



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**KAASUPOLJINOHJEEN TOTEUTTAMINEN HYBRIDILINJA-AUTON
SÄÄTÖJÄRJESTELMÄLLE**

**Implementation of the accelerator pedal request in a hybrid
commuter bus control system**

Jani Alho

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jani Alho

KAASUPOLJINOHJEEN TOTEUTTAMINEN HYBRIDILINJA-AUTON SÄÄTÖJÄRJESTELMÄLLE

2014

Kandidaatintyö.
43 sivua, 12 kuvaa, 2 taulukkoa.

Tarkastaja: TkT Tuomo Lindh

Sähkö- ja hybridiajoneuvot yleistyvät tiukentuvien päästömääräysten seurauksena, koska sähkömoottoritekniikan avulla ajoneuvon kokonaishyötysuhdetta on mahdollista parantaa merkittävästi. Akkujen kapasiteettiin, kokoon, painoon ja latausaikoihin liittyvien ongelmien vuoksi sekä nestemäistä polttoainetta että sähköä hyödyntävä hybriditekniikka on toistaiseksi pelkkään sähkökäyttöön verrattuna usein toimivampi toteutus. Vanhojen hyötyajoneuvojen hybridikonversiot saattavatkin yleistyä, jos voidaan osoittaa, että konversio on toteutettavissa järkevin resurssein ja voidaan laatia konversion teknisiä haasteita helpottavia ohjeita.

Syksyllä 2012 käynnistyi Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston vetämä CAMBUS-projekti, jossa on tarkoitus kehittää kaupallisesti tarjolla olevia järjestelmiä pätevämpi hybriditekniikka linja-autokäyttöön. Tämä kandidaatintyö pyrkii kirjallisuuskatsauksen keinoin selvittämään, minkälainen kaasupolkimen toteutus olisi tätä hybridikonversiota ajatellen paras kuljettajan kontrolloiman säätöohjeen käytännön toteutukseen.

Lähdemateriaalina on käytetty mm. Boschin ja Automobiltechnische Zeitschriftin ajoneuvoalan käsikirjoja ja oppikirjoja, Volkswagenin koulutuskäsikirjoja ja täydentävästi tieteellisiä artikkeleita ja patenteja. Niiden pohjalta on koottu yleisimmät tämänhetkiset tekniset toteutustavat, pohdittu tiedonsiirron ja sähkömagneettisen yhteensopivuuden haasteita, sekä kokonaissäätöjärjestelmän näkökulmasta säätöohjeen suuretta.

Selvityksen perusteella polkimen asentotunnistuksen kannalta oleellista on turvallisuus, eli lähinnä mekaaninen kestävyys ja riittävä häiriösuojaus. Ajoneuvossa ilmeneviä voimakkaita magneettikenttiä hyvin sietävä digitaalinen väyläjärjestelmä voi hyvin toteutettuna myös yksinkertaistaa ajoneuvon sähköjärjestelmän muuta toteutusta. Aineistojen perusteella vääntömomentti on luonnollisin valinta ohjaussuureeksi. Vääntömomenttiohjeen avulla voidaan helposti luoda selkeä ja johdonmukainen tuntuma kuljettajalle voimanlähteiden turvalliseen hallintaan ja se helpottaa myös kommunikointia pidonhallintajärjestelmän ja muiden ajoneuvon hallintaan liittyvien järjestelmien kanssa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Jani Alho

IMPLEMENTATION OF THE ACCELERATOR PEDAL REQUEST IN A HYBRID COMMUTER BUS CONTROL SYSTEM

2014

Bachelor's Thesis.
43 pages, 12 pictures, 2 tables.

Examiner: D.Sc. (Tech) Tuomo Lindh

Electric and hybrid electric vehicles are becoming more common. They have proved to provide an effective solution for the requirements of the increasingly stringent emission control legislation. Hybrid technology helps to greatly improve the overall efficiency of any given motor vehicle. The hybrid conversions of older vehicles may become more interesting if a conversion may be produced economically enough.

In fall 2012, Lappeenranta University of Technology has started a project called CAMBUS. The aim of the project is to create a more efficient hybrid technology than is currently available in commercial commuter buses. This bachelor's thesis study is a literature review, which concentrates on finding the most suitable methods for implementing the driver request signal (accelerator pedal) for the control system of a hybrid bus.

The most common commercially available technical solutions, means of data communication, electromagnetic compatibility and the type of reference quantity and control strategy have been discussed through. The research material included essential automotive design study books and technical handbooks made by Bosch and Automobiltechnische Zeitschrift, Volkswagen Group training manuals, relevant patents and articles.

