

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Otaniemi Flying Finns ry

FORMULA SAE -AJONEUVON OHJAUSELEKTRONIIKKA



Espoo, 22.11.2009



Sisältö

1 Johdanto	1
2 Ohjauselektronikka	2
2.1 Käyttöjännitteen vakavointi	2
2.2 Anturit	3
2.3 Tehoaste	5
3 Ohjelmisto	9
Viitteet	10



1 Johdanto

Kilpailukäyttöön tarkoitetun ajoneuvon polttomoottorin ohjaus on nykypäivänä toteutettu mikroprosessoriteknikalla. On tärkeää, että polttoaineen ruiskutusta ja polttoaineseoksen sytyttämistä palotilassa voidaan kontrolloida hyötysuhteen sekä tehokkuuden parantamiseksi [1]. Samaa tekniikkaa käytetään myös tavallisissa henkilöautoissa kulutuksen ja päästöjen pienentämiseksi.

Polttomoottorin ohjaaminen perustuu järjestelmään kytkettyjen antureiden välittämiin tietoihin. Moottorin kannalta tärkeimpiä antureita ovat kampi- ja nokkaakseleilla sijaitsevat nopeusanturit, imusarjassa oleva paineanturi, öljynpainetta mittaava anturi sekä pakokaasun happipitoisuutta mittaava lambda-anturi. Näiden lisäksi mitataan yleensä akun jännitettä, öljyn lämpötilaa ja pakokaasujen lämpötilaa, mutta nämä mittaukset eivät ole moottorin toiminnan kannalta välttämättömiä.

Formula SAE[®] on lähinnä autotekniikan opiskelijoille suunnattu suunnittelukilpailu, jonka järjestäjänä toimii SAE (Society of Automotive Engineers). Kilpailussa opiskelijoiden muodostamat joukkueet suunnittelevat ja valmistavat itse pienen formulatyypisen kilpa-auton, joilla ajetaan kilpaa kansainvälisissä tapahtumissa [2]. Osallistujien paremmuus ratkaistaan auton suunnittelun, markkinoinnin ja ajosuoritusten perusteella.

Teknillisen korkeakoulun opiskelijoiden muodostaman yhdistyksen *Otaniemi Flying Finns (OFF)* tavoitteena on osallistua Formula SAE -kilpailuihin ja menestyä niissä tulevaisuudessa. Suomessa vastaavia projekteja on käynnissä ainakin Metropolia ammattikorkeakoulussa ja Tampereen ammattikorkeakoulussa. Tällä hetkellä ajokunnossa olevaa autoa ei ole olemassa, koska valmistusprosessissa on ollut paljon ongelmia. Ajoneuvon suunnittelu on pääosin valmiina, mutta muutamia yksityiskohtia moottorin, alustan ja sähköjärjestelmän osalta on vielä kesken.

Polttomoottorin ohjauksessa käytettäviä ohjausyksiköitä (engl. Engine Control Unit, ECU) on tarjolla monilta kaupallisilta valmistajilta. Formula SAE:n säännöt sallivat niiden käyttämisen, mutta tuotteissa on rajoituksia. Kun halutaan suunnitella erikoisominaisuuksia sisältävä kilpa-auto, ei valmiita ohjausyksiköitä voida sellaiseen käyttää.

Tämän raportin tavoitteena on esitellä Otaniemen formulaprojektissa käytettävää omavalmisteista ohjauselektronikkaa ja -ohjelmistoa. Luvussa 2 perehdytään ohjauselektronikkaan ja siihen liitettäviin antureihin. Luvussa 3 käsitellään moottorinohjausyksikössä käytettävää ohjelmistoa, joka kirjoitetaan C-kielellä.

2 Ohjauselektronikka

Ajoneuvo on erittäin haasteellinen ympäristö sähköjärjestelmän kannalta. Lämpötilanvaihtelut ovat suuria, häiriölähteitä on runsaasti ja komponentit altistuvat jatkuvalla tärinällä. Lisäksi käyttöjännite poikkeaa huomattavasti nimellisestä 12 voltista. Käynnistyshetkellä jännite saattaa olla esimerkiksi 9 voltia ja moottorin käydessä yli 14 voltia. Kaikkiin näihin häiriöihin on ohjauselektronikassa varauduttava.

