

Kalle Kemppainen

Polttoainesuuttimien ominaisuuksien mittaaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

8.5.2016

Tekijä(t) Otsikko	Kalle Kempainen Polttoainesuuttimien ominaisuuksien mittaaminen
Sivumäärä Aika	23 sivua + 0 liitettä 8.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Jälkimarkkinointi
Ohjaaja(t)	Lauri Eho
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa laitteisto imusarjasuihkutteisen ottomoottorin polttoainesuuttimien yksilöllistä mittausta varten. Modernien moottorinohjainlaitteiden toiminta perustuu tarkkaan polttoaineen suihkutuspääntien laskentaan. Tämän vuoksi ohjainlaitteen ohjelmistoon syötetään moottoriin asennettujen suuttimien fyysisiä ja sähköisiä ominaisuuksia tarkasti kuvaavat parametrit.</p> <p>Mittauslaitteiston toimivuuden toteamiseen käytettiin polttoainesuuttimia, joiden yksilölliset parametrit oli jo määritetty ohjainlaitevalmistajan toimesta. Näitä olemassa olevia parametreja pystyttiin vertaamaan omalla mittauslaitteistolla saavutettuihin tuloksiin ja täten arvioimaan itse rakennetun mittauslaitteiston tarkkuutta.</p> <p>Työn tavoitteena oli tutkia myös mittausmenetelmän tarkkuutta sekä pohtia automatisoidun mittausjärjestelmän vaatimuksia ja mahdollisia ongelmia.</p> <p>Tässä työssä esitetyistä mittauksista voidaan nähdä, että rakennettu mittauslaitteisto toimi riittävällä tarkkuudella. Automatisoidun mittausjärjestelmän rakentaminen todettiin myös mahdolliseksi, mutta se vaatisi huomattavasti monimutkaisemman laitteiston kuin tässä työssä on käytetty.</p>	
Avainsanat	Polttoainesuutin, mittauslaitteisto, ohjainlaite

Author(s) Title	Kalle Kemppainen Measuring Individual Characters of Fuel Injectors
Number of Pages Date	23 pages 10 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive After Sales Engineering
Instructor(s)	Lauri Eho
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to design and build an experimental testing equipment for measuring individual characteristics of fuel injectors used in Otto-cycle petrol engines. Modern engine management systems are based on precise measuring of the fuel injection quantity. For this reason the parameters describing the physical and electrical characteristics of the fuel injector in use are vital for the correct operation of the engine control unit.</p> <p>In order to validate the measuring accuracy of the self-made testing equipment, a reference fuel injector was used with already available characteristic data determined by a control system manufacturer. The self-made measuring results were compared to the existing known to be valid data, which made it possible to estimate the accuracy of the self-made testing equipment.</p> <p>The objective of this Bachelor's thesis was to study accuracy of the chosen measurement method and also think about the requirements and possible problems of a completely automated testing system.</p>	
Keywords	Fuel Injector, Measurement Equipment, Engine Control Unit

Sisälllys

1	Johdanto	1
2	Käytetyt laitteistot ja ohjelmat	2
2.1	Kehitysalusta	2
2.1.1	Yleistä mbed-alustoista	2
2.1.2	Mbed LPC1768 -mikrokontrolleri	3
2.1.3	Mbed Compiler	4
2.2	Motec M1 Tune	5
2.3	Polttoainesuuttimet	6
2.3.1	Lineaarinen ja epälineaarinen alue	6
2.3.2	Vertailusuutin	7
2.3.3	Mitattava suutin	8
2.4	Lucas ASNU YWB800	9
2.5	Tera Term	12
2.6	Polttoaineen lämpötila	13
3	Kytkenät	13
4	Ohjelmointi	14
5	Testaus	16
5.1	Mittaus	16
5.2	Mittau tuloksia	16
5.3	Kokoonpano	19
6	Pohdintoja	20
6.1	Suuttimen latenssi	20
6.2	Mittausmenetelmä	20
6.3	Lämpötila	21
6.4	Automatisointi	21
7	Yhteenveto	22
	Lähteet	23

Lyhenteet

ARM	Advanced Risc Machines
C/C++	Ohjelmointikieli
CAN	Controller Area Network
USB	Universal Serial Bus
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
I2C	Inter-Integrated Circuit
PWM	Pulse Width Modulation
ADC	Analog-Digital Converter
RAM	Random Access Memory
CC	Cubic Centimeter
kPa	Kilopascal (1 bar = 100 kPa)
V	Voltti
ms	Mikrosekunti
μl	Mikrolitra

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa laitteisto imusarjasuihkutteisen ottomoottorin polttoainesuuttimien yksilöllistä mittausta varten. Modernit moottorinohjainlaitteet laskevat imutahdin aikana sylinteriin päätyvän ilmamassan. Suihkutettava polttoainemassa määritetään tavoitellun polttoaineilmaseossuhteen perusteella. Tunnettaessa polttoaineen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, voidaan haluttu polttoaineen suihkutettava massa muuttaa tilavuudeksi. Suihkutettavan polttoainetilavuuden laskeminen on mahdollista, kun tunnetaan polttoainesuuttimen virtauskapasiteetti sekä suuttimen yli vaikuttava paine-ero. Ongelmia aiheuttaa kuitenkin suuttimen epälineaarinen virtausmäärä erittäin lyhyillä suuttimen aukioloajoilla, mikä johtuu suuttimen sähköisistä ja fysikaalisista ominaisuuksista.

Tarve suuttimien ominaisuuksien mittaamiselle syntyy kun moottorissa käytettävän suuttimen parametreja ei ole saatavilla ohjainlaite- tai suutinvalmistajan toimesta. Suuttimien ominaisuuksien mittaamiseen tarkoitettuja laitteita ei kuitenkaan ole kaupallisesti saatavilla. Lisäksi standardisoitua mittausten menetelmää ei ole olemassa. Niinpä tässä insinööriyössä keskityttiin enemmän valitun suuttimien mittaustekniikan tarkkuuden analysointiin kuin kokonaisvaltaisen mittaustekniikan kehittämiseen.

Työ aloitettiin suunnittelemalla ja rakentamalla laitteisto jolla mittauksia voitiin tehdä. Mittauslaitteiston toimivuuden toteamiseen käytettiin polttoainesuuttimia, joiden yksilölliset parametrit oli jo määritetty ohjainlaitevalmistajan toimesta. Näitä olemassa olevia parametreja pystyttiin vertaamaan omalla mittauslaitteistolla saavutettuihin tuloksiin ja täten arvioimaan itse rakennetun mittauslaitteiston tarkkuutta. Varmistuttua mittaustekniikan toimivuudesta siirryttiin mittaamaan ennalta määrittämättömän suuttimen tarvittavat parametrit.

Hyödyksi tässä työssä käytettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Lucas ASNU YWB800 -suutintesteriä, jonka ympärille rakennettiin mittauksia varten oma suuttimen ohjainlaite.

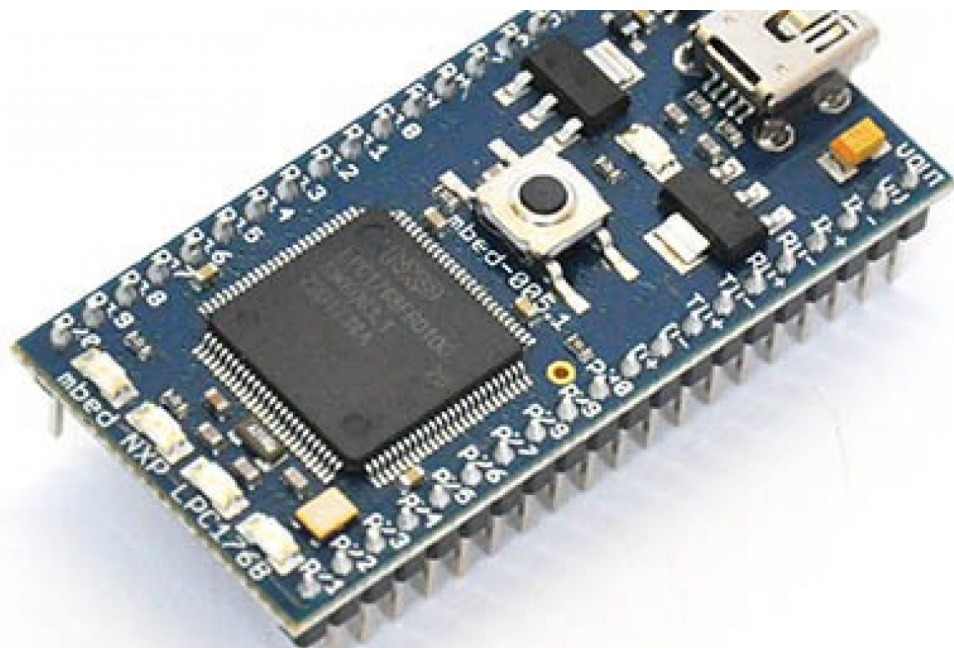
Polttoainesuutinten ohjausta varten tilattiin Britanniasta ARM mbed NXP LPC1768 -mikrokontrolleri, jolla ohjattiin testattavien suuttimien toimintaa.