The research concludes that the most obvious criteria for the position recognition in an accelerator pedal is safety. Thus structural rigidity and protection against electromagnetic interference is of great importance. The digital data communication can largely simplify the overall electrical design in a vehicle, yet it must also be tolerant to the powerful magnetic interference present in the vehicle. The material suggests the use of a torque setpoint as the most natural type of instruction. The torque based setpoint strategy also provides a consistent and easily manageable interface for the driver to safely control the vehicle power sources and provides a useful measure of quantity for communication with stability control and other vehicle maneuvering related systems.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET | 5 |
| 1. JOHDANTO | 6 |
| 1.1. CAMBUS-projekti..... | 6 |
| 1.2. Tutkimuskysymykset..... | 7 |
| 1.3. Tutkimuksen rajaus..... | 8 |
| 1.4. Työn rakenne..... | 8 |
| 2. TUTKIMUSMENETELMÄ | 10 |
| 3. KIRJALLISUUSKATSAUS | 11 |
| 3.1. Kaasupolkimen toteutustapoja..... | 11 |
| 3.1.1. Potentiometriin perustuva asentotunnistus | 12 |
| 3.1.2. Magneettiseen induktioon perustuva asentotunnistus..... | 12 |
| 3.1.3. Magnetostaattinen asentotunnistus | 13 |
| 3.1.4. Käytännön kaasupolkimet ja turvallisuus | 14 |
| 3.2. Tiedonsiirto..... | 15 |
| 3.2.1. Signaalitiet ja protokollat..... | 16 |
| 3.2.2. Signaalin digitointi ja käsittely | 19 |
| 3.2.3. Sähkömagneettiset häiriöt | 20 |
| 3.3. Säätojärjestelmästä | 22 |
| 3.3.1. Säätostrategiat | 23 |
| 3.3.2. Säätoohjeet | 24 |
| 3.3.3. Useamman voimanlähteen säätäminen | 26 |
| 3.3.4. Järjestelmämallit..... | 28 |
| 3.3.5. Diagnostiikka | 29 |
| 4. YHTEENVETO | 31 |
| 5. CAMBUS TOTEUTUS | 33 |
| 5.1. Verkkotopologia..... | 33 |
| 5.2. Dieselmoottorin säätö | 35 |
| 5.3. Automaatiojärjestelmän suunnittelu | 35 |
| 5.4. Kaasupolkimen toteutus..... | 36 |
| 5.5. Dieselin jänniteohjauksen testaaminen | 37 |
| 6. JOHTOPÄÄTÖKSET | 40 |
| LÄHDELUETTELO | 42 |

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Lyhenteet

| | |
|--------|---|
| ADC | Analog-to-digital converter |
| BMS | Battery management system |
| CAN | Controller area network |
| ECU | Electronic control unit, engine control unit |
| EDC | Electronic Diesel Control (Bosch) |
| EEPROM | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory |
| EMC | Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus |
| EMI | Electromagnetic interference, sähkömagneettinen häiriö |
| EV | Electric vehicle |
| HEV | Hybrid electric vehicle |
| HCU | Hybrid control unit |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| ISO | International Organization for Standardization |
| LIN | Local Interconnect Network |
| MCU | Motor control unit |
| PHEV | Plug-in hybrid electric vehicle |
| PLC | Programmable logic controller |
| PWM | Pulse width modulation, pulssiaaltomodulaatio |
| SAE | Society of Automotive Engineers (SAE International) |
| STP | Shielded twisted pair, suojattu parikaapeli |
| TCM | Traction control management |
| UTP | Unshielded twisted pair, suojaamaton parikaapeli |

Muuttujat

| | |
|--------|----------------|
| I | virta |
| N | pyörimisnopeus |
| P | teho |
| T | vääntömomentti |
| U, V | jännite |

1. JOHDANTO

Sähkömoottoritekniikan avulla perinteisiä polttoaineita käyttävän ajoneuvon kokonaishyötysuhdetta voidaan parantaa merkittävästi. Pelkällä sähkövoimalla toimivien autojen (engl. *electric vehicle*, EV) yleistymistä hidastavat ongelmat lataus- ja akkutekniikan kanssa. Pienen toimintasäteen ja pitkien latausaikojen vuoksi esimerkiksi pelkällä akkusähköllä toimivan linja-auton toteuttaminen ei ole järkevää. Lisäongelmia aiheuttavat myös ilmasto-olosuhteet ja akkujen toiminnan heikentyminen kylmässä sekä hitaasti kehittyvät latausverkot.

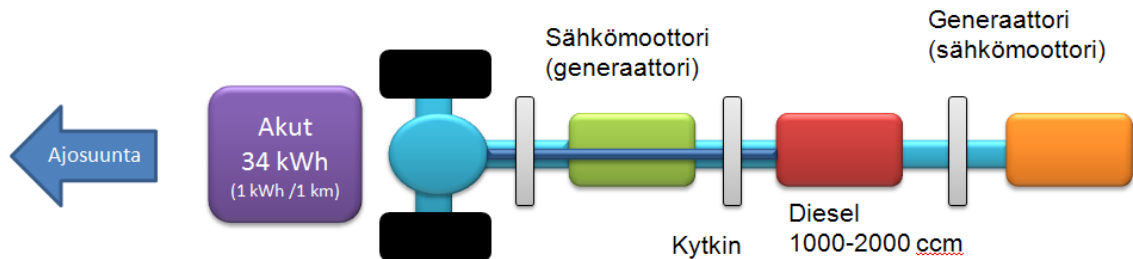
Sen sijaan hybridi- (HEV) ja plug-in hybridi (PHEV) -ajoneuvot ovat alkaneet yleistyä kaikkien merkittävien valmistajien tuodessa omia mallejaan markkinoille. Hybrideillä toimintasäde saadaan huomattavasti laajemmaksi, auto ei ole pelkästään riippuvainen latauspistokkeesta saadusta energiasta ja polttoaineella tuotetun energian lisäksi voidaan rinnakkaishybrideissä tuottaa tarvittaessa lisää vääntömomenttia sähkömoottorilla, jolloin myös käyttömukavuutta voidaan parantaa.