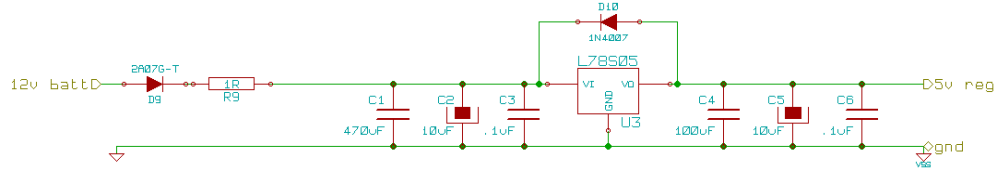
Ajoneuvossa olevien antureiden liittäminen ohjausjärjestelmään vaatii, että anturisignaaleja käsitellään ensin elektronikan avulla. Mahdollisten korkeataajuisien häiriöiden varalle tarvitaan suodatusta, ja ylijännitteitä ei saa päästää mikrokontrollereille saakka. Analogisten anturisignaalien muuntaminen digitaaliseen muotoon tapahtuu lopulta mikrokontrollerissa olevien kahden 8-kanavaisen A/D-muuntimen avulla.

2.1 Käyttöjännitteen vakavointi

Elektronikan komponentit vaativat suhteellisen vakaata käyttöjännitettä toimiakseen kunnolla. Tämä koskee etenkin käytettävää mikrokontrolleria sekä muutamaa oheista IC-piiriä. Ajoneuvoissa käytettävien latureiden tuottama jännite on kuitenkin kaikkea muuta kuin tasaista, joten ohjauselektronikkaa varten pitää järjestää käyttöjännitteen vakavointi.

Suunniteltu ohjauselektronikka tarvitsee kolme erilaista jännitetasoa: 12, 5 ja 3,3 voltia. Näistä 12 voltia käytetään lähinnä tehoasteen transistorien hilaohjauspiireissä, 5 voltia on mikrokontrollerin ja useimpien oheispiirien käyttöjännite ja 3,3 voltia tarvitaan kiihtyvyyssanturia varten. Käyttöjännitteet muodostetaan yksinkertaisten lineaariregulaattoreiden avulla, sillä hyötysuhteella ei tässä sovelluksessa ole kovin suurta merkitystä. Hakkuriteholähteen käyttämistäkin on pohdittu, mutta se toisi lisää monimutkaisuutta jo ennestään laajaan ohjauselektronikkaan.

Lineaariregulaattoreiden tulo- ja lähtöpuolilla käytetään suodatuskondensaattoreita, joilla poistetaan korkeataajuiset häiriöt. Lisäksi lähtöpuolella olevat kondensaattorit pystyvät tarpeen tullen antamaan suuria hetkellisiä virtapulsseja, joita tarvitaan puolijohdekytkimien ohjauksessa. Kuvassa 1 on esitetty piirikaavio 5 voltin käyttöjännitteen osalta.



Kuva 1: 5 voltin käyttöjännitteen vakavoinnin ja suodatuksen piirikaavio.

2.2 Anturit

Kampiakselin nopeusanturi

Kampiakselilla sijaitsee moottorin toiminnan kannalta välttämätön nopeusanturi, jolla mitataan pyörimisnopeutta ja kampiakselin asentoa. Kampiakselin asentotietoa tarvitaan laskettaessa polttoaineen suihkutuksen ja sytytyksen ajoitusta.

Ajoneuvossa käytettävässä moottorissa (Yamaha Genesis 80 FI) on valmiina kampiakselin nopeusanturi, joka on VR-tyyppinen (engl. Variable Reluctance). Anturin toiminta perustuu magneettivuon tiheyden vaihteluun anturin magneettipiirissä. Kampiakselin mukana pyörii ratas eli niin sanottu trikkeripyörä, jonka ulkokehällä on paikka 12 hampaalle. Näistä 11 on raudasta valmistettuja hampaita, ja yhden hampaan paikka on tyhjä. Tyhjä paikka tarvitaan asennon laskentaa varten, koska erillistä nollauspulsstilähtöä ei ole. Asennon laskeva algoritmi havaitsee rattaasta puuttuvan hampaan ja osaa sen perusteella päätellä oikean kampiakselin asennon.