2 Käytetyt laitteistot ja ohjelmat

2.1 Kehitysalusta

2.1.1 Yleistä mbed-alustoista

Suutinten ohjausta varten tilattiin Britanniasta ARM mbed NXP LPC1768 Microcontroller (kuva 1), jolla ohjattiin testattavien suuttimien toimintaa.



Kuva 1. mbed NXP LPC1768 [2].

Mbed on alusta Internet-päätelaitteelle. ARM on kehittänyt sen yhteistyössä kumppaniensa kanssa. Alusta perustuu 32-bittiseen ARM Cortex-M mikrokontrolleriin. [1.]

Ohjelmien kirjoitus mbed-alustalle tapahtuu käyttämällä valmistajan verkkosivuilta löytyvää, ilmaista koodieditoria ja ohjelmointikielen kääntäjää (compiler). Näitä käytetään tavallisen verkkoselaimen kautta ja ohjelman käänös tapahtuu verkossa, käyttäen ARMCC C/C++ -kääntäjää. Verkossa oleva ohjelmointiympäristö mahdollistaa myös ohjelmien vaivattoman jakamisen muiden käyttäjien kesken. [1.]

Alustoille löytyy useita erilaisia vaihtoehtoja, mutta alkuperäinen ”mbed Microcontroller board” on niistä suosituin, markkinointinimeltään ”mbed NXP LPC1768”. Se on demo-alusta joka perustuu NXP-mikrokontrolleriin, jossa on ARM Cortex M3 -ydin. [1.]

2.1.2 Mbed LPC1768 -mikrokontrolleri

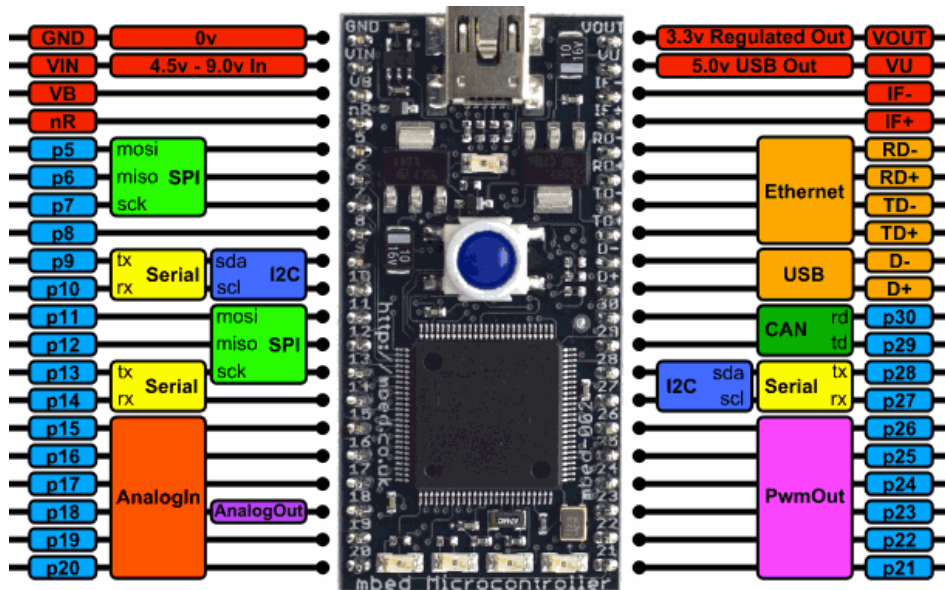
Mbed NXP LPC1768 -mikrokontrolleri valittiin tähän työhön sen monipuolisuuden ja helppokäyttöisyyden takia. NXP LPC1768 sopii hyvin niin vasta-alkajille kuin jo kokeneillekin käyttäjille. Tätä työtä tehdessä perehdyttiin ensimmäistä kertaa ohjelmointiin. Verkosta löytyvät koodieditori ja laaja kirjasto, jossa muut käyttäjät jakavat valmiita ohjelmiaan. Verkossa on myös helppo esittää kysymyksiä ongelmatilanteissa ja saada niihin vastauksia toisilta käyttäjiltä ja ylläpitäjiltä.

Mikrokontrolleri on nimenomaan suunniteltu nopeiden kokeiden tekemiseen, jotka perustuvat ARM-mikroprosessoreihin. NXP LPC1768 -alusta perustuu 32-bittisen ytimeen. Se sisältää 512 kb flash- ja 32 kb RAM-muistia. Siinä on lisäksi sisäänrakennetut Ethernet- ja USB-liitännät, portit CAN-, SPI-, I2C- ja UART-väyliä varten, kuusi ADC-muunninta ja kuusi PWM-ohjausta (kuva 2).

Jalkoja (p5-p30) voidaan käyttää tavallisina digitaalisina tulo/lähtö portteina (kuva 3). [2.]

ARM Cortex-M3 core	<ul style="list-style-type: none"> • 100 MHz operation • Nested Vectored Interrupt Controller for fast deterministic interrupts • Wakeup Interrupt Controller allows automatic wake from any priority interrupt • Memory Protection Unit • Four reduced-power modes: sleep, deep sleep, power-down and deep power-down
Memories	<ul style="list-style-type: none"> • 512 KB of Flash memory • 64 KB of SRAM
Serial peripherals	<ul style="list-style-type: none"> • 10/100 Ethernet MAC • USB 2.0 full-speed device/Host/ OTG controller with on-chip PHY • Four UARTs with fractional baud rate generation, RS-485, modem control, and IrDA • Two CAN 2.0B controllers • Three SSP/SPI controllers • Three I²C-bus interfaces with one supporting Fast Mode Plus (1-Mbit/s data rates) • I²S interface for digital audio
Analog peripherals	<ul style="list-style-type: none"> • 12-bit ADC with eight channels • 10-bit DAC
Other peripherals	<ul style="list-style-type: none"> • Ultra-low-power (< 1 uA) RTC • General-purpose DMA controller with eight channels • Up to 70 GPIO • Motor control PWM and Quadrature Encoder Interface to support three-phase motors • Four 32-bit general-purpose timers/counters
Package	<ul style="list-style-type: none"> • 100-pin LQFP (14 x 14 x 1.4 mm)

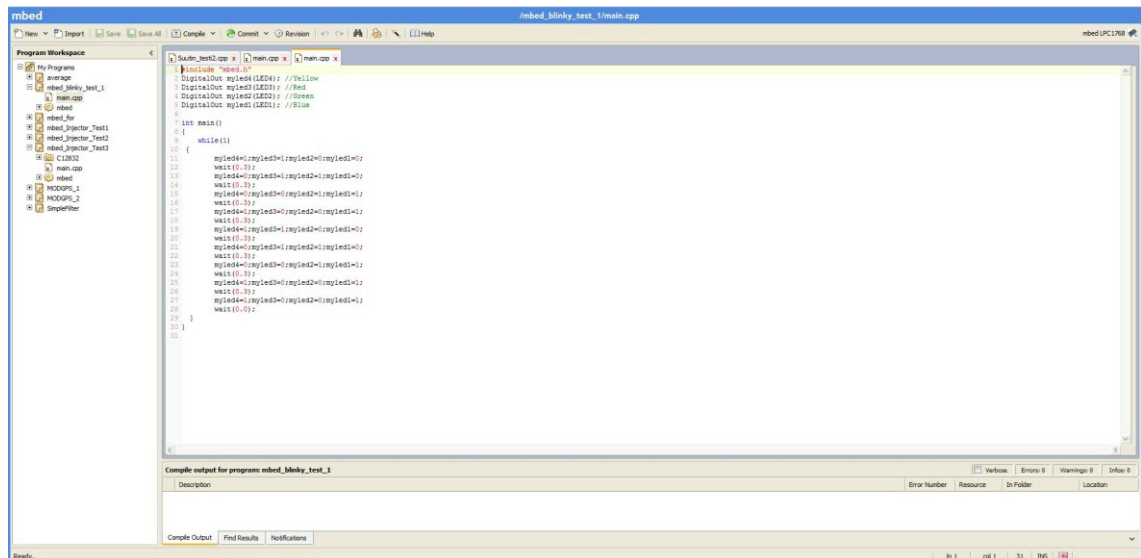
Kuva 2. LPC1768:n tekniset ominaisuudet [2].



