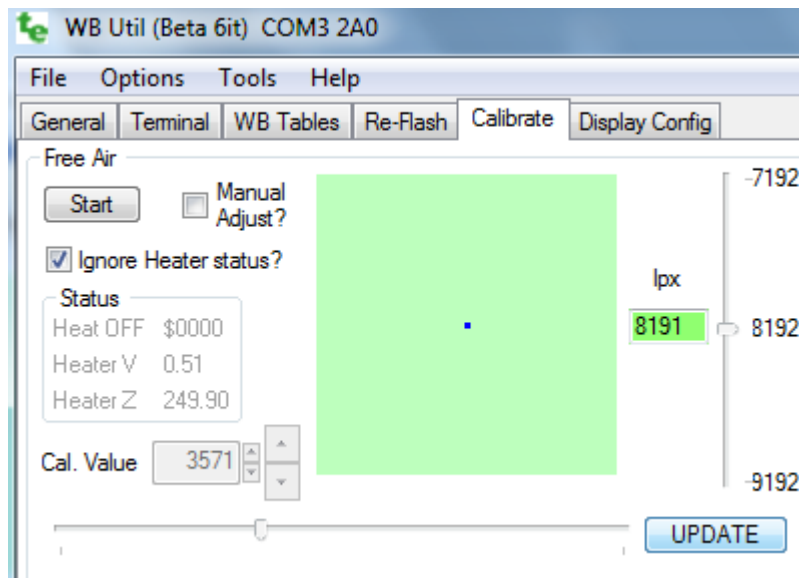
Lambda-anturin tuottamaa jännitettä. Jännitealue vaikuttaa mittaustarkkuuteen ja laaja-kaistaisella anturilla on käytössä suurempi lineaarinen alue.



Kuvio 54. TechEdge 2A0 käyrät jännitelähdöille WBlin ja NBsim.

Anturin kalibrointi määrittää vertailupisteiden sijainnin. TechEdge 2A0 -ohjaimen kalibrointiin käytetään *WB Util* -ohjelman ”*Calibrate*”-välilehteä kuviossa 55. Kalibroinnin aikana Lambda-anturin ohi pitää järjestää pieni ilmanvirtaus, koska muutoin anturin välittömän ympäristön happitasapaino muuttuu ja kalibrointiarvo vaeltaa. Pakokaasujäämät pakoputkessa haittaavat kalibrointia, joten anturi irrotetaan pakoputkesta. Jos anturia ei irrota pakoputkesta, niin mitatun hapen suhteellinen osuus ei ole lähelläkään teoreettista 20,9 tilavuusprosenttia.

Kytkein virran TechEdge 2A0-ohjaimeen ja käynnistin kalibroinnin painamalla ”*Start*” -nappia. Lambda-anturin annoin lämmitä useamman minuutin, jotta se saavuttaa toimintalämpötilansa. Kuviossa 55 vihreällä alueella on punainen piste keskellä ja liikkuva sininen piste. Kun *I_{px}* -arvo on noin 8192 ja pisteet ovat asettuneet toistensa lähelle, kalibrointi on valmis ja voidaan pysäyttää kalibrointi ”*Stop*” -napista. ”*Stop*”-nappi näkyy ”*Start*” -napin tilalla, kun kalibrointi on käynnistetty. Anturilla Bosch LSU 4.2 kalibrointi arvon ”*Cal.Value*” pitäisi asettua välille 3200–3800. Kalibrointi antoi arvoksi 3571, joka on halutulla välillä. Lopuksi hyväksytään painamalla ”*UPDATE*” -nappia, jolloin arvo tallentuu ohjaimen muistiin.

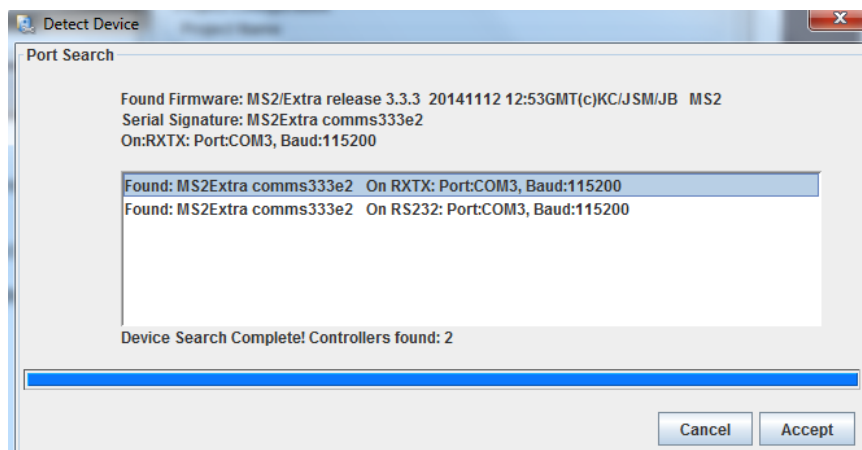


Kuvio 55. TechEdge 2A0 kalibrointi

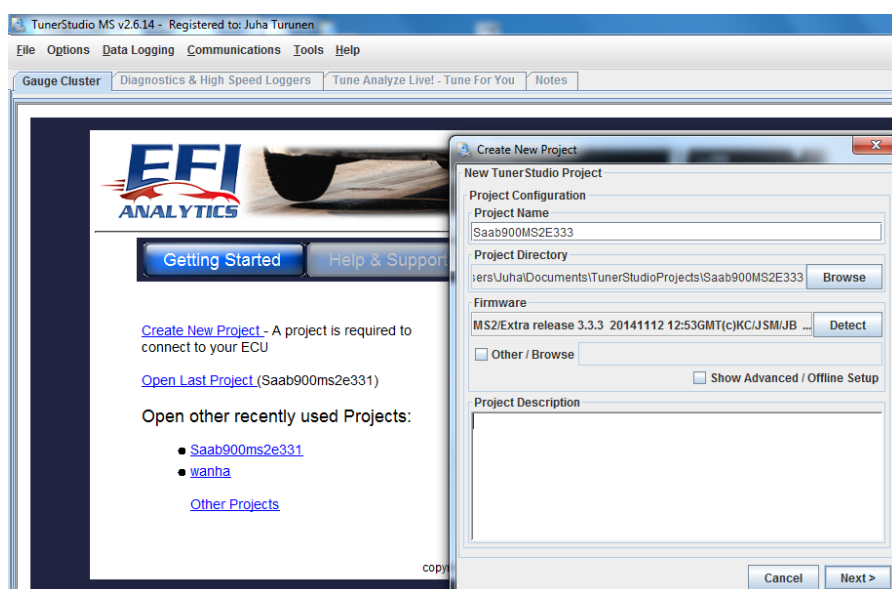
5.2 MS2 -ohjaimen ohjelmistopäivitys

Uusin firmware kirjoitushetkellä oli ”MS2/Extra 3.4.2 release Firmware”, mutta jotkin testit on tehty vanhemmalla versiolla. Sivustolta <http://www.msextra.com/downloads/> ladataan firmware paketti. MS2 -järjestelmän päivittäminen ja virittäminen tehdään sarjaportin kautta. Ohjaimeen kytketään syöttöjännite kuvion 3 tai 4 mukaisesti. Tietokone liitetään RS232 -portin kautta ohjaimeen. Ladattu firmware paketti puretaan omaan hakemistoon ja tiedostosta ”RELEASE-NOTES.txt” voi lukea mitä muutoksia versioiden välillä on. Asennusohjeet löytyvät tiedostosta: ”README.txt”. Päivitys käynnistetään tiedostolla ”ms2loader_win32.exe”. Prosessorille pitää asettaa päivitys jumpperi, ellei aikaisempi firmware ollut MS2/Extra 3.3.x tai uudempi. Kuvassa 2 jumpperi on merkitty tekstillä ”B/LD”.

TunerStudio MS ohjelmassa uusi projekti luodaan kuvion 57 mukaisesti. USB -muunnin tulee määrittää kuvion 56 mukaisesti. Tämä aukeaa valitsemalla *TunerStudio MS* ohjelman *Communications* -valikosta *Communication Settings* ja *Detect*.