Lataustekniikka ja energian talteenotto kehittyi koko ajan. Perinteiseen tekniikkaan perustuvan ajoneuvon muuttaminen hybridiajoneuvoksi on myös varsin kiinnostava vaihtoehto, koska määrättyissä tapauksissa ajoneuvon runko ja kori voivat olla vielä pitkään käyttökelpoisia. Erityisesti raskaan kaluston runko on valmistettu kestäväksi hyvin pitkään. Tutkimusten mukaan nykyaikaista hybriditekniikkaa hyödyntämällä voidaan merkittävästi parantaa raskaiden työkonien ja esimerkiksi linja-autojen polttoainetaloutta. (Reif K. & Dietsche K.-H. et al. 2011) (Immonen 2013)

1.1. CAMBUS-projekti

Lappeenrannan teknillinen yliopisto tutkii paraikaa CAMBUS-projektissa voidaanko tällainen konversio toteuttaa linja-autossa järkevillä resursseilla ja pitävätkö voimanlähteitä koskevat laskelmat paikkansa. Samalla on tarkoitus tutkia mm. akkutekniikkaa sekä satelliittipaikannuksen ja reittitietojen perusteella optimoitavaa ajosyklistrategiaa. Koska tällainen luonnollisesti vaatii ajoneuvon koko voimansiirron ja sähköjärjestelmän uudelleensuunnittelua, on kyseessä monimutkainen prosessi. Projektiin osallistuu useita paikallisia oppilaitoksia, joiden eri alojen oppilaat voivat osallistua harjoitellen kullekin tärkeitä taitoja.

Kuljettajan kommunikointi ajoneuvon säätöjärjestelmän kanssa voidaan toteuttaa monin eri tavoin. Ajoneuvon automaatio- ja säätöjärjestelmän suunnittelusta vastaa projektiryhmä, joka suunnittelee keskeiset sähköjärjestelmät ja tietoverkkotopologian. Projektissa ohjausjärjestelmäksi oli etukäteen valittu ABB AC500 -teollisuuslogiikoihin perustuva laitteisto, jonka helposti laajennettavien tiedonsiirto-ominaisuuksien avulla voidaan luoda alijärjestelmiä yhdistävä keskusohjausjärjestelmä. Kuvassa 1 on esitetty projektin voimalaitteiden keskeinen kytkentä.



Kuva 1. CAMBUS-projektiajoneuvon voimalinjan perusrakenne, toiminta ja yleispiirustukset (Kuva: CAMBUS Projektisuunnitelma).

Järjestelmä kykenee toimimaan sekä rinnakkais- että sarjahybridinä. Perustilanteessa pieni dieselmoottori pyörittää generaattoria, joka varaa akustoa ja sähkömoottorilla tuotetaan kiihdytyksiin tarvittava voima. Sopivalla nopeusalueella ajettaessa tasaisella nopeudella voidaan myös ajaa pelkällä dieselmoottorilla ja tarpeen vaatiessa voidaan sähkömoottorilla avustaa esimerkiksi ylämäessä. Järjestelyllä on pyritty maksimoimaan dieselin taloudellinen hyödyntäminen. Tällainen voimansiirron ja moottorien yhteispeli edellyttää kuitenkin monimutkaista säätöjärjestelmää.

1.2. Tutkimuskysymykset

Tässä työssä käsitellään nimenomaan kuljettajan kaasupoljintiedon ja sitä kautta nopeussäätöohjeen toteuttamista hybridilinja-autossa. Työn keskeisenä tavoitteena on selvittää

- Onko jokin säätövälineen tekninen toteutus ylivertainen hybridiautossa ilmenevät sähkömagneettiset häiriöt huomioiden?
- Kuinka voidaan järjestää luotettava tiedonsiirto? Onko järkevää hyödyntää väyläratkaisua kaasupolkimen asentotiedon siirtämiseen?
- Minkälaisena ohjeena asentotietoa tulisi käsitellä nykyaikaisessa digitaalisessa säätöjärjestelmässä?

Kirjoittaja on mukana automaatiojärjestelmän suunnittelusta vastaavassa projektiryhmässä, jonka käyttöön tutkimuksen tuottamat vastaukset on ensisijaisesti tarkoitettu.

1.3. Tutkimuksen rajaus

Kyseisen ajoneuvon varsinainen automaatio- ja säätöjärjestelmä on erittäin monimutkainen kokonaisuus, joten tämä kandidaatintyö on rajattu selvittämään vain sen yhtä osatoteutusta. Tutkimus ei pyri antamaan yksityiskohtaista kuvausta toteutuksesta vaan ainoastaan kuvaamaan vaihtoehtoja, joiden perusteella suunnittelutyön vaatimukset voidaan määritellä.

Varsinaisessa insinööriytyössä on huomioitava useita näkökulmia, jotka eivät suoranaisesti liity aihetta koskevaan sähkö- ja tietoliikennetekniseen teoriaan ja ne rajataan siksi tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Muun muassa rakenteelliseen suunnitteluun ja vaatimustenmukaisuuteen liittyvät seikat on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle. Tutkimuksessa tarkastellaan kaupallisesti tarjolla olevia vaihtoehtoja, vertaillaan niiden erilaisia toteutustapoja ja tarkastellaan niiden teoreettista soveltuvuutta hybridilinja-autokäyttöön sähkötekniikan näkökulmasta. Koska ajoneuvossa on pääasiallisena voimanlähteenä suurella vääntömomentilla varustettu sähkömoottori, sitä käytetään yleisessä liikenteessä ja sillä kyyditetään ihmisiä, katsottiin ohjausjärjestelmän suorittaman kaasupoljindiagnostiikan pohtiminen työn kannalta tarpeelliseksi.