Anturin tuottamasta analogisesta jännitesignaalista pitää muodostaa digitaalinen pulssisignaali, joka voidaan viedä edelleen mikrokontrollerille. Tähän käytetään National Instruments:n LM1815-piiriä, joka tunnistaa anturisignaalin nollakohdat ja muodostaa niiden perusteella logiikkatasoisia pulsseja [3].

Nokka-askelin nopeusanturi

Nokka-akselilla on toinen moottorin nopeusanturi, joka perustuu Hall-ilmiöön. Anturi tuottaa yhden logiikkatasoisen pulssin jokaista nokka-askelin pyörähdystä kohti, joten sitä käytetään lähinnä kampiakselilla olevan anturin tukena. Toisaalta jos kampiakselilla oleva anturi menee rikki, voidaan polttomoottoria edelleen ohjata toisen anturin perusteella.

Hall-anturin voisi periaatteessa kytkeä suoraan mikrokontrolleriin, mutta välissä kannattaa kuitenkin käyttää jonkinlaista puskurointia ja mahdollisten ylijännite-

piikkien suodatusta. Tässä projektissa puskurointiin käytetään operaatiovahvistinta TL081.

Paine-anturit

Imusarjassa olevan paineen mittauksessa käytetään MAP-anturia (engl. manifold absolute pressure), joka mittaa absoluuttista eli tyhjiöön verrattavissa olevaa painetta. Mittausdatan perusteella voidaan laskea moottoriin menevän ilman massavirtaus, jota tarvitaan polttoaineen ruiskutusajan määrittämisessä. Käytettävä anturi on valittu Freescalen MPX-sarjasta ja se antaa ulostulona jännitteen, joka on likimain suoraan verrannollinen mitattavaan paineeseen.

Öljynpainetta varten moottorissa on valmiina yksinkertainen painekytin. Se kertoo suoraan, onko öljynpaine riittävällä tasolla vai ei. Anturin liittäminen mikrokontrolleriin vaatii ainoastaan yhden ylösvetovastuksen.

Muitakin paineantureita on suunniteltu käytettävän, esimerkiksi polttoaineen ja jäähdytysnesteen paineen mittaukseen. Näihin kohteisiin on olemassa valmiita autokäyttöön suunniteltuja antureita, joiden valmistaja on usein Bosch. Ne antavat ulostulona jännitesignaalin, joka on verrannollinen paineeseen. Näin ollen paineantureiden lisääminen järjestelmään on helppoa, jos vapaita A/D-muuntimen kanavia on käytettävissä.

Lämpötila-anturit

Lämpötilan mittauksessa käytettävät anturit ovat yhtä poikkeusta lukuun ottamatta NTC- tai PTC-tyyppisiä, eli niiden resistanssi on lämpötilasta riippuva. Lämpötilan ja resistanssin välinen riippuvuus on epälineaarista, mutta tietyn toimintapisteen ympäristössä voidaan käyttää linearisointia. Joskus anturivalmistajat antavat datalehdissään valmiita sovituskäyriä tähän tarkoitukseen.

Muuttuva resistanssi täytyy muuntaa muuttuvaksi jännitesignaaliksi, jotta se voidaan tulkita A/D-muuntimen avulla. Yksinkertaisimmillaan tämä tapahtuu jännitteenjakokytkennällä, jossa toisen vakiona pysyvän resistanssin arvo on tunnettu. Mitatun jännitteen perusteella voidaan mikrokontrollerissa laskea anturin mittaama lämpötila.

Pakokaasujen lämpötilan mittauksessa resistiivinen anturi ei kuitenkaan ole mahdollinen korkeista lämpötiloista johtuen. Tähän tarkoitukseen käytetäänkin yleensä

termoparia, jonka toiminta perustuu lämpösähköiseen ilmiöön. Siinä kahden eri metallin liitoskohdassa syntyy jännite, joka on verrannollinen lämpötilaeroon.

Projektissa on suunniteltu käytettäväksi K-termoparia, jolla voidaan mitata lämpötiloja alueella $-200 \dots 1350 \text{ }^\circ\text{C}$. Termoparin lämpötilariippuvuus on noin $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Anturin ja mikrokontrollerin välillä käytetään MAX6675-piiriä, jossa termoparin jännite muutetaan digitaaliseen muotoon ja siirretään eteenpäin SPI-väylän kautta. Piiri rajoittaa mitta-alueen välille $0 \dots 1024 \text{ }^\circ\text{C}$ resoluution ollessa $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ [4].