Kuvio 56. USB -muuntimen valinta

Kuvio 57. Uuden projektin luominen ja *firmware* tunnistus

5.3 Moottoriohjaimen anturien kalibrointi

Ennen kalibrointia prosessorilla pitää olla *firmware* asennettuna. Tietokoneella otetaan yhteys MS2 -järjestelmään ohjelmalla *TunerStudio MS*. Autossa kytketään virta päälle moottorinohjaimen, mutta ei vielä käynnistetä moottoria. *TunerStudio MS* ohjelmassa valitaan projekti, ellei asetuksissa ole valittuna ”Load Last Project on startup”. Kalibroinnissa määritetään vertailupisteet, joiden avulla mittaukset skaalataan. Termistorien ja Lambda-anturin kalibrointi on lukittu ja lukitus tulee avata, jotta niitä voi muuttaa. Lopuksi näiden lukitus palautetaan.

Moottorinohjain laskee ruiskutusajan ruiskusuuttimille ja kipinäajoitukselle ja mittaa ainakin seuraavia suureita:

- imusarjan paine (MAP)
- kierrosnopeus (RPM)
- imusarjan lämpötila (MAT)
- jäähdytysnesteen lämpötila (CLT)
- kaasuläpän asento (TPS)
- akkujännite (BattV)
- Lambda-anturi (AFR)

Lisäksi ohjaimelle määritetään vakiot:

- moottorin iskutilavuus [cm^3]
- ruiskusuuttimen virtaus [cm^3/min]

Kalibroinnilla määritellään antureiden raja-arvot suhteessa moottoriohjaimen mittamaan jännitteeseen. Kalibrointi tapahtuu *TunerStudio MS* -ohjelmistolla ja kuviossa 58 määritellään kalibrointi-arvot lämpöanturille. Termistorin resistanssi on mitattu kolmessa eri lämpötilassa.

Calibrate Thermistor Tables...

Help

Calibrate Thermistor Tables...

Sensor Table

Coolant Temperature Sensor

Table Input Solution

3 Point Therm Generator

Thermistor Measurements

Common Sensor Values Select a Common Sensor

Bias Resistor Value (Ohms) 2490

☐ Fahrenheit ☒ Celsius

Temperature(°C)	Resistance (Ohms)
-18	14200
0	5800
100	200

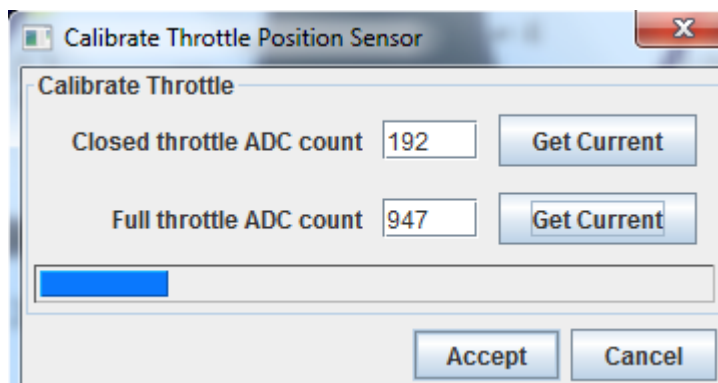
Select settings, click "Write to Controller"

Write to Controller

Close

Kuvio 58. Lämpöantureiden kalibrointi

TunerStudio MS -ohjelmassa kaasuläpän kalibrointiin päästään valikosta Tools -> Calibrate TPS, jolloin avautuu kuvion 59 ikkuna. Kaasupolkimen ollessa painettuna pohjaan eli kaasuläpän ollessa täysin auki, painetaan alempaa ”Get Current”-nappia, jolloin luetaan potentiometrin jännite ja analogimuuntimen lukema tulee näkyviin. Vastaavasti kaasuläpän ollessa kiinni painetaan ylempää ”Get Current”-nappia, jolloin lukema tulee näkyviin. Lopuksi hyväksytään arvot painamalla ”Accept”-nappia. Kaasuläpän ollessa kiinni pitää saada pienempi arvo kuin kaasuläpän ollessa auki.

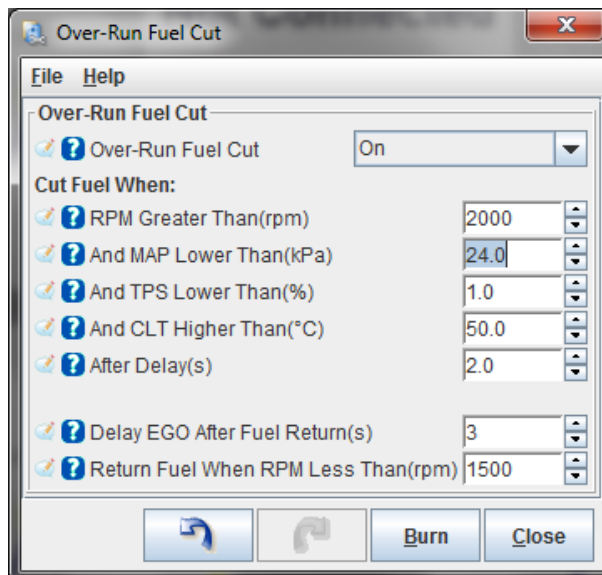


Kuvio 59. Kaasuläppäanturin kalibrointi

Kalibroinnin jälkeen anturin lukemat muuttuvat prosenteiksi, joiden minimi ja maksimi on nyt määritelty. Kaasuläpän asennon ja sen yli olevan paine-eron suhde on epälineaarinen. Paine-eron muutos on suurempi kaasuläpän pienellä avauksella. Alle 15 % avauksella imusarjanpaine pysyi alle 100 kPa. Yli 70 % avauksella kaasuläpän painehäviö ei enää muutu merkittävästi.

5.4 Moottorijarrutus

MS2 toteuttaa moottorijarrituksen katkaisemalla polttoaineen syötön, jolloin moottorissa ei tapahdu palamista. Moottorijarrutus otetaan käyttöön, kun sen aktivoitumisehdot toteutuvat. TunerStudioMS -ohjelmassa asetetaan kohdasta *Fuel Settings*->*Over-run Fuel Cut*. Aktivoitumisehdot on esitetty kuviossa 60. Moottorin pitää olla tarpeeksi lämmin, kaasuläpän melkein kiinni, imusarjan paineen hyvin alhainen ja moottorin kierosnopeus tarpeeksi korkea. Näiden ehtojen toteuduttua odotetaan vielä viive. Moottorijarrutus säästää polttoainetta, jos kaasuläppä suljetaan esimerkiksi alamäessä.