Sähkötekniikan perusteoriaa ei selvitetä ja esimerkiksi häiriösuojauksen osalta aihetta käsitellään pintapuolisesti olettaen lukijan ymmärtävän sähkömagneettisen yhteensopivuuden eli EMC:n perusteita. Tutkimuksessa tarkastellaan lähinnä ajoneuvossa ilmeneviä tai siihen normaalikäytössä vaikuttavia häiriöitä ja perustekniikoita niitä vastaan suojautumisessa. Lukijan oletetaan ymmärtävän myös signaalinkäsittelyn perusasioita. Niin ikään verkko- tai väylätekniikoita ei käsitellä syvällisesti, vaan lukijalla odotetaan olevan niistä jonkinlainen ennakkokäsitys.

1.4. Työn rakenne

Työn toisessa luvussa esitellään tutkimusmenetelmä ja lähteiden valinta, minkä jälkeen käsitellään ensin keskeiset käytössä olevat menetelmät kaasupolkimen toteuttamisvaihtoehdoista ja tarkastellaan kaupallisesti tarjolla olevia vaihtoehtoja. Tämän jälkeen käsitellään signaaliin liittyviä asioita: tiedonsiirtoa sekä häiriölähteitä ja niiltä suojautumista. Kolmanneksi teoriaosassa esitellään lyhyesti erityyppisten moottoreiden säätöstrategioita, -ohjeita ja -järjestelmää. Yhteenvedossa esitellään tiiviisti keskeiset teoriaosassa tehdyt löydökset ja vastaukset tutkimuskysymyksiin. CAMBUS-projektiautolle

on omistettu yksi luku, jossa kerrotaan hieman projektin lähtötilanteesta ja minkälaisiin ratkaisuihin projektiryhmä päätyi tutkimuksen tulosten perusteella. Työn lopussa on myös hieman omia pohdintoja aiheen tiimoilta.

2. TUTKIMUSMENETELMÄ

Työ on tehty kirjallisuuskatsauksena ja materiaalina on käytetty ajoneuvoalan keskeisiä eurooppalaisia hakuteoksia, ajoneuvo- ja komponenttivalmistajien markkinointi- ja koulutusmateriaaleja, patenteja sekä erityisteemoja koskevia tieteellisiä artikkeleita.

Keskeisen materiaalin osalta on pyritty hyödyntämään uusimpia versioita ajoneuvoalan käyttämistä lähdeeteoksista ja tarpeen mukaan muita lähteitä. Eurooppalaisittain tärkeimmiksi arvioitiin Boschin ja Automobiltechnische Zeitschrift –sarjan (ATZ) teokset.

Bosch on eräs suurimmista ajoneuvojen komponentteja valmistavista yrityksistä. Boschin teokset ovat koonneet yhteen tekniikan tohtori, Baden-Württembergin korkeakoulun sähkötekniikan professori Konrad Reif ja diplomi-insinööri Karl-Heinz Dietsche, joiden lisäksi esimerkiksi Automotive Handbookin tekemiseen on osallistunut yli 160 eri kirjoittajaa ajoneuvoteollisuuden, yliopistojen ja korkeakoulujen piiristä.

Vieweg+Teubnerin kustantamat ATZ:n teokset kattavat monipuolisesti ajoneuvotekniikan eri osa-alueita. Tutkimukseen valittujen ATZ:n teoksien kirjoittaja on laajalti arvostettu tekniikan tohtori Rolf Isermann, joka on Darmstadtin teknillisen yliopiston prosessiautomaation ja säätötekniikan laboratorion professori. Hän on kirjoittanut myös säätötekniikan oppikirjoja.

Alan kirjallisuutta on olemassa useilla eri kielillä kirjoitettuna, mikä luonnollisesti myös rajoitti materiaalin valintaa. Eri ajoneuvo- ja komponenttivalmistajia ympäri maailmaa on lukuisia ja heidän markkinointi- ja koulutusmateriaaliensa saatavuus ulkopuolisten käyttöön vaihtelee. Tutkimuksen kannalta ei nähty oleelliseksi käyttää tarpeettomasti aikaa etsien lisää merkkispesifisiä lähteitä, vaan olemassa olevien yhteyksien ja haastattelujen kautta pyrittiin löytämään oleellisia yksityiskohtia tarkentamaan joitain valittujen teosten tietoja. Kuitenkin joidenkin esille nousseiden asioiden tarkemman selvittämisen kannalta katsottiin tarpeelliseksi etsiä spesifisempiä tutkimusraportteja, patenteja tai muita artikkeleita.