Lambda-anturi

Lambda-anturia käytetään ajoneuvoissa mittaamaan pakokaasujen jäännöshapen määrää, joka kertoo, onko moottorin polttoaine-ilmaseos liian rikasta vai liian laihaa. Ihanteellinen stoikiometrinen suhde polttoaineelle ja ilmalle on noin 1:14,7, ja tätä vastaava lambda-arvo on 1.

Tavallisissa henkilöautoissa yleisimmin käytetty lambda-anturi pystyy kertomaan vain, onko seos rikasta vai laihaa. Se ei siis pysty kertomaan absoluuttista lambda-arvoa, vaan ainoastaan onko lambda-arvo ykköstä pienempi tai suurempi. Siirtyminen laihasta seoksesta rikkaalle näkyy anturin lähtöjännitteen jyrkkänä muuttumisena nolasta noin yhteen volttiin.

Laajakaistaista lambda-anturia (engl. wideband lambda) käyttämällä voidaan jäännöshappipitoisuutta mitata tarkemmin kuin tavallisella lambda-anturilla. Sen käyttäminen vaatii kuitenkin monimutkaisien ohjauselektronikan, jossa on mm. lämpötilansäädin anturia varten. Yleensä laajakaistaisen lambda-anturin liittämiseen käytetäänkin valmista ohjausmoduulia, joka antaa ulostulona lambda-arvoon verrannollisen jännitteen.

2.3 Tehoaste

Mikrokontrolleri laskee mitattujen anturisignaalien pohjalta ohjaussignaaleita, joilla säädellään ajoneuvon toimilaitteiden toimintaa. Kontrollerin I/O-piennien kautta kulkevalle virralle on olemassa maksimiraja, joka on noin 20 mA. Tämän takia toimilaitteiden ohjausta varten pitää rakentaa tehoaste, jolla pystytään ohjamaan useiden ampeerien virtoja. Tärkeimmät ohjauskohteet ovat polttoaineen ruiskutus ja polttoaineseoksen sytyttäminen, jotka ovat polttomoottorin toiminnan kannalta välttämättömiä.

Polttoaineen ruiskutus

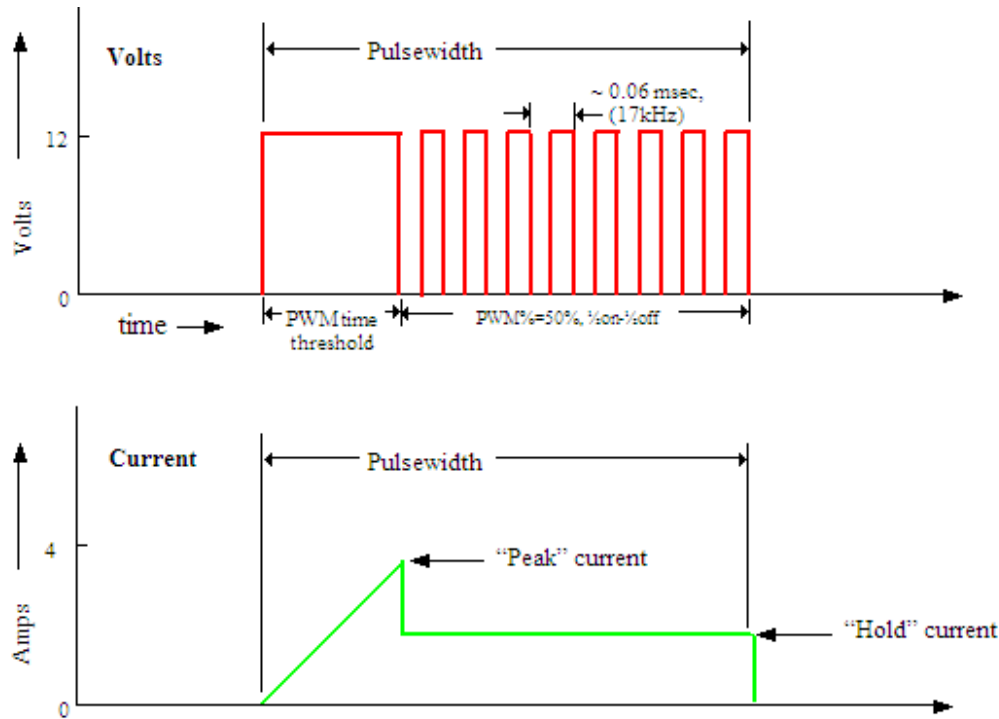
Polttoaineen ruiskutusta ohjaamalla voidaan tarkasti säätää sylinteriin kulkeutuvan polttoaineen määrää. Ennen sähköisten toimilaitteiden käyttöönottoa polttoaineen syötöstä vastasi kaasutin, jossa polttoaine sekoittuu imusarjassa kulkevaan moottorin imuilmaan. Polttoaineen määrään vaikuttaa kaasuttimen suuttimen koko ja kaasuläpän asento, jolla säädellään imusarjan kautta moottoriin virtaavan ilman määrää.