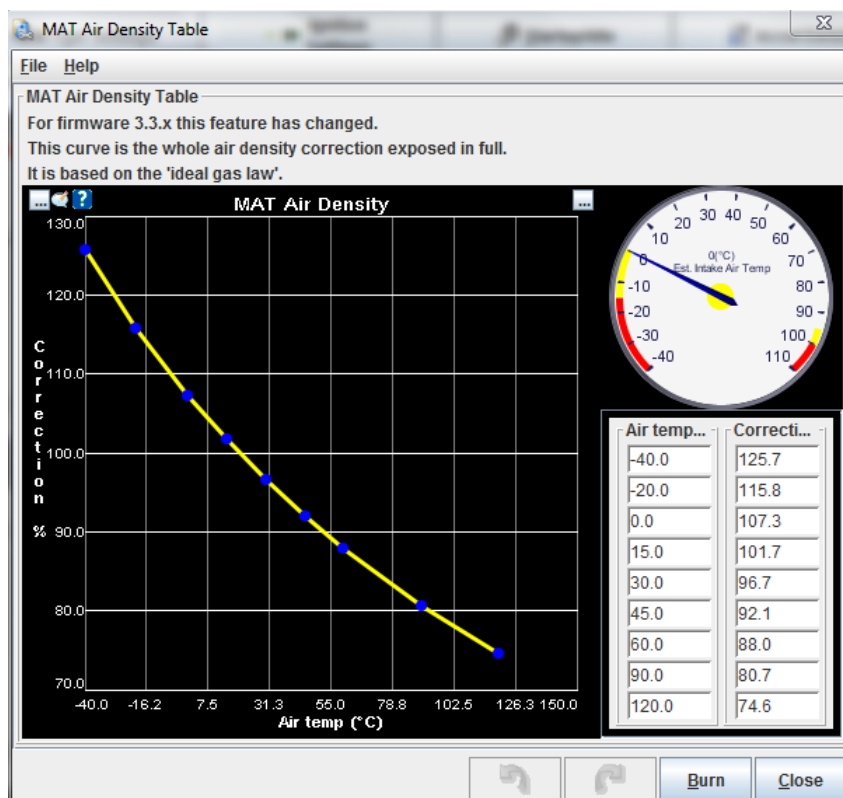


Kuvio 60. Moottorijarrutuksen ehtojen asettelu

5.5 Kiihdytystestit ja tehon arviointi

Kiihdytystestien tehoarviot perustuvat GPS -laitteella mitattuun nopeuteen, matkaan ja aikaan. Mittaustaajuus oli parhaimmillaan yksi näyte sekunnissa. On olemassa myös laitteita, joilla mittaustaajuus on esimerkiksi kymmenen näytettä sekunnissa. Tehoarviot laskettiin mittausdatan perusteella. Laskentatuloksiin vaikuttaa kuinka lähelle arviot ovat osuneet. Rekisteriotteessa auton omapaino on 1280 kg, johon käyttöohjekirjan teknisten tietojen mukaan kuuluu polttoaine, jäähdytysneste, työkalut ja varapyörä. Testissä massaksi arvioin 1400 kg, koska mukana oli ylimääräisiä työkaluja. Käyttöohjekirjan mukaan etupyörille jakautuu 58–60 % painosta. Renkaiden pitoon vaikuttaa renkaan ja tien välinen kitka. Jos kitkakerroin on 0,8 ja vetäville renkaille kohdistuu kummallekin 4 kN tukivoima ja renkaat eivät luista, niin autoa kiihdyttävä voima on korkeintaan 6,4 kN. Tällöin kiihtyvyys on korkeintaan $4,57 \text{ m/s}^2$ ja vastusvoimien kasvaessa kiihtyvyys pienenee. Vastusvoimat voidaan arvioida myös mittaamalla hidastuvuus GPS -laitteella, kun vaihde on vapaalla ja vauhti hidastuu tasaisella tiellä.

Kiihdytystesteissä suurin havaittu kiihtyvyys esiintyy yleensä aivan alussa, koska käytetään pienintä vaihdetta, jolloin renkaille saadaan suuri vääntömomentti. Nopeuden kasvaessa kiihtyvyys pienenee, koska ilmanvastus kasvaa. Imuilman lämpeneminen pienentää moottorin tehoa, koska ilmantiheys pienenee. Kuviossa 61 näkyy ilmantiheydelle käytetty taulukko, jonka korjauskertoimet perustuvat ideaalikaasun yhtälöön.



Kuvio 61. Ilmantiheyskerroin ilmanlämpötilan suhteen

Kiihtyvyydestä voidaan arvioida voima, joka kiihtymiseen tarvitaan. Moottorin vääntömomentin voi arvioida, kun tunnetaan käytetty välityssuhde. Mittausdatasta pystyy näkemään esimerkiksi, milloin vaihdetta on vaihdettu ja kuinka suuri poikkeama AFR Target ja AFR välillä on. Ahtopaineen säädössä tavoite on Boost Target ja saavutettu mittausarvo on MAP. Ahtopaineen takaisinkytketty säätö kytkeytyy päälle ehdolla $MAP > Barometer - 5 \text{ kPa}$. PW on suutinryhmän 1 ohjauspulssin pituus millisekunteina. MS2 tuottaa signaaleja noin 100, mutta kaikkia ei edes lueta, jotta näytteenotto-taajuus ei kärsi. Liitteissä 7, 8 ja 9 on kuvaajina mittausdatan pätkä, jossa aika kasvaa alhaalta ylöspäin ja kuvaajat on ryhmitelty vasemmalta oikealle seuraavasti:

Ryhmä 1: RPM ja TPS

Ryhmä 2: MAP, Barometer ja Boost Target

Ryhmä 3: AFR ja AFR Target

Ryhmä 4: MAT, CLT ja PW

Taulukkoon 11 on kerätty ajat, jolloin vaihteet olivat päällä. Manuaalivaihteistolla onnistunut nopea vaihtaminen vaatii hieman totuttelua. Testissä 1 vaihde 4 jäi kokonaan käyttämättä. Testissä 2 ensimmäisellä vaihteella kierrokset nousivat liian suuriksi. Tes-

tissä 3 vaihteen vaihtaminen tehtiin ennen kuin kierrosnopeus nousi yli 5000 RPM. Parhaassa tapauksessa vaihteen vaihtoon kului noin 0,4 sekuntia. Eroa testien välillä selittää se, että kahdessa ensimmäisessä testissä imuilman lämpötila oli jo alussa korkeampi. Testissä 3 imusarjan lämpötila oli alhaisempi, jolloin ilmantiheys oli noin 6 % korkeampi. Suurempi huippunopeus saavutettiin lyhyemmällä matkalla. Merkittävä ero oli havaittavissa myös toteutuneissa sytytyksen ennakoissa ja saavutetuissa ahtopaineissa.

TAULUKKO 11. Vaihteiden ajat, huippunopeus sekä imusarjan lämpötila testin aikana

		Testi 1				Testi 2				Testi 3			
Vaihte	1	0.00	-	2.91	s	0.00	-	3.61	s	0.00	-	2.75	s
	2	3.36	-	7.67	s	4.97	-	8.92	s	3.18	-	5.84	s
	3	8.01	-	16.36	s	9.21	-	16.65	s	6.23	-	10.05	s
	4					16.96	-	41.16	s	10.44	-	16.78	s
	5	17.07	-	40.67	s					17.16	-	33.54	s
Huippunopeus [km/h]		186		1523		186		1506		194		1208	
		km/h	@	m		km/h	@	m		km/h	@	m	
Imusarjan lämpötila [°C]		43.6	-	62.2		37.3	-	62.5		12.0	-	46.6	

Välityssuhteet esiteltiin taulukossa 7 ja näitä voidaan käyttää moottorin vääntömomentin laskennassa. Akseliteho on laskettu teho, joka tarvitaan ilman- ja vierimisvastuksen voittamiseksi, sekä kiihdytyksen aikaan saamiseksi. Nopeudet, matkat ja ajat saatiin GPS -laitteen datatiedostoista. Keskikiihtyvyys laskettiin yhtälöllä 22.

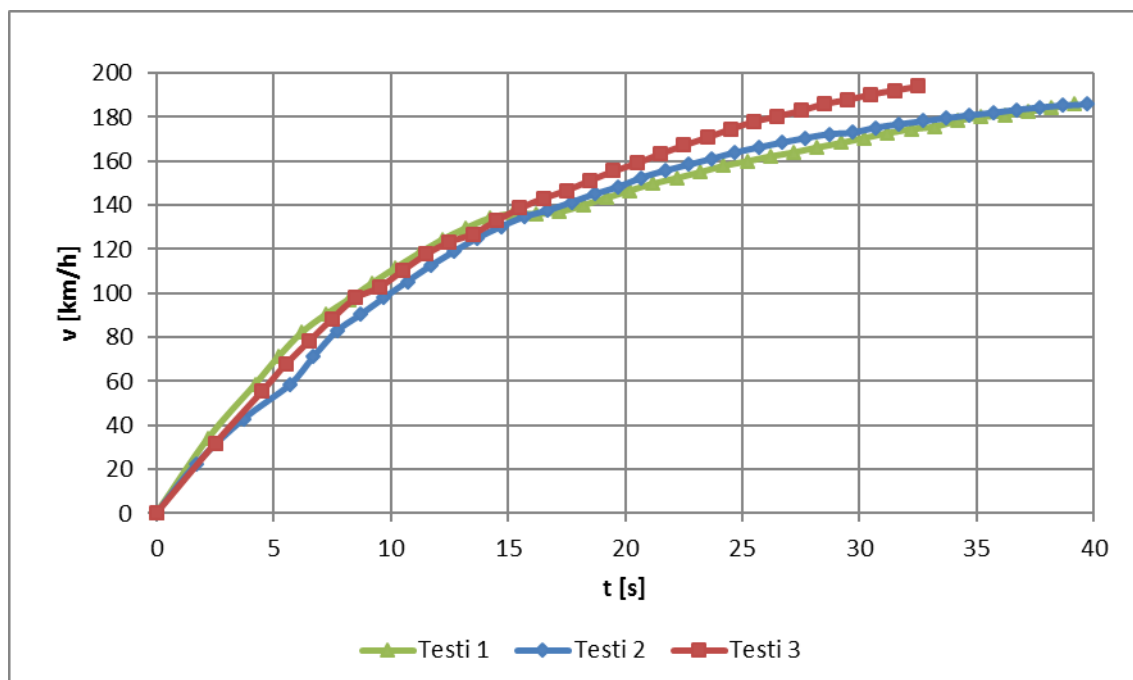
$$a = \frac{v(t_{n+1}) - v(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \quad (22)$$

, jossa:

- a on keskikiihtyvyys
- v(t) on keskinopeus ajanhetkellä t
- t_n on aika näytteen n hetkellä
- t_{n+1} on aika näytteen n+1 hetkellä

Kuviosta 62 voidaan vertailla saavutettuja nopeuksia ajan suhteen. Nopeus kasvaa kaikissa testeissä aluksi nopeasti. Testissä 1 on paras nopeus ensimmäisen 17 sekunnin ajan. Testissä 2 loppukiihtyvyys jäi pienemmäksi, koska moottorin kierrosnopeus lähestyi maksimia ja teho ei kasvanut. Testissä 3 loppukiihtyvyys oli kaikista suurin ja saavutettiin suurin nopeus. Liitteessä 10 on laskettu kiihtyvyys kuvion 62 nopeuksien avulla.