3. KIRJALLISUUSKATSAUS

Ajoneuvon hyötysuhteen parantaminen hybriditekniikan avulla perustuu eri voimanlähteiden hyötysuhde-eroihin. Erityyppisillä energiavarastoilla ja -muodoilla on oma ominaisenergiakapasiteettinsa. Usein bensiinitankillinen riittää näennäisen huonollakin hyötysuhteella kuljettamaan ajoneuvoa pidemmälle, kuin mikä on fyysisesti vastaavankokoisella akustolla varustetulle sähköautolle mahdollista. Hybridissä hyödynnetään eri voimanlähteiden vahvuuksia ja liike-energian talteenottojärjestelmiä. Tällaisissa ajoneuvoissa voidaan usein ajaa myös pelkällä sähköllä. Kun ajomoottorina käytetään polttomoottoria, se sammutetaan usein heti jalan noustessa kaasupolkimelta ja perinteisen moottorijarrutuksen sijasta auton liike-energiaa otetaan talteen akkuihin sähköenergiaksi. Jarrutuksessa on perinteisesti liike-energia muunnettu kitkan avulla lämpöenergiaksi, joskin nykyään erilaiset tavat jarruttaa sähkömoottorin avulla ja jarrutusenergian talteenotto alkavat yleistyä. Eri voimanlähteiden hyötysuhteiden kehitystä rajoittaa muun muassa niiden teoreettinen maksimihyötysuhde. Esimerkiksi ottomoottorin mekaaniset ja termodynaamiset ominaisuudet mahdollistavat polttoaine, prosessi- ja sisäiset häviöt huomioiden vain tietyn tason hyötysuhteen. Yhdistelemällä eri voimanlähteitä ja energiavarastoja voidaan hyödyntää niiden parhaita puolia ja optimoida kokonaisyhteyttä. (Isermann 2010 s. 45)

Hybrideissä tehoa tuotetaan useammalla tehonlähteellä ja niiden hallinta pyritään automatisoimaan edellyttämättä kuljettajalta erityisiä toimia. Kuljettajan näkökulmasta ajamisen tulee olla riittävän yksinkertaista ja loogista, jotta ajoneuvon turvallinen käyttö kaikissa tilanteissa on mahdollista. Tässä selvityksessä käydään läpi kaasupolkimen toteutusta asentotunnistuksen sähkömekaanisen toteutuksen, tiedonsiirron ja järjestelmän säätöohjeen kannalta. Turvallisuusnäkökulmasta koko tiedonsiirtoketju on kriittinen. Tuskin kukaan haluaisi, että linja-auto liukkaalla kelillä erilaisten häiriöiden johdosta menettäisi hallittavuutensa, kun se olisi estettävissä hyvillä suunnittelukäytännöillä.

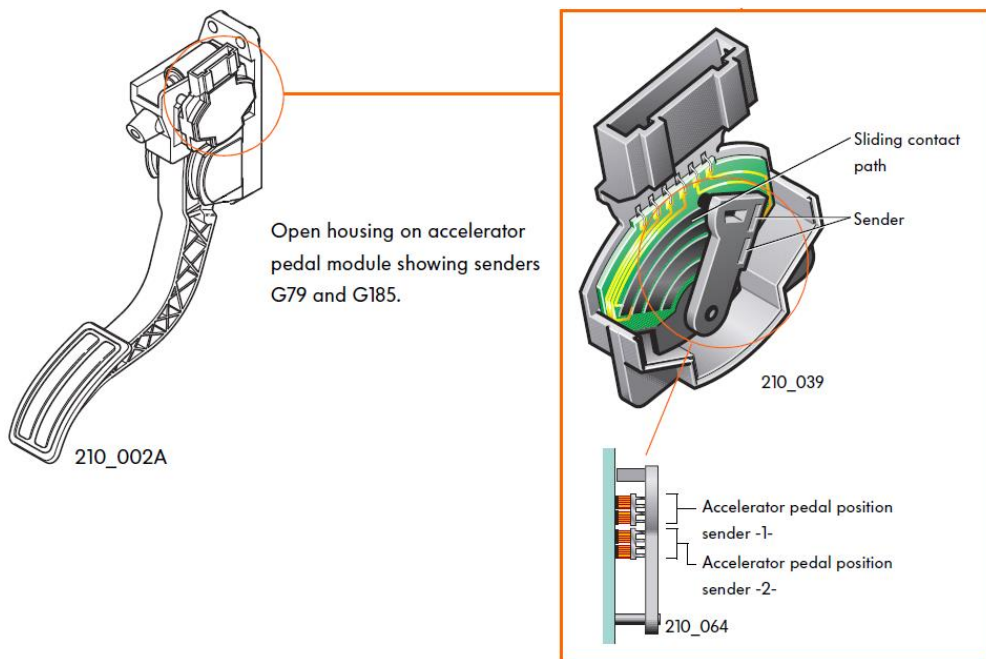
3.1. Kaasupolkimen toteutustapoja

Asennontunnistamiseen voidaan käyttää useita menetelmiä, joista kaasupoljinta tai vastaavaa käyttökahvaa ajatellen on kaupallisesti käytössä lähinnä kolme menetelmää. Vanhemmissa ajoneuvoissa on yleisimmin käytössä potentiometreihin (engl. *wiper* tai *film potentiometer*) perustuva tekniikka, jonka tilalle on hiljalleen alkanut yleistyä hankaavaa kontaktia edellyttämättömät induktiivinen ja Hall-antureihin perustuva menetelmä (Reif K. et al. 2011 s. 1105). Seuraavissa luvuissa näiden toimintaperiaatteita käsitellään tarkemmin.

CAMBUS-ajoneuvossa kuljettajan työympäristössä haluttiin säilyttää perinteinen kaasupoljin, joten tarkastelussa esitellään tekniikoita kaasupoljinmekanismien avulla.

3.1.1. Potentiometriin perustuva asentotunnistus

Polkimen asennontunnistuksessa verrattain yleinen tapa toimii täysin analogisesti potentiometriä avulla yleensä siten, että piirilevyllä on tietynlaisen resistanssin omaava liuska, jota pitkin kääntyvä osa kuljettaa kontaktia ja näin lyhentää matkaa, jonka virta kulkee vastusliuskan läpi. Erään polkimen potentiometrin rakenne on esitetty kuvassa 2.