Kuva 3. LPC1768:n jalkojen kytkennät [2].

2.1.3 Mbed Compiler

Mbedin käyttöä varten sen omilla internetsivuilla (www.mbed.com) on ohjelmointiympäristö, jonka avulla kirjoitetaan valmis ohjelma (kuva 4). Ennen mikrokontrollerille lähetystä ohjelmointiympäristö kääntää ohjelman ja tutkii, onko siinä virheitä. Mikäli virheitä ei löydy, siirretään ohjelma itse laitteeseen tietokoneen ja laitteen -USB porttien välityksellä. Käyttäjän ei tarvitse asentaa tai määrittää mitään jotta ohjelmointiympäristö ja LPC1768 toimivat yhdessä. Kun ohjelmointiympäristö löytyy verkosta, voi siihen kirjautua käytännössä mistä tahansa ja jatkaa ohjelmansa tekemistä siitä, mihin on edellisellä kerralla jäänyt. Valmiit ja keskeneräiset ohjelmat tallentuvat verkkoon automaattisesti. [3.]



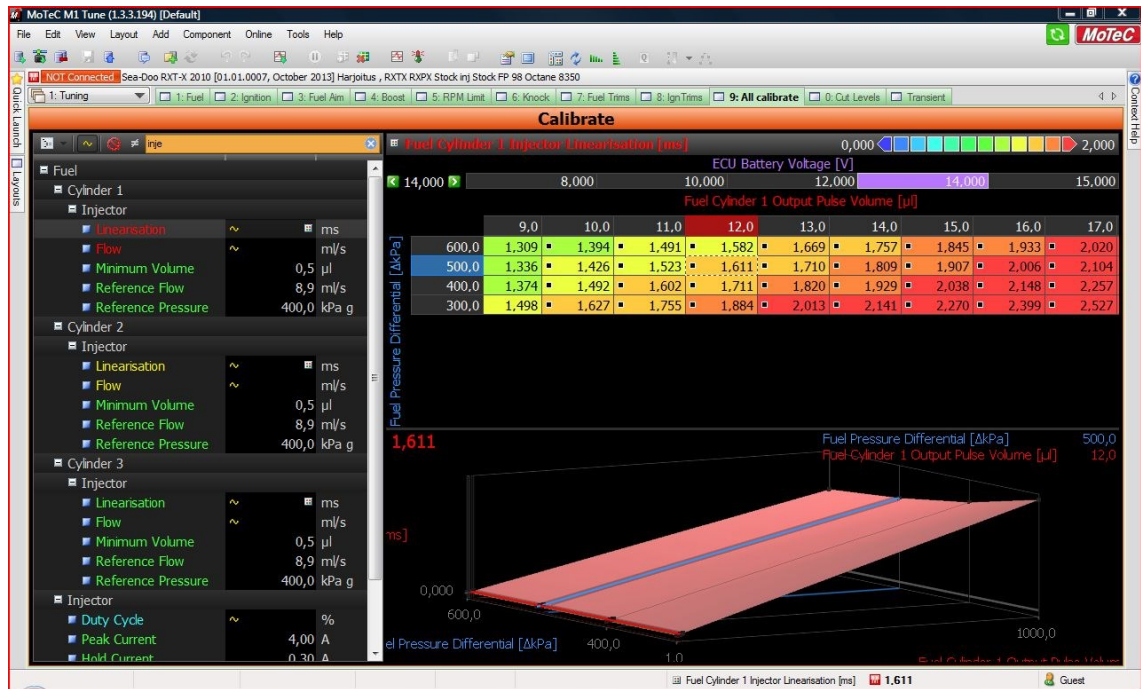
Kuva 4. Mbed-ohjelmointiympäristö.

2.2 Motec M1 Tune

Motec on australialainen moottorinohjainlaitteiden valmistaja. Motecin M1 Tune on M1-sarjan moottorinohjausyksiköille tarkoitettu kalibrointiohjelma, jolla valmis ohjelma lähetetään moottorinohjausyksikköön. Ohjelma on ladattavissa ilmaiseksi (www.motec.com).

Motec tarjoaa verkkosivuillaan valmiita kalibrointitiedostoja moottorinohjainlaitteille. Nämä tiedostot sisältävät polttoainesuuttimien ominaisuuksista kertovat parametrit, joihin ohjainlaitevalmistaja on päätenyt omissa mittauksissaan. Näitä tuloksia on tässä työssä käytetty vertailukohtana omille mittauksille, kun mittauksen kohteena on käytetty identtisiä suuttimia. Näin toimimalla on pyritty varmistamaan oman mittaustekniikan oikeellisuus.

X-akselilla on kuvattuna suuttimen suihkutuspää (µl), Y-akselilla polttoainesuuttimen yli oleva paine-ero (kPa) sekä Z-akselilla polttoainesuuttimen käyttämä jännite (V). Kartaston soluihin on tallennettu vaadittu polttoainesuuttimen aktivointipulssin kesto (ms) (kuva 5). Akun jännitetaso vaikuttaa polttoainesuuttimen latenssiaikaan eli viiveeseen. Tämä johtuu polttoainesuuttimen sisältämän käämin induktanssista. Tätä varten mittauksia tehtiin käyttäen eri jännitetasoja käytössä olleesta virtalähteestä.



Kuva 5. Näkymä Motec M1 Tunesta.