Sähköisessä polttoaineen ruiskutusjärjestelmässä ideana on, että käytettävää ruiskutussuutinta voidaan ohjata auki ja kiinni sähkövirran avulla. Tässä projektissa käytetään niin kutsuttua monipistesuihkutusta, jossa jokaisella moottorin sylinterillä on oma polttoaineen ruiskutussuutin. Polttoaineen siirtymisestä polttoainesäiliöstä suuttimille vastaa polttoainepumppu, jota ei ohjata aktiivisesti (ainoastaan päälle / pois päältä tarvittaessa).

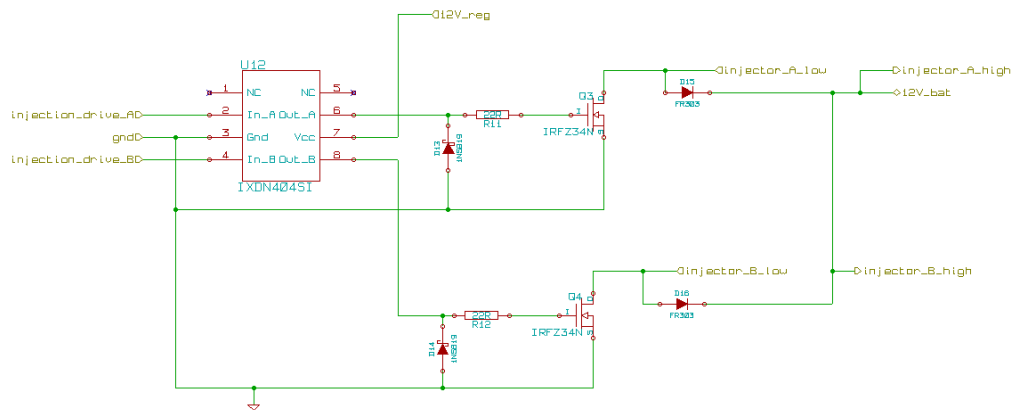
Suuttimien ohjaus perustuu peak-and-hold -periaatteeseen, jossa ruiskutus aloitetaan kytkemällä akkujännite suuttimelle. Kun suuttimen kautta kulkeva virta on kasvanut riittävän suureksi, siirrytään käyttämään pulssinleveysmodulointia ohjausta jolla virta pidetään suurin piirtein vakiona loppuruiskutuksen ajan. Tyypillinen suuttimen virran käyttäytyminen on esitetty kuvassa 2. Maksimivirta riippuu käytettävän suuttimen impedanssista (yleensä $1 \dots 4 \Omega$), joten maksimivirta on luokkaa 4–15 A.

Suuttimien virran ohjauksessa käytetään MOSFET-tyyppisiä transistoreita, joiden resistanssi johtavuustilassa on pieni. Transistorin ja mikrokontrollerin välissä on ohjainpiiri IXDN404, joka pystyy syöttämään fetin hilakapasitanssin latauksessa tarvittavan virtapulssin. Sama komponentti myös estää häiriöiden johtumisen mikrokontrollerille. Ruiskutus-suuttimien ohjauksen piirikaavio on esitetty kuvassa 3.