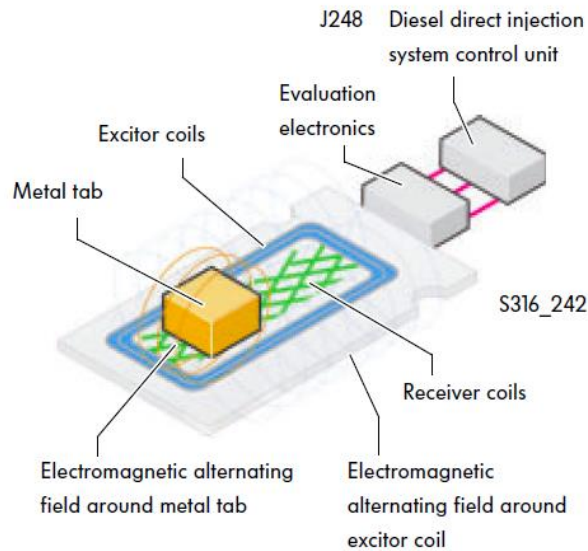
Kuva 2. Kuvassa on havainnollistettu kahdella potentiometriliuskalla varustetun kaasupolkimen rakenne. Polkimen akseli kääntää kosketinta kahden kaarevan vastusradan päällä, jolloin saadaan mitattua kaksi toisistaan riippumatonta lineaarista ulostulojännitettä. Jännitteiden välinen ero on vakio koko mittausalueella. (Kuva: Volkswagen 1999, uudelleenaseteltu)

Menetelmä on tällä hetkellä edullisin vaihtoehto (Reif K. et al. 2011 s. 1105). Koska iso osa olemassa olevista ohjainlaitteista lukee asentotiedon analogisesta signaalista, voidaan tätä menetelmää hyödyntämällä helposti pienentää kustannuksia massatuotannossa.

3.1.2. Magneettiseen induktioon perustuva asentotunnistus

Toinen tarkasteltava menetelmä perustuu magneettiseen induktioon. Esimerkiksi eräessä Hellan valmistamassa polkimessa kääntyvä liike välitetään lineaarisesti mekaaniseksi liikkeeksi, joka liikuttaa mittausanturin sisällä olevaa metallikappaletta. Kun poljinyksikölle

syötetään jännite, yksikön sisäinen elektroniikka syöttää korkeataajuuksista vaihtovirtasignaalia herätekelaan (engl. *exciter coil*). Kelan ympärille syntyvä muuttuva magneettikenttä johtuu metallikappaleeseen. Vastaanottavalle kelalle (engl. *receiver coil*) syntyvä jännite riippuu metallikappaleen sijainnista (Volkswagen 2003 s. 30). Kuva 3 esittää pelkistetyksi kelojen ja metallikappaleen sijainnin sensorilevyllä.

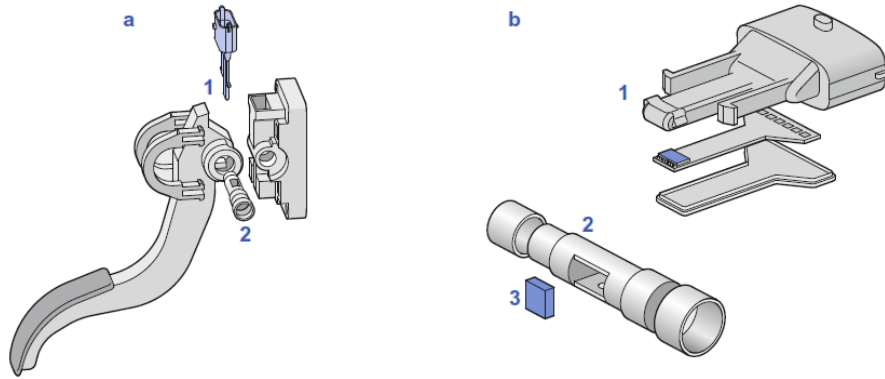


Kuva 3. Induktiiviseen asennontunnistukseen perustuva mittauslaite, niin sanottu Hella-anturi, jossa poljinmekanismi liikuttaa keltaisena piirrettyä metallipalaa herätekelan synnyttämässä magneettikentässä ja kappaleen sijainti määrää toisiokelalle syntyvän jännitteen. (Kuva: Volkswagen 2003 s. 30)

Texas Instruments on hiljattain julkaissut LDC1000-muunninpiirin, jonka avulla on mahdollista suorittaa vastaava mittaus suoraan yhden integroidun komponentin avulla. Käyttötapoja on teknisissä tiedoissa esitelty useampia. Hellan tapaisessa toteutuksessa liikuteltaessa kiinteän kokoista metalliosaa horisontaalisesti piirin päällä saadaan lineaarinen vaste kappaleen sijainnin suhteen suoraan digitaalisessa muodossa. (Texas Instruments 2013)

3.1.3. Magnetostaattinen asentotunnistus

Tässä menetelmässä johonkin kiinteään osaan on laitettu Hall-anturi, joka reagoi polkimen mukana liikkuviin osiin kiinnitetyn magneetin aiheuttaman magneettikentän suunnan kanssa. Kytkeväntavan ja sisäisen elektroniikan avulla saadut jännitteet muokataan halutun vasteen mukaiseksi (Reif K. et al 2012 s. 453). Kuvassa 4 on malli yhdenlaisesta Hall-anturia hyödyntävästä poljinjärjestelmästä. Rakente on mekaanisesti hyvin yksinkertainen.