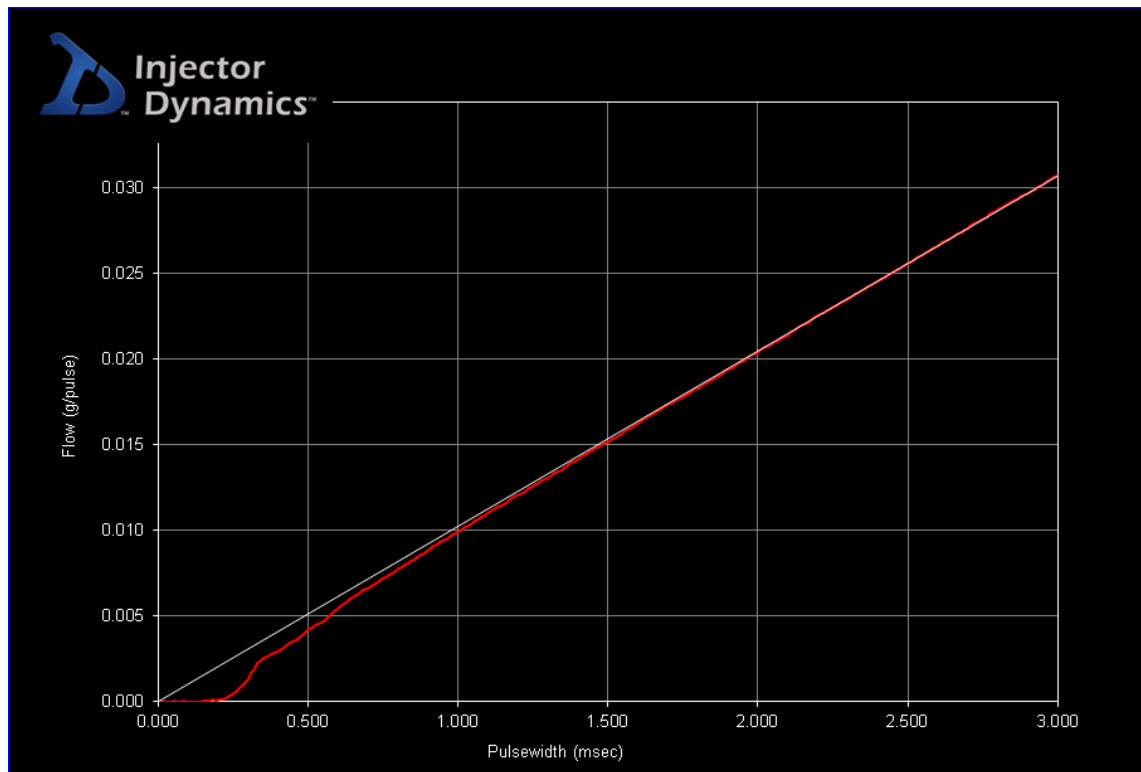
2.3 Polttoainesuuttimet

2.3.1 Lineaarinen ja epälineaarinen alue

Suuttimella on lineaarinen ja epälineaarinen alue. Kun polttoainesuuttimen virtauskapasiteetti on tunnettu, niin lineaarisella alueella polttoainesuuttimen aktiivointiajan kaksinkertaistaminen kasvattaa suihkutetun polttoainemäärän samassa suhteessa. Tulokset on tällöin teoriassa ennustettavissa.

Epälineaarinen alue on pienillä suuttimen aukioloajoilla tapahtuvaa epäsäännöllisyyttä suuttimen virtauksessa. Nämä epäsäännöllisyydet johtuvat suuttimen sähköisistä ja fysikaalisista ominaisuuksista. Suuttimen käämin induktanssi pyrkii estämään virran muutosta aktiivointipulssin alussa. Tämä hidastaa magneettikentän muodostumista ja samalla suuttimen neulaventtiilin aukeamista. Lisäksi neulaventtiilin massan aiheuttama inertia hidastaa aukeamista. Neulaventtiili saattaa joissain tapauksissa myös pompahtaa liikkeenrajoittimestaan, mikä saattaa aiheuttaa kuvassa 6 näkyvän aaltomaisen kuvaajan epälineaarisella alueella.

Kuvassa 6 on havainnollistettu polttoaineen virtausmäärää suuttimen epälineaarilla ja lineaarisella alueella. Kuvassa Y-akselilla on kuvattuna suihkutettu polttoaineen määrä ja X-akselilla suuttimen aktivointipulssin kesto. Kuvasta voidaan nähdä, kuinka alle 1 ms:n alueella suuttimen suihkuttama polttoaine määrä on epälineaarinen, mikä tarkoittaa, että polttoaineen virtausmäärä suuttimen läpi on vaikeasti ennustettavissa. Eri suutinmallien välisistä sähköisistä ja mekaanisista eroavaisuuksista johtuen jokaisella suutinmallilla on erittäin yksilöllinen käytös epälineaarilla alueella.



Kuva 6. Suuttimen epälineaarinen alue kuvattuna [5].

2.3.2 Vertailusuutin

Vertailusuuttimena käytettiin Seadoon RXT-X 260 RS -mallisessa vesijetissä käytettävää Denso 420874834 -polttoainesuutinta (kuva 7). Suutinta käytettiin itse kehitetyn mittausjärjestelmän ja -tekniikan mittatarkkuuden varmistamiseksi. Saatuja mittaustuloksia verrattiin ohjainlaitevalmistajan (Motec) tekemiin mittauksiin identtisellä polttoainesuuttimella.



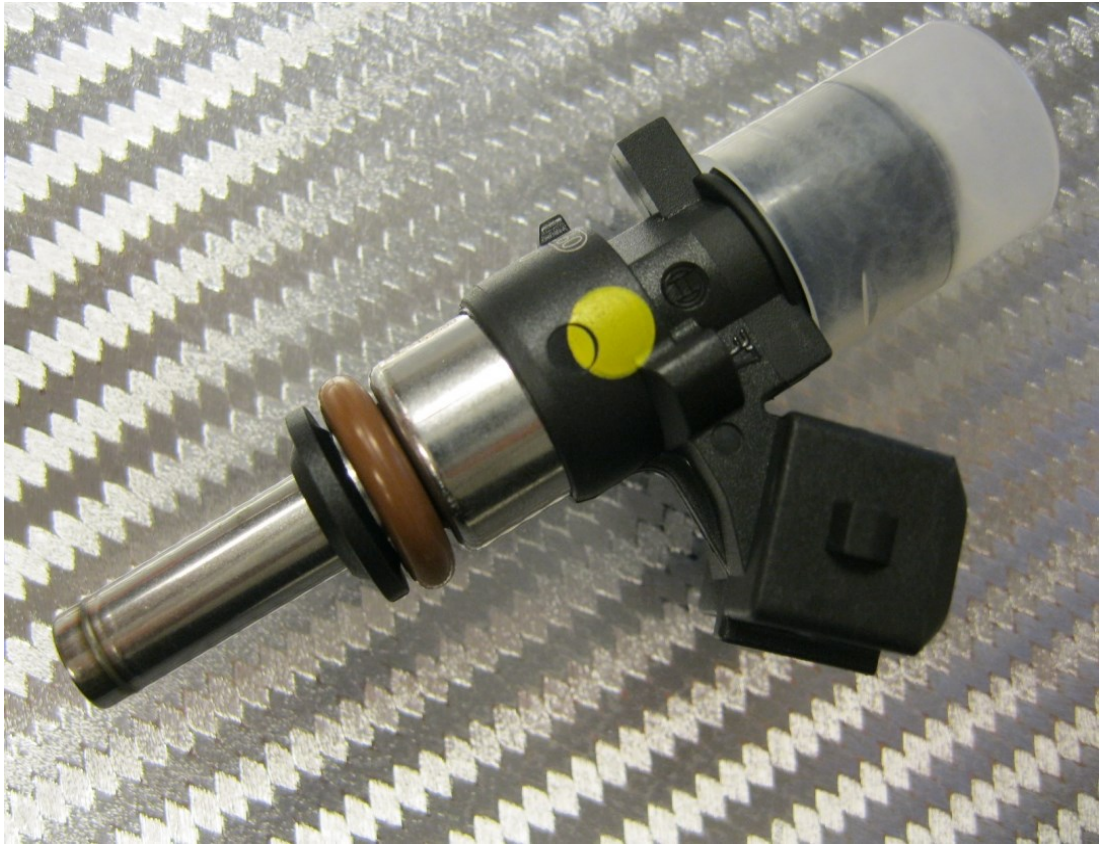
Kuva 7. Denso 420874834 [6]

2.3.3 Mitattava suutin

Kun mittausmenetelmä oli todettu riittävän tarkaksi, siirryttiin mittaamaan ennalta määrittämätöntä Boschin valmistamaa EV14-sarjan 957 cc -polttoainesuutinta (kuva 8). Tätä suutinta varten ei ole tarjolla ohjainlaitevalmistajan määrittämiä kalibrointiparametreja. Tämä suutin on laajalti käytössä, ja sen virtauskapasiteetti on huomattavasti suurempi kuin tässä työssä vertailuun käytettyjen Denson valmistamien suuttimien.

Isompaan suuttimeen siirtymisestä tulee välttämätöntä, heti kun vakiokuntoisesta RXT-X 260 RS -mallista halutaan saada enemmän tehoa. Alkuperäisten suuttimien virtauskapasiteetti on rajallinen, kun muut moottorin komponentit mahdollistaisivat vielä suuremman tehon ulosmittauksen.