Ruiskutus-suuttimen muodostama kuorma on induktiivinen, mikä tarkoittaa että kuormavirran kulku ei voi katketa äärettömän nopeasti. Tämän takia on tärkeää, että kuorman rinnalle kytketään loisvirtadiodi. Kun MOSFET:n ohjaus poistetaan, siirtyy ruiskutus-suuttimen virta kulkemaan diodin kautta ja se pienenee nollaan diodissa tapahtuvan jännitepudotuksen ansiosta. Loisvirtadiodin mitoitus tehdään käytettävien suuttimien impedanssin perusteella siten, että diodi kestää siihen kohdistuvat virta- ja jänniterasitukset.



Kuva 2: Periaatteelliset jännitteen ja virran virran käyrämuodot peak-and-hold -suuttimessa (lähde: <http://www.megamanual.com>).



Kuva 3: Ruiskutus-suuttimien ohjauksen piirikaavio.

Polttoaineseoksen sytytys

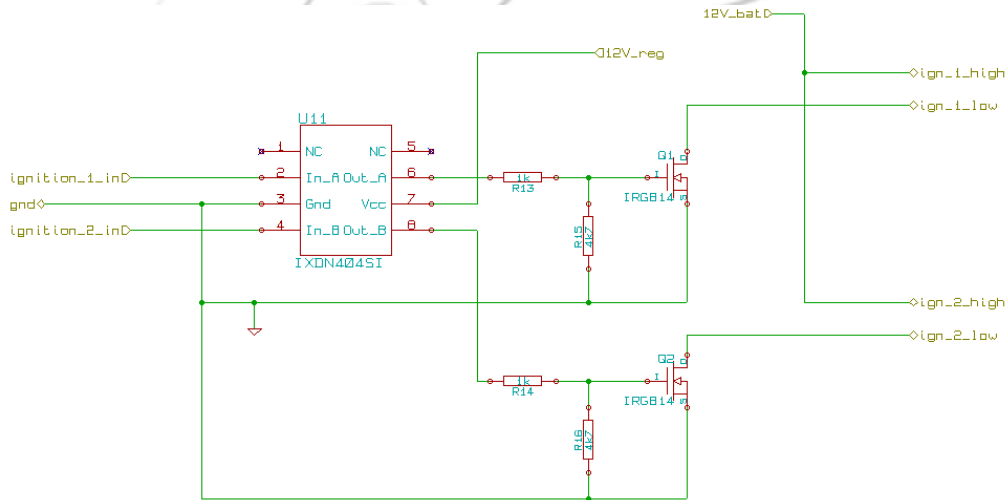
Polttoaineseoksen sytytyksen ohjauksessa käytettävä elektronikka on samankaltainen kuin ruiskutuksen ohjauksessa. Mikrokontrollerin jälkeen on puskurina IXDN404-piiri, mutta fettien tilalla käytetään IGBT-tyyppisiä transistoreita. International Rectifier:n valmistama IRGB14 on tarkoitettu erityisesti polttomoottorikäyttöisten ajoneuvojen sytytyksen ohjaukseen [5]. Komponentti rajoittaa sytytysvirran katkai-

sussa syntyvän jännitepiikin noin 430 volttiin, jolloin erillistä loisvirtadiodia ei tarvita. Piirikaavio sytytyksen ohjauksessa käytettävistä komponenteista on esitetty kuvassa 4.

Komponenttien valinta ja jäähdytys

Tehoasteen transistorit ja jännitevakavoinnin regulaattorit tuottavat toimiessaan häviötehoa, joka muuttuu lämmöksi. Tämä lämpö pitää jollain tavalla johtaa pois komponenttien pinnalta, jotta komponenttien lämpötila pysyy sallituissa rajoissa. Kaikki kytkennän tehokomponentit on valittu TO220-koteloisena, jolle on helppo suunnitella tarvittava jäähdytys.

Tarkoituksena on sijoittaa TO220-komponentit piirilevyn reunalle ja kiinnittää ne laiteen metallikotelon seinämään, joka toimii jäähdytysalustana. Tarvittaessa laitekotelo voidaan vielä asentaa erillinen jäähdytyskuori, jos pelkkä kotelo ei tarjoa riittävästi jäähdytyskapasiteettia. Tässä asennustavassa täytyy ottaa huomioon se, että tyypillisesti yksi komponenttien liittimistä on suoraan yhteydessä komponentin kotelon runkoon. TO220-kotelon ja laitekotelo välissä tulee siis käyttää jotain ohutta eristelevyä oikosulkujen estämiseksi.