UAE0771Y

Kuva 4. Kuva Boschin ARS2 Hall-asentotunnistimesta. Kuvassa on merkitty järjestelmän oleelliset osat: 1) Hall-anturi, 2) poljinakseli, 3) magneetti. Paikallaan pysyvä Hall-anturi mittaa kappaleen 3 magneettikentän suuntaa, joka muuttuu anturiin nähden poljinakselin liikkeessä ja tuottaa lähtöön erilaisen jännitteen. (Kuva: Reif K. et al 2012)

3.1.4. Käytännön kaasupolkimet ja turvallisuus

Useissa markkinoilla olevissa valmiissa kaasupolkimissa on tyhjäkäynti- tai turvakytkin, joka aktivoituu polkimen ollessa vapautettuna. Kyseisen kytkimen perusteella moottorinohjaus pyrkii stabiloimaan tyhjäkäyntiin vaikuttavat kuormat, katkaisemaan polttoaineen syötön tai muuta vastaavaa. Paitsi mekaanisen kytkimen avulla, tämä tieto voidaan tuottaa myös asentotiedon perusteella.

Linja-autojen osalta on huomioitava säädös, jonka perusteella linja-auton matkustajien avattavissa olevaa ovea ei saa pystyä avaamaan, jos ajoneuvo liikkuu – tai toisinpäin, ajoneuvolla ei saa päästä liikkeelle oven ollessa auki (Liikenneministeriö 1990). Vanhemmissa kytkennöissä ovikytkimet olivat suoraan sarjassa tyhjäkäyntikytkimen kanssa siten, että kaasupolkimen käyttö käytännössä estyi ja moottori pakotettiin tyhjäkäynnille (Volvo 1993). Nykyaikaisessa digitaalisessa ohjausjärjestelmässä vastaava toiminto on helppo toteuttaa väyläjärjestelmän avulla.

Turvallisuussyistä käytetään usein kahdennettua mittausta, jossa lähtösignaalit poikkeavat toisistaan tunnetulla tavalla. Tätä eroa käytön aikana vertaamalla voidaan tunnistaa mahdollisia ongelmia. Asentoon perustuva signaali voidaan myös ohittaa poljin ylhäällä aktivoituvan turvakytkimen toimesta.

Minkään menetelmän käytössä ei ole toistaiseksi ilmennyt vakavia laajamittaisia käytännön ongelmia. Jatkuva kontaktia edellyttävät potentiometritkin kestävät varsin hyvin vuosien käyttöä. Julkisuudessa esillä olleet Toyotan potentiometreihin perustuneet kaasupolkimet saivat kylläkin aikanaan osakseen suurta huomiota. Eräs tutkimus osoittaa lyijyttömän tinan

kehittäneen ajan myötä eräänlaisia tinaviiksiä, joiden seurauksesta tutkituissa sensoreissa ilmeni kontaktihäiriöitä (Kostic 2011) ja ohjelmistoon liittyviä syitä on myös epäilty. Toyotan kaasupoljinongelman lopulliseksi syyksi kuitenkin on virallisesti ilmoitettu huonosti kiinnitetty kuljettajan jalkatilan matto. (Sorensen et al. 2010).

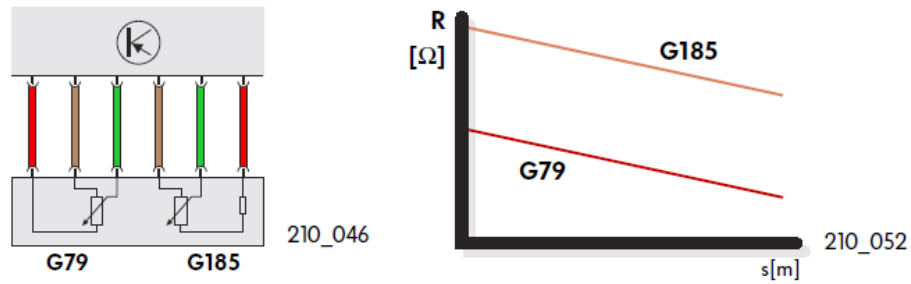
Optinen kaasupoljin olisi myös mahdollista tehdä, mutta yhtään kaupallista sovellusta ei tutkimusta tehdessä löytynyt. Optisen asentotunnistuksen suurin heikkous on mahdollinen likaantuminen. Kylmissä olosuhteissa pelkkä kosteus, huurre ja jäätyminen voivat estää luotettavan toiminnan ilman varsinaista likaantumista. Menetelmä itsessään olisi epäherkkä sähkömagneettisille kentille. Optisten ja väylään liitettävien järjestelmien edellyttämä elektroniikka voi huonosti suunniteltuna olla häiriönäkökulmasta järjestelmän heikoin lenkki.