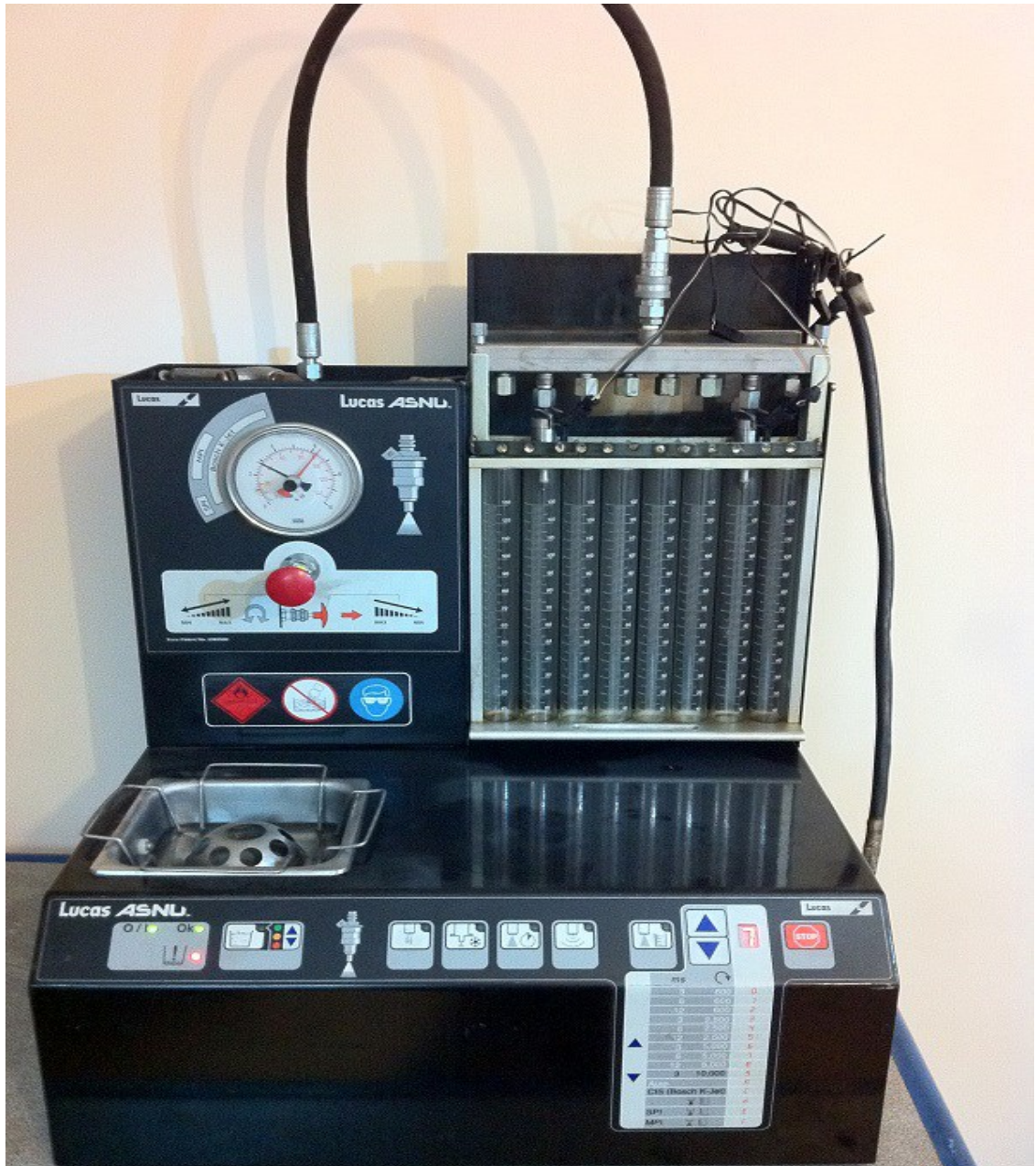
Tavoitteena oli kyetä määrittämään Bosch EV14 -suuttimen ennalta tuntemattomat kalibrointiparametrit moottorinohjainlaitetta varten.



Kuva 8. Bosch EV14 [7]

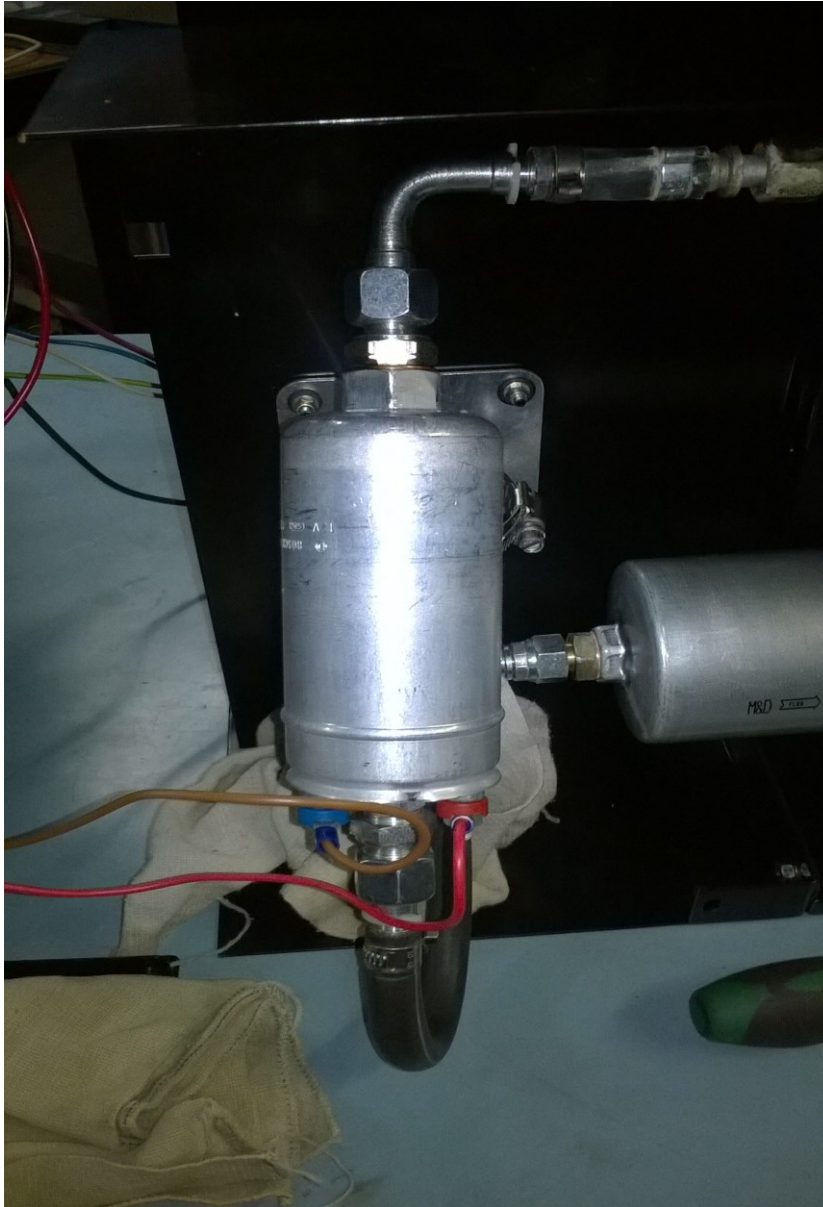
2.4 Lucas ASNU YWB800

Lucas ASNU YWB800 (kuva 9) on Metropolia Ammattikorkeakoulun polttoainesuuttimien testauslaite. Sitä käytettiin tässä työssä hyödyksi muutamien muutoksin.



Kuva 9. Polttoainesuuttimien testauslaite Lucas ASNU YWB800 [3].

Testerin alkuperäinen polttoainepumppu ei soveltunut tähän työhön sillä sen tuottama paine jäi liian pieneksi, kun testauksessa tarvittiin jopa kuuden kPa:n painetta. Alkuperäisen pumpun tilalle valittiin Boschin valmistama 044-polttoainepumppu (kuva 10).



Kuva 10. Bosch 044 -polttoainepumppu asennettuna.

Testerissä on valmiiksi asetettuja testausmalleja, mutta ne olivat testausajaltaan liian lyhyitä, kun suutinta testattiin pienellä paineella ja lyhyellä aukioloajalla. Lyhyellä testiajalla suutin ehtii suihkuttaa testiastiaan niin vähän polttoainetta, ettei mittausta voitu suorittaa tarvittavalla tarkkuudella. Tästä johtuen testauslaitteisto purettiin auki ja laitteen polttoainepumppua ohjaavien johtojen väliin tehtiin niin sanottu hyppyjohto, jonka avulla pystyttiin itse määrittämään polttoainepumpun toiminta-aika.

Testauslaitteiston polttoainekiskoon asennettiin erillinen painemittari. Tällä haluttiin varmistua siitä, että polttoaineenpaine kiskolla on juuri haluttu. Testerissä oleva

alkuperäinen mittari antoi suuremmilla paineilla epämääräistä lukemaa ja suoraan polttoainekiskolta mitattu lukema on tarkempi kuin kauempaa polttoainelinjasta.