Kuva 4: Polttoainenseoksen sytytyksen piirikaavio.

3 Ohjelmisto

Polttomoottorin ohjausalgoritmit toteutetaan Freescale:n 16-bittisellä MC9S12XDP512-mikrokontrollerilla, joka on tarkoitettu erityisesti ajoneuvokäyttöön [6]. Sen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat:

- 512 kB Flash-muisti
- 32 kB RAM-muisti
- Kellotaajuudet aina 40 MHz asti
- XGATE-rinnakkaisprosessori, joka huolehtii mm. I/O-porteista
- Tuki CAN-väylälle
- 2 A/D-muunninta, yhteensä 16 kanavaa
- 4-kanavainen pulssinleveysmodulaatio
- Sarjamuotoiset väylät: SPI, I²C, SCI (Serial Communication Interface)

Mikrokontrollerin ohjelmointi suoritetaan C-kielillä, ja kääntäjänä käytetään GNU-lisensioitua GCC:tä [7]. Käännöstyökalut ovat saatavilla niin Windows- kuin Linux-alustallekin.

Ohjelmiston pohjana käytetään FreeEMS-projektia, joka on vapaasti saatavilla oleva polttomoottorin ohjausjärjestelmä [8]. Projektissa on valmis runko reaaliaikaiselle ohjelmistolle, ja sitä tullaan täydentämään Otaniemi Flying Finns -tiimin omilla ohjelmistokomponenteilla.

FreeEMS-projektissa on valmiina mm. yleisimpien antureiden käsittely ja sarjamuotoinen kommunikointi PC:n kanssa. Siitä puuttuu kuitenkin monia polttomoottorin toiminnan kannalta välttämättömiä osia, jotka on itse lisättävä. Näitä ovat esimerkiksi moottorin paikkatiedon laskenta, polttoaineen sytytyksen ja ruiskutuksen ajoitus sekä ahtimen ohjaus. Toisaalta nämä kohteet jouduttaisiin joka tapauksessa ohjelmoimaan itse, sillä itse viritetty ruiskutustoiminen moottori vaatii käytännössä aina moottorinohjauksen päivityksen, eli valmista ohjelmistoa ei voida käyttää.

Tällä hetkellä ohjelmiston osalta ei ole tehty kovinkaan paljon työtä. Painopisteenä on ollut elektroniikan suunnittelu, sillä sulautetun ohjelmiston testaus ilman laitteistoa on hankalaa. Ohjelmiston työstäminen alkaa toden teolla vasta, kun elektroiikkakortin prototyyppi on olemassa. Tämä tapahtunee vuoden 2010 alussa.

Viitteet

- [1] Autowiki, ilmainen ja vapaasti muokattava autotietopankki. Verkkodokumentti. Viitattu 19.9.2009. Luettavissa: http://www.autowiki.fi/index.php/Main_Page.
- [2] SAE International. *2009 Formula SAE[®] Rules*. Verkkodokumentti. Viitattu 19.9.2009. Saatavissa: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2009fsaerules.pdf>.
- [3] National Semiconductor. *LM1815 Adaptive Variable Reluctance Sensor Amplifier*. Datalehti. Verkkodokumentti. Viitattu 10.10.2009. Saatavissa: <http://www.national.com/ds/LM/LM1815.pdf>.
- [4] Maxim. *MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter*. Datalehti. Verkkodokumentti. Viitattu 11.10.2009. Saatavissa: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX6675.pdf>.
- [5] International Rectifier. *IRGB14 Ignition IGBT*. Datalehti. Verkkodokumentti. Viitattu 25.10.2009. Saatavissa: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irgb14c40lpbf.pdf>.
- [6] Freescale semiconductor. *MC9S12XDP512 Microcontroller*. Datalehti. Verkkodokumentti. Viitattu 2.11.2009. Saatavissa: http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S12XDP512V2.pdf.
- [7] GNU Development Chain for 68HC11 & 68HC12. Internet-sivusto. Viitattu 2.11.2009. Luettavissa: <http://www.gnu.org/software/m68hc11/>.
- [8] FreeEMS – Open Source Engine Management System. Internet-sivusto. Viitattu 3.11.2009. Luettavissa: <http://sourceforge.net/projects/freeems/>.