Testissä 3 kiihtyvyys pysyi pisimpään yli 1 m/s^2 . Liitteessä 11 on laskettu teho, kun tunnetaan liitteen 10 kiihtyvyys ja keskinopeus.



Kuvio 62. Nopeudet ajan suhteen, GPS mittaus laitteella Samsung Galaxy Xcover2.

Polttoaineen kulutukseen vaikuttaa muun muassa ajotyyli ja olosuhteet. Saab 900 käyttöohjekirja antaa polttoaineen kulutukset taulukossa 12. Kaupunkikulutus on tässä ECE 15 syklin mukaan. Tasaisella nopeudella ajettaessa ei tarvita suurta moottoritehoa jolloin kannattaa käyttää suurinta mahdollista vaihdetta. Kylmällä moottorilla kulutus on suurempaa. Vertailun vuoksi paras ja huonoin mitattu keskikulutus on taulukossa 13. Mittauksessa polttoainetankki täytettiin aina täyteen ja trippimittari nollattiin.

TAULUKKO 12. Polttoaineen kulutus (Saab 900 käyttöohjekirja M1986)

Malli	Polttoaineen kulutus l/100 km		
	90 km/h	120 km/h	kaup. ajo
Saab 900 Turbo 8, 5-vaih	8,1	10,7	14,2

TAULUKKO 13. Mitattu keskikulutus

Tankkauspäivä	Matka [km]	Tankkaus [l]	Keskikulutus [l/100 km]
20.1.2011	438,3	52,60	12,00
5.9.2015	470,7	39,01	8,29

6 TULOKSET JA POHDINTA

Koska useimmista kannettavista tietokoneista ei löydy sarjaporttia, niin tällöin voidaan käyttää RS232-USB muunninta. Kaikki muuntimet eivät ole yhteensopivia, mutta keskustelupalstoilla suositellaan FTDI -piiriin perustuvia muuntimia. MegaSquirt-2 käyttää 115200 Baudin siirtonopeutta. Jotta saavutetaan yli 15 Hz näytteenottotaajuus, pitää vähentää mitattavia signaaleja.

Piirilevy vaihtui versioon V3.0 ja samalla uusittiin johdotus. Syynä vaihtoon oli piirilevyllä ja johtosarjassa havaitut katkokset ja puutteet. V3.0 levyn etuna on parempi laajennettavuus. Lisäksi tätä markkinoidaan paremmilla häiriönsuojaominaisuuksilla. Uudemmassa levyssä komponentteja on paljon enemmän ja tehokomponenttien jäähdytystä on paranneltu. Jännitehäviöt syöttöjohdoissa vähenivät johdotuksen uusimisella. Uusilla liittimillä myös kontaktihäiriöt vähenivät.

Johdotuksen ja piirilevyn uusimisen jälkeen havaitsin signaalihäiriötä TPS, CLT ja MAT anturien signaaleissa. Anturien maadoitusjohdosta virraksi mittasin yli 100 mA, lisäksi virta oli pulssimaista ja samalla taajuudella kuin Lambda-anturin lämmityspulsit. Maadoitustasojen välille syntyi eroa, koska TechEdge 2A0 ei ollut differentiaalisella lähdöllä. Kuvio 4 mukaisesti anturien maadoitukseen kytkettynä tämä tuotti häiriötä, joka havaittiin signaaleista TPS, CLT ja MAT. TechEdge 2A0 liittimen Y1 pinni 5 kytkettiin erilliseen maadoituspisteeseen MegaSquirt ohjaimella, jolloin signaalihäiriöt vähenivät alle erottelutarkkuuden.

Suuttimien käyttöaste (Duty %) lasketaan ohjauspulssin pituuden (PW) ja kierrosnopeuden (RPM) avulla. Kierrosnopeuden kasvaessa käytettävissä oleva aika pienenee. Suuttimien valinnassa käyttöaste tavoitteena on alle 85 %. Suuttimien ohjauksen noustessa tästä ei voida olla varmoja, että suutin ehtii sulkeutua. Suuttimien käyttöaste pysyi alle 74 % testissä 1, mutta nopeusrajoittimen kytkeytyminen päälle ja pois nosti laskennallisen käyttöasteen hetkellisesti yli 100 %. Nopeusrajoitin sammutti polttoaineen syötön, jonka EAE kompensointi havaitsi. Kun nopeusrajoitin palautti polttoaineen syötön, niin EAE yritti palauttaa polttoaineensyötön kasvattamalla pulssinpituuksia. Testissä 2 käyttöaste pysyi alle 74 %. Testissä 3 käyttöaste pysyi alle 70 %. Suuttimien käyttöasteen tavoite siis täyttyi. Näillä käyttöasteilla AFR pysyi lähellä tavoitetta AFT_target, vaikka takaisinkytkentä kytkeytyi pois käytöstä. VE taulukot olivat kuormituksella lähellä ha-

luttua. GPS mittaustaajuus oli parhaimmillaan 1 Hz, joten kiihtyvyydeksi laskettiin keskimääräinen nopeuden muutos jaettuna ajalla. Samalla vaihteella ehti ajaa vain muutama näytevälin, jolloin kiihtyvyyssmittauksesta saadut luvut olivat keskiarvoja näyteväliltä. Tarkempia mittaustuloksia saadaan, kun näyteväliä voidaan lyhentää. Tähän päästään esimerkiksi laitteella *BT-Q818XT*, joka tarjoaa jopa 10 Hz mittaustaajuuden ja *TunerStudio* -ohjelman kanssa testatun yhteensopivuuden.

Verkkosivulla http://www.turbomaster.info/eng/applications/passenger_cars/saab/ on taulukko, jossa samalla turbolla ja moottorilla ilmoitetaan tehoksi 137 hevosvoimaa eli noin 102 kW. Kun testeissä 1 ja 2 akselitehoksi saavutettiin 110–115 kW, niin testissä 3 saavutettiin jopa 130 kW. Moottorin teho näyttää olevan pienempi alle 60 km/h nopeudessa kuin yli 60 km/h nopeudessa. Paikaltaan lähdettäessä turboahtimen kierrosnopeus pidettiin alhaisena, joten myös moottoriteho jää alussa alhaiseksi. Kiihtyvyys alussa oli mittausten perusteella jopa yli 4 m/s ja tämä on hyvä lukema etuvetoiselle autolle.

Kulutusmittauksissa ajomatka, ajotyyli, sekä olosuhteet vaikuttavat. Paljon lyhyitä matkoja ajettaessa moottori ei ehdi lämmetä ja kylmäkäynnistys lisää rikastuksen määrää ja polttoaineen kulutusta. Kiihdyttäminen voi kuluttaa hetkellisesti jopa 80 litraa polttoainetta tunnissa. Tyhjäkäynnillä kierrosnopeuden alentaminen vähentää polttoaineen kulutusta. Tyhjäkäyntiventtiili ei toiminut odotetusti, vaan sen läpi virtasi liikaa ilmaa, vaikka ohjasin venttiilin kiinni. Tämä kasvatti kierrosnopeutta ja polttoaineen kulutusta tyhjäkäynnillä.