Testauslaitteiston omat mitta-astiat olivat myös liian epätarkkoja, minkä takia tulevia testauksia varten ostettiin pienempiä ja tarkemmalla mitta-asteikolla olevia mitta-astioita (kuva 11). Kun mittauksissa ei enää käytetty laitteen alkuperäisiä mitta-astioita, tehtiin mittauksia varten polttoainekiskolle uusi teline. Teline taiteltiin millin paksuisesta pellistä, johon työstettiin paikat polttoainekiskon mittojen mukaan. Koska tarkoituksena oli tehdä väliaikainen testauslaitteisto, tehtiin teline mahdollisimman yksinkertaiseksi.



Kuva 11. Mitta-astiat.

2.5 Tera Term

Tera Term on ilmainen, avointa lähdekoodia käyttävä ohjelmistotyökalu jolla voidaan emuloida tietokoneen lähtöjä [4], tässä kohtaa tietokoneen USB-porttia.

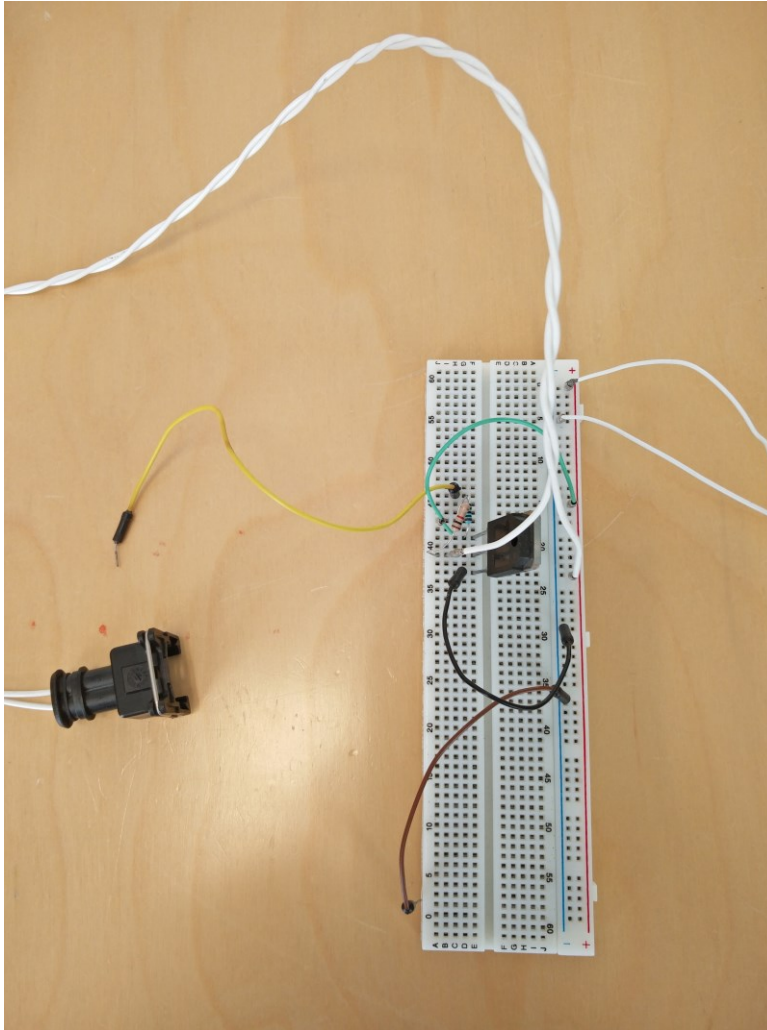
Tera Termia käytettiin laskurina, joka laski jokaisen polttoainesuuttimen aukaisu käskyn joka LPC1768-mikrokontrollerista lähti itse suuttimelle. Tällä tapaa pystyttiin varmistamaan että tehdyssä ohjelmassa ei ole virheitä ja suutin aukeaa juuri niin monta kertaa kuin haluttiin. Tämä oli erittäin tärkeää kun laskettiin tehdyn mittauksen jälkeen yhdellä polttoainesuuttimen aktivointipulssilla suihkutettua polttoaine määrää. Mittauksissa polttoainesuuttimelle annettiin tuhansia aktivoitipulsseja, tämän takia laskuri oli työssä välttämätön.

2.6 Polttoaineen lämpötila

Käytetyn testipolttoaineen lämpötilan seurauksen toteutettiin käyttäen jännitemittariin kytkettävää termoparia. Koska polttoaineen tiheys laskee lämpötilan noustessa, haluttiin se pitää mahdollisimman tasaisena, ettei lämpötilan muutoksen takia tulisi liiallisia mittausvirheitä.

3 Kytkennät

Laitteisto koottiin koekytkentälevylle (kuva 12). Pinnien väliseen yhteyteen on käytetty tavallisia 2mm:n kytkentäkaapeleita. Mbed saa virtansa tietokoneelta USB-kaapelin välityksellä. Mbed ohjaa koekytkentälevylle asennettua transistoria joka lähettää suuttimelle aktivoitipulssin.



Kuva 12. Laitteisto.

4 Ohjelmointi

Varsinaisessa mittauksessa käytettiin alla olevasta koodista vain rivejä 37 – 42. Loput rivit ovat ulkopuolisen näytön käyttöä varten. Näistä voi huomata että kun halutaan ohjata pelkästään suuttimen avautumista ja sulkeutumista, niin ohjelma itsessään on erittäin yksinkertainen. Jos siihen halutaan lisätä monitorointitoimintoja, niin ohjelmasta tulee heti huomattavasti monimutkaisempi.

Työn edetessä kokeiltiin myös haastavampaa ohjelmaa, jossa käytettiin erillistä näyttöä, mutta niitä ei käsitellä tarkemmin tässä työssä. Näytössä saatiin näkymään laskuri, joka kertoi suihkutusten määrän. Tässä työssä laskurina toimi Tera Term.

- Rivi 37, määrittää ohjelmassa suuttimelle lepoajan jokaisen aktivointipulssin välillä.
- Rivi 38, aktivoi mbedin digitaalisen ulostulon, joka on kytketty suuttimen virtaa kontrolloivan transistorin kannalle.
- Rivi 40, määrittää suuttimen aktivoinpulsstin pituuden. Testeissä havaittiin viive käytettävän transistorin kytketyessä johtavasta tilasta johtamattomaan. Viive oli noin 5us, mikä kompensoitiin negatiivisella luvulla aktivointipulssin perässä.
- Rivi 42, de- aktivoi mbedin digitaalisen ulostulon, joka on kytketty suuttimen virtaa kontrolloivan transistorin kannalle.

```

1. #include "mbed.h"
2. #include "C12832.h"
3.
4. DigitalOut IGBT(p21);
5. DigitalOut led2(LED2);
6. Serial pc(USBTX, USBRX);
7.
8. PwmOut r (p23);
9. PwmOut g (p24);
10. PwmOut b (p25);
11. C12832 lcd(p5, p7, p6, p8, p11);
12. AnalogIn TimeSwitch(p20);
13. AnalogIn NumberOfTestsSwitch(p19);
14. DigitalIn StartButton(p14);
15.
16. float TestTime;
17. float TestTime_ms;
18. float TestTimeFiltered;
19. int NumberOfTests;
20. int i=0;
21. int main()
22.
23. {
24.
25. pc.baud(9600);
26. //pc.printf("Connected to mBed...\r\n");
27. //Timer SystemRunTime;
28. //SystemRunTime.start();
29. //Timer InjectorTestTime;
30.
31. //while(1)
32.
33. //{
34.
35. for (i=1; i<=1; i+=1)
36.     {
37.         wait(0.01);
38.         IGBT=1;
39.
40.         wait_us(5000000-5);
41.         //wait_us(TestTime);

```

```
42.     IGBT=0;
43.     pc.printf("Testi: %d", i);
44.     printf("\r\n");
45.     }
46.
47.
48. }
49. //}
```

5 Testaus

5.1 Mittaus

Mittaus tapahtui muokkaamalla Mbed ohjelmointiympäristössä avoinna olevaan ohjelmaan haluttu suuttimen aukioloaika. Tämän jälkeen ohjelma siirrettiin ohjelmointiympäristöstä LPC1768-mikrokontrolleriin. Kun ohjelma on siirtynyt laitteeseen, painetaan laitteen päällä olevaa kytkintä joka viimeistelee ohjelman asennuksen. Nyt ohjelma on valmis käytettäväksi.