LÄHTEET

Bosch. Piezoelectric vibration sensors. Datalehti. Luettu 30.3.2015

http://www.rhinopower.org/knock/docs/bosch_ks_ds.pdf

Bowling, B & Grippo, A. 2011. MegaSquirt® Assembly Guide for Main Board Version V2.2. Verkkodokumentti. Päivitetty 1.11.2011

<http://bgsoflex.com/v22/assem.html>

Dtec Devices. Ignition Coil Dwell Calibration. Verkkodokumentti. Luettu 19.3.2015.
<http://www.dtec.net.au/Ignition%20Coil%20Dwell%20Calibration.htm>

EU:n rengasmerkintä. Renkaan vierintävästus. Verkkodokumentti. Luettu 30.9.2015

<http://www.rengas-online.com/FAQs/>

Freescale Semiconductor. 2009. MPX4250A series. Datalehti

http://www.nxp.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX4250A.pdf

Martyr, A.&, Plint M. 2007. Engine Testing. 3.painos. 188–215

Motiva.fi. EU:n rengasmerkintä. Verkkodokumentti. Luettu 30.4.2016

https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/eu_n_rengasmerkinta

Murray, J. MS2/V3.0 Hardware Manual. Päivitetty 15.1.2016. Verkkodokumentti.

http://www.msextra.com/doc/pdf/MS2V30_Hardware-3.4.pdf

Oksanen, A & Aarikka, L. 2005. Polttotekniikka

Ringwood, P & Murray, J & Culver, K. MS1-Extra General Hardware manual. Päivitetty 5.2.2014. Verkkodokumentti.

http://www.msextra.com/doc/ms1extra/Ignition_Hardware_Manual.htm

Saab Automobile Ab. 1991. Saab 900 korjaamon käsikirja

Saab 900 vaihdelaatikon välitykset. Verkkodokumentti

http://www.900aero.com/main/tech_main_tranny.htm

Tech Edge. 2004. 2A0 tekniset tiedot. Päivitetty 9.8.2014

<http://wbo2.com/2a0/default.htm>

Toyota. 1983. patentti US4388906

<https://google.com/patents/US4388906>

T3 "40" kompressorin kartta

<http://turbocharged.com/catalog/compmaps/fig1.html>

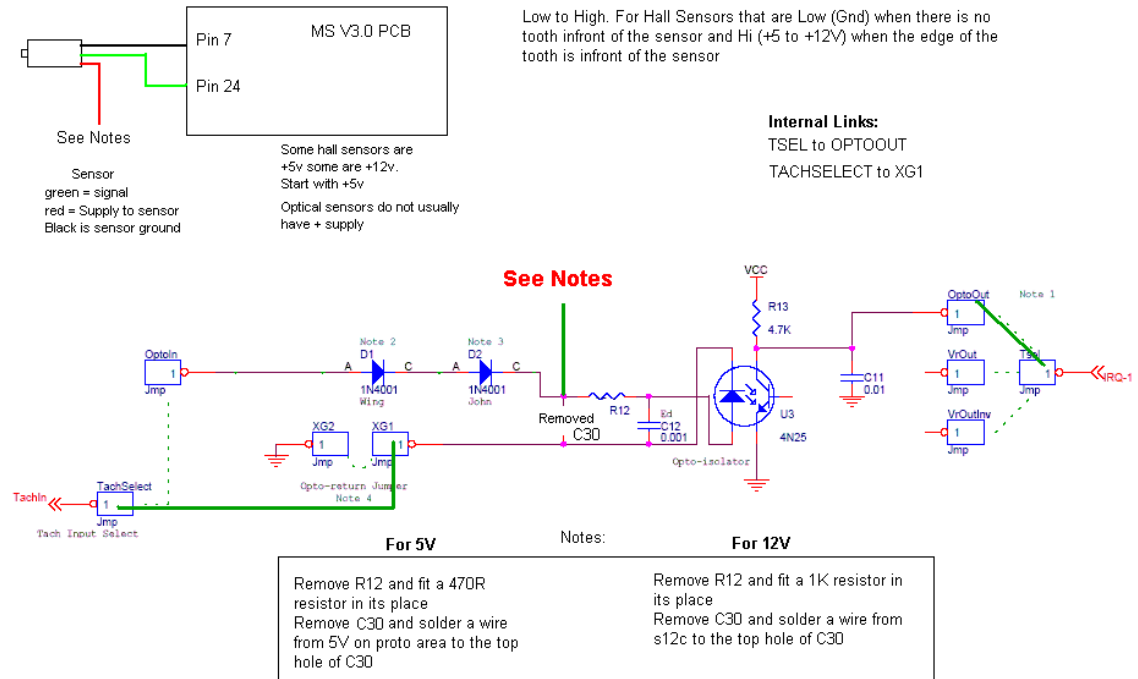
T3 "60" kompressorin kartta

<http://turbocharged.com/catalog/compmaps/fig4.html>

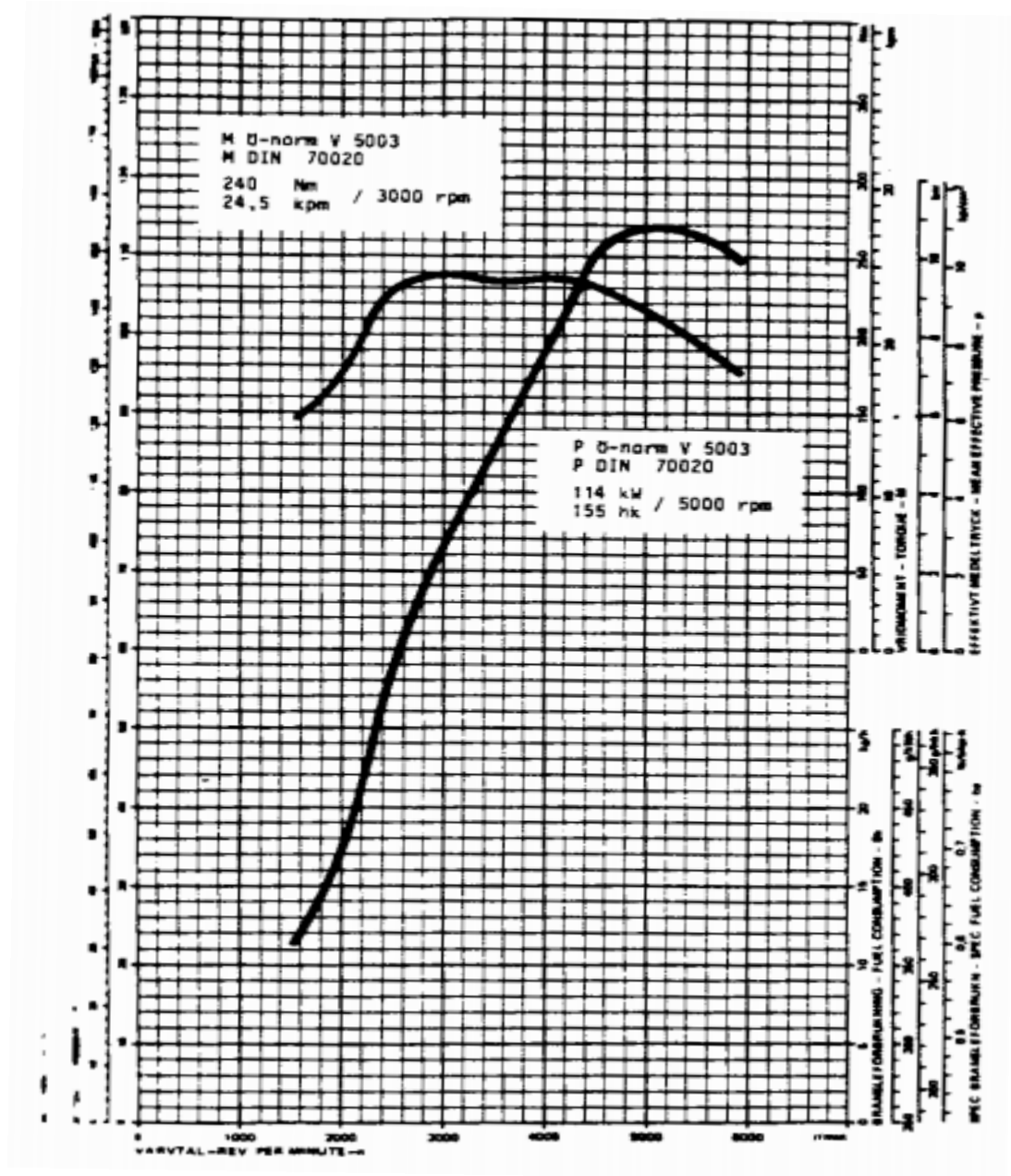
LIITTEET

Liite 1. Hall-anturin kytkentä

http://www.msextra.com/doc/ms1extra/MS_Extra_Hardware_Manual_files/v3input-hall.gif



Liite 2. Moottorin teho- ja vääntökäyrät (Saab 900 korjaamonkäsikirja)



Liite 3. Kiihdytysajon säännöt ja toimintaohjeet (Lappeenrannan ilmailuyhdistys ry)

KIIHDYTYS-AJO LENTOKENTÄN 2,5 KM:N KIITORADALLA

SÄÄNNÖT:

- Tapahtuma ei ole kilpailu
- Ajon aikana kiitoradalla ei ole muita ajoneuvoja
- Ajo tapahtuu kiitoradan oikealla puoliskolla
- Kiitorataa saa ajaa vain yhteen suuntaan ja poistuminen tapahtuu kiitoradan kaupunginpuoleisesta päästä
- Kiitoradan ulkopuolisilla alueilla on 50 km/h nopeusrajoitus
- Toimitsijoiden antamia ohjeita ja merkkejä on noudatettava
- **Valkoisten kiitotiemerkintöjen päällä ei saa polttaa kumia !**
Kuminpoltajilta peritään 100€ maksu !

TOIMINTAOHJE:

- Aja lähtöpaikalle ja odota vuoroasi
- Lähtöpaikalla toimitsija kertoo vielä ajo-ohjeet ja voit kysyä samalla jos jokin seikka tuntuu epäselvältä
- Aika otetaan 0 – 402 metrin kiihdytyksestä
- Ajoneuvon nopeus mitataan tutkalla 1609 metrin kohdalla, jonka jälkeen kiitorataa on jäljellä n. 900 metriä
- Jarruta turvallisen **ajoiissa**, löysää kaasua heti tutkan ohitettua.
- Viimeistään lippumiehen kohdalla vauhtia on hiljennettävä tehokkaasti.
- Mikäli huomaat, että ajon aikana kiitoradalle putoaa jotakin, ilmoita siitä kiitoradan päässä olevalle toimitsijalle.
- Suorituksesi jälkeen poistu hitaasti ajaen oikealle kiitoradan päästä.
Toimitsija opastaa kyseisessä poistumispaikassa. Aja merkittyä reittiä pitkin tapahtuman parkkipaikalle ja hae kävellen LIY:n hallilta tuloksesi.
- Tutkalla mitattu nopeus sekä kiihdytysaika kirjataan LIY:n hallilla olevaan listaan.

HUOM! ÄLÄ TUIJOTA NOPEUSMITTARIA JA ALOITA TEHOKAS JARRUTUS RIITTÄVÄN AJOISSA!!
KIITORADAN LEVEYS AIHEUTTAA REFERENSSIVIRHEEN
 (=näkökentässä ei vertailukohteita), JONKA VUOKSI AJONEUVON NOPEUTTA JA ETÄISYYTTÄ ON VAIKEA ARVIOIDA.
 KÄÄNTÖPUOLELLA ON KARTTA

Liite 5. EAE rikastuksen esittelyosa tiedostossa ms2_extra_inj.c (Culver, K)

```

/*****
**
**  EAE Transient Enrichment Section:
**
BF = Basic Fuel amount
P = MAP value
EXC = EGO correction factor
TCC = Corrections for temperature, barometric pressure, etc...
DFC = Desired Amount of Fuel
WF = total amt of fuel adhering to walls
eae_AWC = Adhere to wall coefficient: proportion of the fuel injected in next pulse which will adhere.
AWA = actual amount that'll adhere in the next pulse
SOC = proportion of fuel injected in next pulse which will be sucked off the walls
SOA = actual amt of fuel injected in next pulse which will be sucked off the walls
SQF = actual amt of fuel squirted for this pulse
AFC = time that injector is commanded to be open
DT = injector opening time
BAWC = eae_AWC but only with reference to manifold pressure.
BSOC = same as BAWC but for SOC
AWW = correction to eae_AWC based on CLT
SOW = correction to SOC based on CLT
AWN = correction to eae_AWC based on engine speed
SON = correction to SOC based on engine speed
AWF = correction to eae_AWC based on air velocity
SOF = correction to SOC based on air velocity

eae_AWC = BAWC*AWW*AWN*AWF
SOC = BSOC*SOW*SON*SOF

SOA = SOC * WF
SQF = (DFC - SOA)/(1-eae_AWC)
AWA = SQF * eae_AWC

if (fuelcut)
WF = WF - SOA
else
WF = WF + AWA - SOA

AFC = SQF + DT

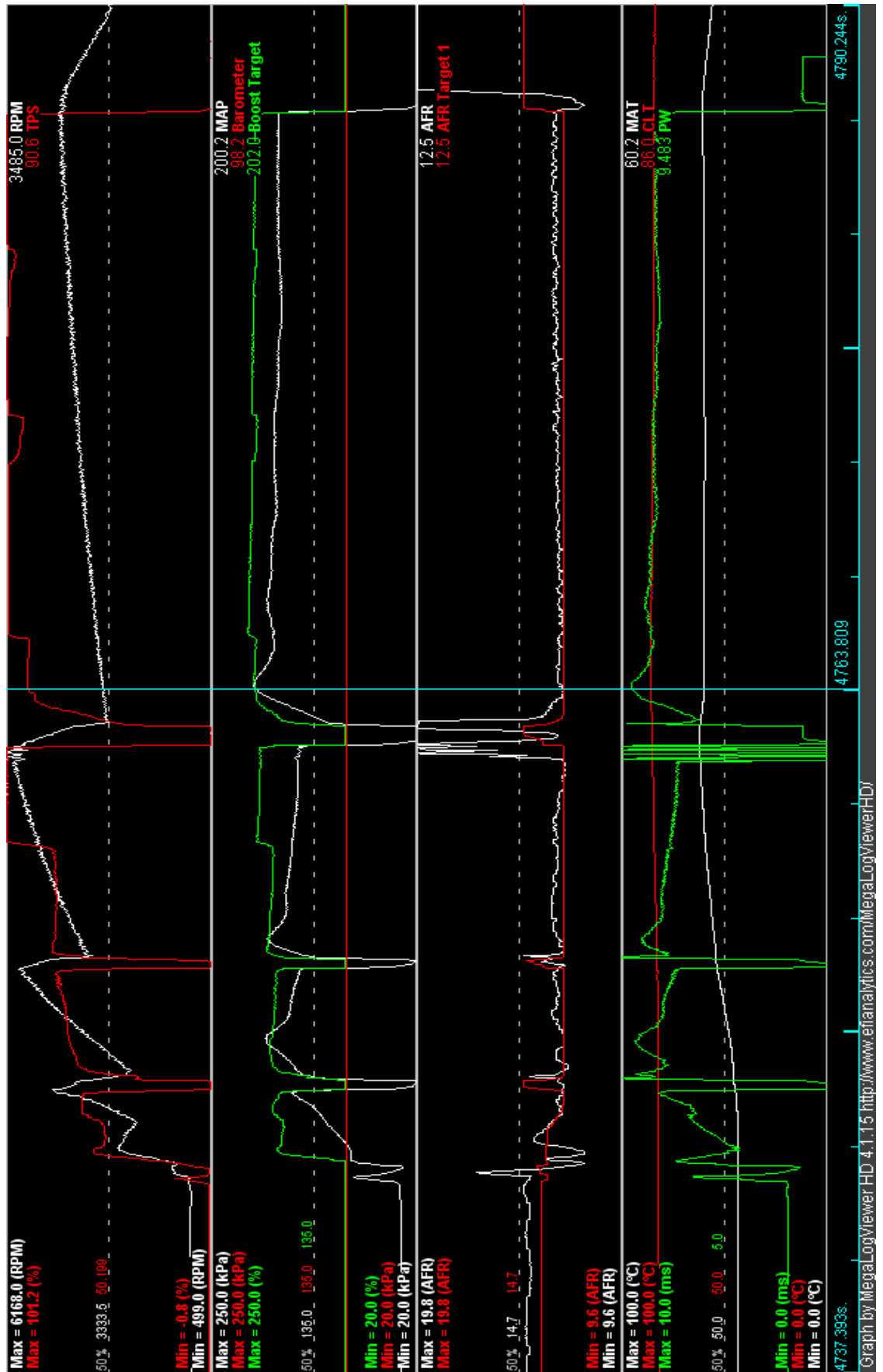
calculation of WF should be done in ISR, the rest can and will be done
in main loop.
**
*****/