Seuraavaksi kytketään testerille tehtyjen hyppyjohtojen avulla polttoainepumppu päälle ja painetaan LPC1768:sta löytyvää kytkintä, jolloin ohjelma alkaa suorittamaan siihen kirjoitettuja toimia läpi. Ennen tätä polttoainekiskon paine ja virtalähteen asetukset on jo säädetty halutuiksi.

Testin loputtua sammutetaan pumppu, kirjataan suihkutettu polttoaineen määrä ylös, lasketaan yhden suihkutuksen tulos ja tyhjenetään mittalasi. Virheiden minimoimiseksi tämän jälkeen suoritettiin testi uudelleen, samalla suuttimella ennen muiden asetusten muutoksia.

5.2 Mittaustuloksia

Seuraavaksi verrattiin Denson 420874834 -suuttimella saatuja mittaustuloksia ohjainlaitevalmistajan tekemiin mittauksiin. Mukana myös mittaukset jotka on tehty ennalta määrittämättömällä Bosch EV14 -suuttimella.

Taulukoissa 1 ja 2 on ensin ylempänä ohjainlaitevalmistajan tekemät mittaukset ja alempana omat mittaukset samoilla suuttimen aukioloajoilla. Mittauksissa ei määritetty jokaista pistettä, koska tämä olisi vienyt kohtuuttomasti aikaa.

- Keltaisella pohjalla on akun jännite (V).
- Sinisellä pohjalla on polttoaineenpaine (kPa).
- Punaisella pohjalla on kuvattuna suuttimen aukioloaika (ms).
- Vihreällä pohjalla on omissa mittauksissa toteutunut suihkutusmäärä (μl).
- Oranssilla pohjalla on haluttu suihkutusmäärä (μl).

Taulukoista voidaan nähdä, että pienillä suuttimen aukioloajoilla ja varsinkin suurella polttoaineen paine-erolla ei päästy täysin samoihin tuloksiin ohjainlaitevalmistajan mittausten kanssa. Sea-doossa käytetään vakiona 400 kPa:n polttoaineen suihkutuspainetta. Taulukoista voidaan nähdä, että sillä tehdyt mittaukset ovat todella lähellä ohjainlaitevalmistajan tekemiä mittauksia. Erot ovat niin pieniä, että ne voivat johtua polttoainesuuttimien valmistustoleransseista.

Suuremmilla paine-eroilla ja pienillä aukioloajoilla mitattaessa huomattiin, ettei näkyvää polttoaineen suihkutusta tapahdu lainkaan. Yhdellä suihkutuskerralla suuttimesta tuleva polttoaine kerääntyi suuttimen runkoon ja valui tippoina mittalasiin. Suuttimen neulaventtiili ei ehdi aueta kunnolla, kun suuttimen neulaa painaa suuri paine ja aktivointipulssi on riittävän lyhyt.

Taulukko 1. Mittaustulokset referenssipolttoainesuuttimella (14 V).

ECU Battery Voltage [V]		Motec, Denso Injector																			
14V		Fuel Output Pulse Volume [ul]																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fuel Pressure Differential [kPa]	600,0	0,964	1,018	1,052	1,078	1,101	1,122	1,139	1,273	1,309	1,394	1,491	1,582	1,669	1,757	1,845	1,933	2,02	2,108	2,196	2,284
	500,0	0,922	0,978	1,013	1,04	1,059	1,078	1,242	1,268	1,336	1,426	1,523	1,611	1,710	1,809	1,907	2,006	2,104	2,203	2,302	2,400
	400,0	0,882	0,936	0,969	0,993	1,014	1,180	1,214	1,237	1,374	1,492	1,602	1,711	1,820	1,929	2,038	2,148	2,257	2,366	2,475	2,585
	300,0	0,826	0,874	0,906	0,93	0,949	1,165	1,248	1,374	1,498	1,627	1,755	1,884	2,013	2,141	2,270	2,399	2,527	2,656	2,785	2,913

ECU Battery Voltage [V]		Omat, Denso Injector																			
14V		Fuel Output Pulse Volume [ul]																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fuel Pressure Differential [kPa]	600,0	0,964	1,018	1,052	1,078	1,101	1,122	1,139	1,273	1,309	1,394	1,491	1,582	1,669	1,757	1,845	1,933	2,02	2,108	2,196	2,284
	500,0	0,922	0,978	1,013	1,04	1,059	1,078	1,242	1,268	1,336	1,426	1,523	1,611	1,710	1,809	1,907	2,006	2,104	2,203	2,302	2,400
	400,0	0,882	0,936	0,969	0,993	1,014	1,180	1,214	1,237	1,374	1,492	1,602	1,711	1,820	1,929	2,038	2,148	2,257	2,366	2,475	2,585
	300,0	0,826	0,874	0,906	0,93	0,949	1,165	1,248	1,374	1,498	1,627	1,755	1,884	2,013	2,141	2,270	2,399	2,527	2,656	2,785	2,913
		0,500		1,867			5,750			8,750	9,750		11,500		13,750		15,500		17,500		

Taulukko 2. Mittaustulokset referenssipolttoainesuuttimella (12 V).

ECU Battery Voltage [V]		Motec, Denso Injector																			
12V		Fuel Output Pulse Volume [ul]																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fuel Pressure Differential [kPa]	600,0	1,197	1,263	1,305	1,335	1,359	1,379	1,399	1,552	1,554	1,627	1,734	1,847	1,936	2,026	2,116	2,206	2,296	2,386	2,471	2,565
	500,0	1,143	1,211	1,255	1,288	1,313	1,378	1,465	1,522	1,522	1,643	1,746	1,846	1,946	20,46	2,146	2,246	2,347	2,447	2,547	2,647
	400,0	1,090	1,151	1,189	1,221	1,263	1,374	1,450	1,481	1,567	1,670	1,783	1,895	2,008	2,121	2,234	2,347	2,459	2,572	2,685	2,798
	300,0	1,000	1,053	1,087	1,118	1,190	1,334	1,397	1,541	1,666	1,798	1,929	2,060	2,192	2,323	2,454	2,585	2,717	2,848	2,979	3,114

ECU Battery Voltage [V]		Omat, Denso Injector																			
12V		Fuel Output Pulse Volume [ul]																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fuel Pressure Differential [kPa]	600,0	1,197	1,263	1,305	1,335	1,359	1,379	1,399	1,552	1,554	1,627	1,734	1,847	1,936	2,026	2,116	2,206	2,296	2,386	2,471	2,565
	500,0	1,143	1,211	1,255	1,288	1,313	1,378	1,465	1,522	1,522	1,643	1,746	1,846	1,946	20,46	2,146	2,246	2,347	2,447	2,547	2,647
	400,0	1,090	1,151	1,189	1,221	1,263	1,374	1,450	1,481	1,567	1,670	1,783	1,895	2,008	2,121	2,234	2,347	2,459	2,572	2,685	2,798
	300,0	1,000	1,053	1,087	1,118	1,190	1,334	1,397	1,541	1,666	1,798	1,929	2,060	2,192	2,323	2,454	2,585	2,717	2,848	2,979	3,114
		0,292			1,330			5,670			9,250			12,500			15,500				18,000

Näiden mittauksien perusteella todettiin, että mittaustapa on riittävän tarkka ja toimiva. Niinpä voitiin siirtyä tutkimaan Bosch EV14 -suuttimia.

Taulukossa 3 on kuvattuna mittaukset, jotka on tehty entuudestaan tuntemattomalla Bosch EV14 -suuttimella. Taulukossa 3 punaisella pohjalla on mittaamalla määritetyt aukioaloajat, joilla suuttimesta on saatu suihkutettua haluttu polttoainemäärä. Esimerkiksi

10 μ l:n polttoainemäärän suihkuttamiseksi 14 V:n akkujännitteellä ja 400 kPa:n paine-erolla vaatii 1,541 ms:n aktivointipulssin.

Taulukko 3. Mittaustulokset Bosch EV14 -polttoainesuuttimella.