```

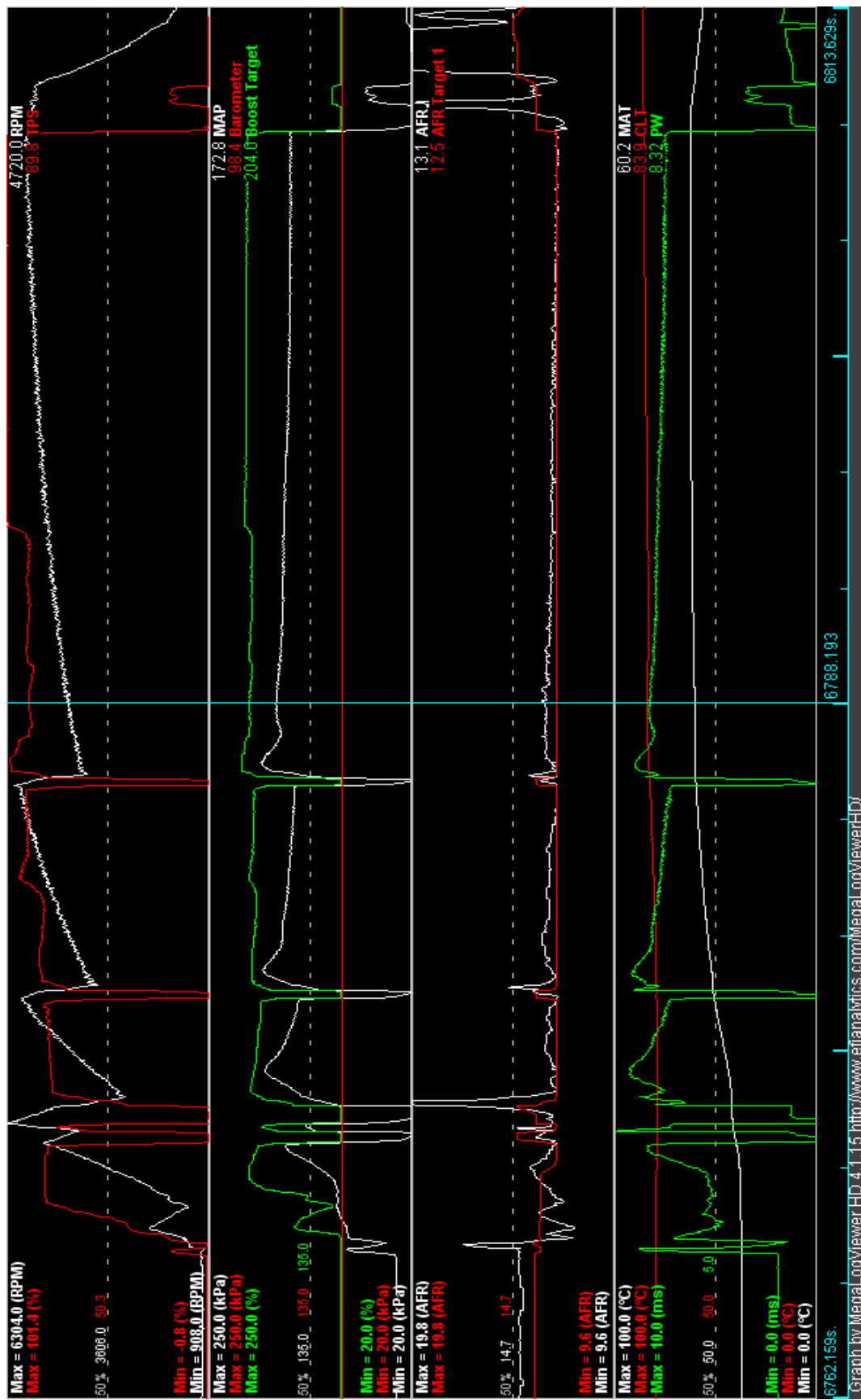
Liite 6. Impulssitestin mittaustietoa tiedostosta 2015-09-05_12.54.29.msl (n=60) (EGO:
P=50%, I=25%, D=5%)

Time	RPM	MAP	TPS	AFR	EGO	Ac- cel PW	VE1	PW	TPSdot	MAPd ot	RPMdot	WallFuel1	EAE1 %	AFR Tar- get 1
s	RPM	kPa	%	AFR	%	ms	%	ms	%/s	kPa/s	rpm/sec	uS	%	AFR
4343.304	1126	37.5	0	13.3	100.0	0	60	1.953	0.0	0.0	-10	866174	100.0	13.6
4343.337	1130	37.5	0	13.3	100.0	0	60	1.953	0.0	0.0	-30	866331	100.0	13.6
4343.373	1134	37.4	0	13.3	100.0	0	60	1.948	0.0	-3.0	30	866399	99.00	13.6
4343.408	1136	37.4	0	13.3	100.0	0	60	1.948	0.0	0.0	40	866151	99.00	13.6
4343.442	1137	37.4	0	13.3	100.0	0	60	1.948	0.0	0.0	20	866042	99.00	13.6
4343.477	1137	37.4	10	13.3	100.0	0	60	1.949	145.6	0.0	30	865942	99.00	13.6
4343.512	1147	54.0	11	13.3	100.0	0.8	64	1.949	161.0	504.0	60	893050	143.0	13.6
4343.547	1162	65.1	11	13.3	100.0	0.8	71	4.432	33.2	414.0	50	1001693	152.0	13.3
4343.583	1157	74.3	5.2	13.4	100.0	0.8	75	6.129	-67.8	84.0	-10	1162666	153.0	13.3
4343.617	1133	71.0	0.8	13.4	100.0	0	73	6.129	-153.7	-125.0	0	1533247	129.0	13.3
4343.653	1133	65.7	0.7	13.4	100.0	0	71	4.202	-111.9	-206.0	10	1610065	118.0	13.3
4343.687	1275	58.3	0.6	13.5	100.0	0	68	3.109	-31.8	-149.0	190	1668264	101.0	13.5
4343.721	1328	54.9	0.6	13.7	99.9	0	67	3.109	-10.0	-151.0	310	1670477	91.00	13.7
4343.756	1356	49.7	0.4	14.2	99.9	0	65	2.478	-5.0	-99.0	540	1631631	81.00	13.7
4343.791	1332	47.3	0.4	14.5	102.1	0	63	2.130	-2.0	-101.0	560	1603025	76.00	13.7
4343.826	1322	44.0	0.3	14.9	102.1	0	62	1.905	-1.9	-66.0	550	1533048	72.00	13.7
4343.861	1355	41.6	0.3	14.4	102.9	0	62	1.834	-1.0	-64.0	580	1496148	73.00	13.7
4343.896	1416	40.4	0.3	14.0	102.9	0	63	1.834	-0.2	-57.0	340	1424701	71.00	13.7
4343.931	1452	38.4	0.2	13.6	100.8	0	63	1.767	-1.0	-50.0	350	1353817	70.00	13.7
4343.966	1479	36.7	0.2	13.1	98.9	0	64	1.693	-1.3	-33.0	660	1285369	69.00	13.7
4344.002	1490	35.7	0.2	12.7	98.9	0	64	1.638	-0.4	-49.0	690	1251884	69.00	13.7
4344.037	1501	34.5	0.2	12.4	98.2	0	64	1.624	0.0	-35.0	570	1188660	71.00	13.7
4344.071	1502	33.5	0.2	12.2	98.2	0	64	1.609	0.0	-25.0	490	1130566	73.00	13.7
4344.104	1502	32.5	0.1	12.0	97.0	0	64	1.579	-0.6	-25.0	310	1076843	73.00	13.7
4344.139	1490	32.5	0.1	11.8	97.0	0	64	1.579	-1.0	0.0	190	1051505	75.00	13.7
4344.174	1470	31.8	0.1	11.8	96.1	0	64	1.597	-0.3	-9.0	-20	1005156	76.00	13.7
4344.208	1438	31.6	0.1	11.9	96.4	0	64	1.585	0.0	0.0	-20	963323	80.00	13.7
4344.244	1427	31.3	0.1	12.0	96.4	0	63	1.614	0.0	-14.0	-80	944992	80.00	13.7
4344.279	1402	31.3	0.1	12.2	96.7	0	63	1.623	0.0	-4.0	-230	911191	83.00	13.7
4344.315	1383	31.4	0.1	12.5	96.7	0	63	1.649	0.0	4.0	-350	896148	85.00	13.7
4344.350	1376	31.3	0.1	12.7	97.8	0	63	1.649	0.0	-4.0	-390	869883	87.00	13.7
4344.385	1340	31.3	0.1	12.9	97.8	0	63	1.675	0.0	0.0	-490	848378	89.00	13.7
4344.420	1336	31.1	0.1	13.2	98.8	0	62	1.688	0.0	-8.0	-500	838731	90.00	13.7
4344.455	1319	31.1	0.1	13.5	98.8	0	62	1.703	0.0	0.0	-540	821739	91.00	13.7
4344.489	1317	31.1	0.1	14.0	100.5	0	62	1.703	0.0	0.0	-530	814291	92.00	13.7
4344.524	1303	31.1	0.1	14.3	100.5	0	62	1.725	0.0	0.0	-450	801917	93.00	13.7
4344.559	1293	31.1	0.1	14.8	102.0	0	62	1.730	0.0	0.0	-430	796270	95.00	13.7
4344.594	1284	31.4	0.1	15.0	102.0	0	62	1.763	0.0	12.0	-400	788234	96.00	13.7
4344.629	1276	31.4	0.1	15.1	103.1	0	62	1.763	0.0	0.0	-340	785301	97.00	13.7
4344.662	1255	31.6	0.1	15.5	103.1	0	62	1.798	0.0	8.0	-360	781046	98.00	13.7
4344.698	1253	31.6	0.1	15.7	104.3	0	62	1.805	0.0	0.0	-340	779463	99.00	13.7
4344.733	1241	31.8	0.1	15.7	104.3	0	61	1.821	0.0	8.0	-300	777734	99.00	13.7
4344.768	1241	32.1	0.1	15.7	104.5	0	61	1.821	0.0	12.0	-270	777367	100.0	13.7
4344.804	1241	32.3	0.1	15.7	104.5	0	61	1.845	0.0	8.0	-240	777762	100.0	13.7
4344.840	1229	32.3	0.1	15.6	104.4	0	61	1.865	0.0	0.0	-240	778323	100.0	13.7
4344.885	1227	32.3	0.1	15.5	104.4	0	61	1.865	0.0	0.0	-230	778597	100.0	13.7
4344.923	1221	32.8	0.1	15.4	104.1	0	61	1.858	0.0	8.0	-200	779662	100.0	13.7
4344.971	1208	33.1	0.1	15.4	104.1	0	61	1.877	0.0	12.0	-200	781460	101.0	13.7
4345.018	1208	33.3	0.1	15.0	104.0	0	61	1.883	0.0	8.0	-170	783615	101.0	13.7
4345.058	1208	33.3	0.1	14.8	103.0	0	61	1.886	0.0	0.0	-140	785798	100.0	13.7
4345.094	1209	33.6	0.1	14.7	103.0	0	61	1.875	0.0	12.0	-130	786369	100.0	13.7
4345.129	1207	33.6	0.1	14.5	102.5	0	61	1.883	0.0	0.0	-110	788112	100.0	13.7
4345.164	1204	33.8	0.1	14.3	102.5	0	61	1.883	0.0	8.0	-80	788683	100.0	13.7
4345.200	1204	33.8	0.1	14.2	101.9	0	61	1.882	0.0	0.0	-40	789399	100.0	13.7
4345.235	1199	34.0	0.1	14.0	101.9	0	61	1.870	0.0	8.0	-50	789994	100.0	13.7
4345.268	1200	34.0	0.1	13.9	101.9	0	61	1.870	0.0	0.0	-50	790355	100.0	13.7
4345.303	1200	34.3	0.1	13.9	101.3	0	61	1.875	0.0	12.0	-20	790796	100.0	13.7
4345.338	1199	34.3	0.1	13.7	101.3	0	61	1.879	0.0	0.0	-20	791283	100.0	13.7
4345.373	1196	34.3	0.1	13.6	100.0	0	61	1.879	0.0	0.0	-20	791729	99.00	13.7
4345.409	1196	34.5	0.1	13.6	100.0	0	61	1.864	0.0	0.0	-20	791598	100.0	13.7