ECU Battery Voltage [V]		Omat, Bosch EV14																			
12V		Fuel Output Pulse Volume [μ l]																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fuel	600,0			1,891			1,930		1,952		2,012		2,030		2,155		2,221		2,353		
Pressure	500,0			1,701			1,745		1,778		1,955		2,010		2,089		2,160		2,321		
Differential	400,0			1,500			1,635		1,776		1,800		1,930		2,025		2,150		2,251		
[kPa]	300,0			1,305			1,550		1,690		1,810		1,940		2,050		2,199		2,345		

ECU Battery Voltage [V]		Omat, Bosch EV14																			
14V		Fuel Output Pulse Volume [μ l]																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fuel	600,0			1,542			1,555		1,577		1,623		1,703		1,789		1,872		1,978		
Pressure	500,0			1,426			1,498		1,467		1,590		1,689		1,743		1,826		1,924		
Differential	400,0			1,340			1,376		1,389		1,541		1,645		1,711		1,815		1,923		
[kPa]	300,0			1,225			1,282		1,404		1,502		1,599		1,715		1,830		1,950		

5.3 Kokoonpano

Kuvassa 13 on kuvattu tässä työssä käytetyt laitteet mittaus valmiudessa.



Kuva 13. Laitekokoonpano

6 Pohdintaa

6.1 Suuttimen latenssi

Suuttimia koskee niin sanottu latenssiaika. Tällä tarkoitetaan aikaa, joka suuttimella kestää hetkestä, jolloin se on saanut käskyn avautua suihkuttamaan polttoainetta, siihen, että se on täysin auki.

Latenssin määrittäminen tehtiin tässä työssä mittaamalla oskilloskoopilla. Tunnetuille suuttimille valmistajat saattavat ilmoittaa mitatun ajan, mutta tässä työssä käytetyille tuntemattomille Bosch EV14 -suuttimille ajan joutui itse mittaamaan.

6.2 Mittausmenetelmä

Koska mittausmenetelmälle ei ole olemassa standardisoitua tapaa, haluttiin mahdolliset mittausvirheet minimoida. Tästä syystä työtä varten ostettiin mahdollisimman tarkat mitta-astiat, mutta niidenkin käytössä tulee varmasti mittausvirheitä.

Mittaukseen pitäisi ottaa mukaan tarkkuusvaaka, jonka avulla voidaan tarkemmin määrittää suihkutetun polttoaineen määrä. Pienillä suuttimen aktivointiajoilla suutin suihkuttaa niin vähän polttoainetta (muutamia mikrolitroja), että sen havaitseminen tarkastakin mittalasiista on erittäin vaikeaa. Tässä työssä pienillä polttoainesuuttimen aktivoointiajoilla tehdyt mittaukset tehtiin todella pitkinä, useina tuhansina suuttimen aktivointeina. Tällöin saatiin tarvittava, mitattavissa oleva määrä polttoainetta suihkutettua mittalasiin. Tämä oli välttämätöntä, että saatiin tulokset mitattua riittävällä tarkkuudella.

Tämän todella pitkien testien ongelman voisi eliminoida käyttämällä tarkkuusvaakaa. Tässä työssä ei tarkkuusvaa'an käyttö ollut mahdollista niiden suuren hankinta hinnan takia. Vaa'an avulla voitaisiin suoraan laskea mitta-astian painon muutoksesta sinne suihkutetun polttoaineen määrä (bensiniin tiheys on noin 0,75 kg/l, 18 celsiusastetta).

6.3 Lämpötila

Pidemmät testaukset suuremmilla paineilla aiheuttivat ongelmia testi polttoaineen lämmön kanssa. Lämpötila pääsi nousemaan halutusta tasosta (17–20 -celsiusastetta) yli kymmenellä asteella celsiusta. Tästä syystä testauksissa jouduttiin pitämään välillä taukoja ja odotella testinesteen jäähtymistä. Suuremman testinesteen keruusäiliö olisi tässä kohtaa hyvä investointi ja jopa nesteen jäähdytystä kannattaisi harkita. Tällöin voitaisiin päästä eroon nesteen liiallisesta lämpiämisestä ja samalla varmistua siitä että itse testauksissa olisi mahdollisimman eroja jotka voivat vaikuttaa mitattuihin tuloksiin.

6.4 Automatisointi

Polttoainesuuttimien mittaus tässä työssä käytetyllä menetelmällä on hidasta ja vaatii jatkuvasti ihmisen läsnäoloa. Testi pitää aloittaa, polttoainepumppu käynnistää, tulkita mitta-astian tulos, tyhjentää mitta-astia, kirjata ja laskea saatu tulos ja aloittaa testi alusta. Tähän menee jatkuvasti aikaa ja suurin osa ajasta menee odotteluun, että kirjoitettu ohjelma on suorittanut testin loppuun.

Automaation avulla voitaisiin suorittaa testejä huomattavasti nopeammin ja suuremmalla tarkkuudella. Tällöin kirjoitettu ohjelma voisi kirjata tarkkuusvaa'an näyttämän lukeman ja suorittaa laskutoimituksen siitä, kuinka paljon polttoainetta yhdellä suuttimen aktivointipulssilla on suihkutettu.

Automatisoinnin kanssa olisi myös järkevää harkita useamman suuttimen mittausta samanaikaisesti, varsinkin jos mittauksia halutaan tehdä isommassa mittakaavassa. Tällöin kannattaisi harkita kokonaan oman mittausjärjestelmän suunnittelua eikä käyttää jo olemassa olevaa hyödyksi (ASNU) niin kuin tässä työssä on tehty.

Nämä edellä mainitut vaatisivat paljon monimutkaisemman ohjelman tekoa kuin mitä tässä työssä on käytetty. Mutta laitteiston rakentaminen olisi mahdollista. Tarvittavan ohjelman monimutkaisuuden takia olisi ohjelmoinnista hyvä olla kokemusta jo entuudestaan.

7 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa laitteisto imusarjasuihkutteisen ottomoottorin polttoainesuuttimien yksilöllistä mittausta varten.

Työssä saatiin tehtyä mittauslaitteisto, jonka toiminta saatiin todistettua tehdyillä mittauksilla. Mittauslaitteisto toimi riittävällä tarkkuudella niillä Denson-suuttimien operointialueilla, joita niitä todellisuudessa käytetään. Myös ennalta määrittämättömien Bosch EV14 -suuttimien kalibrointikartat saatiin määritettyä ja tulokset näyttävät loogisilta. Tarkoituksena on seuraavaksi kokeilla niitä kiinni imusarjasuihkutteisessa moottorissa ja aloittaa kalibrointi tässä työssä määritetyillä arvoilla.

Tästä työstä kiinnostavan teki se, että pääsi kokeilemaan ja perehtymään aiheisiin, joita Metropolia Ammattikorkeakoulussa ei jälkimarkkinoinnin suuntautumis-vaihtoehdossa opeteta.

Lähteet

- 1 Mbed. 2014. Verkkodokumentti. ARM.
<<https://developer.mbed.org/platforms/mbed-LPC1768/>> Luettu 5.9.2014.
- 2 Mbed NXP LPC1768. 2014. Verkkodokumentti. ARM.
<<https://developer.mbed.org/platforms/mbed-LPC1768/>> Luettu 7.9.2014.
- 3 Lucas Asnu. 2016. Verkkodokumentti. CTF Performance.
<<http://www.ctf-performance.fr/les-bancs/banc-injecteurs/>> Luettu 13.1.2016.
- 4 Tera Term Project. 2005. Verkkodokumentti. Tera Term.
<<https://tssh2.osdn.jp/index.html.en> > Luettu 23.9.2015.
- 5 Epälineaarisen alueen kuvaaja. 2016. Verkkodokumentti. Injector Dynamics.
<<http://injectordynamics.com/wp-content/uploads/2013/12/GMCHART3.gif>>
Luettu 3.3.2016.
- 6 Denso fuel injector. 2016. Verkkodokumentti. OSD Parts.
<http://www.acm-ab.se/public/img/user/0280158040__3_.jpg> Luettu 13.1.2016.
- 7 Bosch EV14. 2016. Verkkodokumentti. Acn-Ab.
<http://www.acm-ab.se/public/img/user/0280158040__3_.jpg> Luettu 14.1.2016.