Liite 7. Kiihdytystestin 1 mittausdata



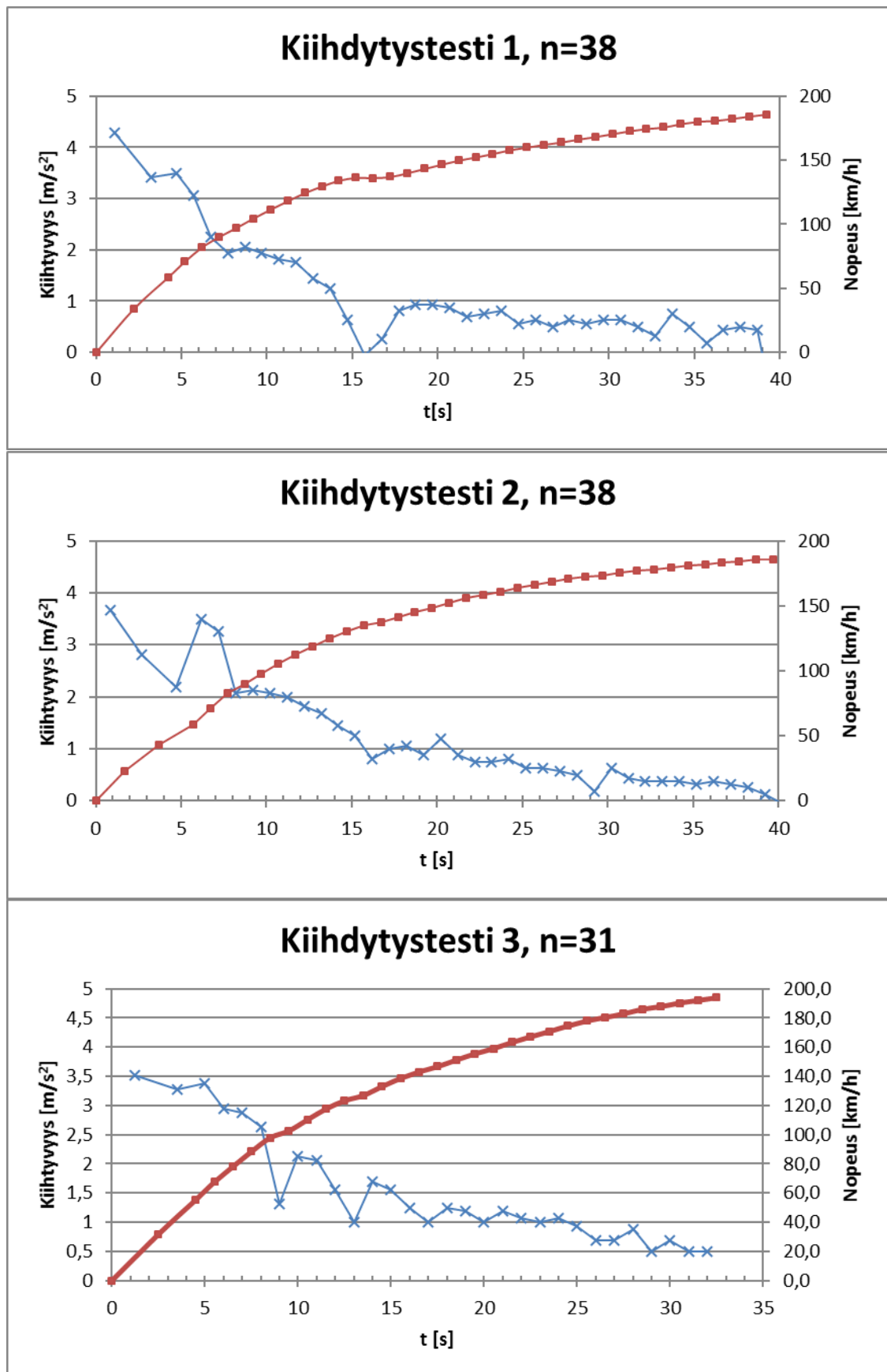
Liite 8. Kiihdytystestin 2 mittausdata



Liite 9. Kiihdytystestin 3 mittausdata



Liite 10. Kiihdytystestit 1–3, nopeus ja kiihtyvyys esitetty ajan suhteen



Liite 11. Kiihdytystestit 1–3. Akseliteho ja vastuskuormat nopeuden suhteen