Poljinergonomiassa seuraava kehitysaskel on erilaiset haptiset eli tuntoaistiin liittyvät ratkaisut. Ajoneuvoelektroniikkavalmistaja Hella on julkaissut uuden sukupolven induktiivisella mittauksella varustetun kaasupolkimen, jossa on mahdollisuus muuttaa aktiivisesti polkimen jäykkyysvastetta ja tehdä erilaisia värinä- tai kopautusviestejä kuljettajalle. Käyttötarkoituksiksi erikoisominaisuuksille valmistaja ilmoittaa mm. kuljettajan ohjaamisen taloudellisempaan ajotyylisiin ja hybridiajoneuvoissa moottorin käynnistymisestä ilmoittamisen. (Hella 2013)

3.2. Tiedonsiirto

Tiedonsiirrossa tulee erityisesti huomioida signaaliin mahdollisesti vaikuttavat ulkoiset häiriötekijät ja reaaliaikaisen tiedonsaannin varmistaminen sitä tarvitsevalle säätöjärjestelmälle. Digitaalisessa tiedonsiirrossa on signaalin suojauksen lisäksi huomioitava valitun näytteenottotaajuuden edellyttämä minimitiedonsiirtonopeus. Huonosti suunniteltu laitteisto saattaa myös aiheuttaa häiriöitä muille laitteille.

Usein käytetään edellisessä luvussa mainittua vähintään kahdennettua mittausta ja tiedonsiirtoa. Esimerkiksi jotkin Boschin moottoriohjainlaitteet sisältävät kaksi täysin erillistä lähtöä ja tuloa, jotta voidaan luotettavasti todeta ongelma myös itse kaasupolkimen sisäisessä toiminnassa. Kuvassa 5 on esitelty eräs Volkswagenin henkilöautoissa käyttämä kytkentä potentiometriversioon kanssa. (Volkswagen 1999)



Kuva 5. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty Volkswagenin varhaisen potentiometriin perustuvan kaasupolkimen kytkentä ja oikeanpuoleisessa kuvaajassa potentiomerien resistanssit polkimen asennon funktiona. (Kuva: Volkswagen 1999)

Hall-anturiin perustuvissa polkimissa hyödynnetään myös kahdennusta, mutta mittausta voi silti sotkea siihen kohdistuvat sähkömagneettiset kentät. Joissain polkimissa onkin päädytty käyttämään kolmea Hall-anturia, joiden antamien jännitteiden perusteella voidaan laskea asento varmemmin (Hubing 2010 s. 16).

Monet moottorinohjainlaitteet käyttävät edelleen analogisia sisääntuloja (Reif K. et al. 2011), jolloin signaalin siirtoon tulee kiinnittää erityistä huomiota. Lähtökohtaisesti edellä mainitut menetelmät tuottavat polkimen asennosta riippuvan analogisen lähtösignaalin. Jonkin verran käytetään myös pulssiaaltomodulaatiota eli PWM:ia tukevia ohjainlaitteita, jolloin tarvittava signaalimuunnos tehdään polkimessa.

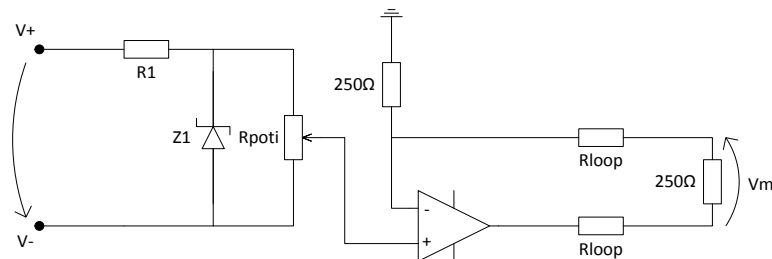
3.2.1. Signaalitiet ja protokollat

Kuten edellisessä luvussa todettiin, edelleen varsin yleinen käytäntö kaasupolkimien kanssa on käyttää analogista jännitesignaalia. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että useat markkinoilla olevat moottorinohjausjärjestelmät käyttävät edelleen *de facto* standardeiksi muodostuneita analogisia sisääntuloja mitaten jännitetason muutosten perusteella polkimen asennon. Käytännössä asentotietoa tarvitseva ohjainlaite syöttää tunnistimelle tietyntysoisen jännitteen ja ohjainlaitteen analogia-digitaalimuuntimella eli ADC:lla luetaan jännitetason muutos.

Matalajännitteiset analogiset jännitesignaalit ovat kuitenkin herkkiä häiriöille. Virtasignaalia käytettäessä induktiivisten häiriöiden kytkeytyminen on huomattavasti vaikeampaa. Muun muassa johtimien resistansseista johtuen mitattu jännite vaihtelee eri kohdissa piiriä, kun taas virta Kirchoffin ensimmäisen lain mukaisesti on haarautumattomassa piirissä kaikkialla samansuuruinen. Nykyään käytössä on pääasiassa 4 - 20 mA aluetta käyttävä virtasignaali. Sopivien vastusten kanssa rajoitettu muuttuva jännitesignaali voidaan muuntaa halutunlaiseksi virtasignaaliksi vahvistinpiirin avulla. Usein PLC-logiikkalaitteet sisältävät

suoraan sisääntulon virtasignaalille. Tavallisesti se tulee kuitenkin ennen ADC:lla lukemista muuttaa vastaavanlaisen järjestelyn avulla jännitteeksi.

Kuvassa 6 on esitelty yhdenlainen virtasignaaliuunnin. Potentiometrille syötetään vakiojännitettä, jota säädellään zener-diodilla. Potentiometrin jälkeinen jännitetaso vaihtelee välillä 0 - 5,1 V. Kuvan ideaalinen operaatiovahvistin on takaisinkytketty siten, että se pitää jännitettä säätelämällä mittaustenkin virtaa ohjausjännitteen mukaisesti välillä 0 - 25 mA. Virran määrän rajoittaa vahvistimen negatiiviselta puolelta maahan kytketty vastus, joka tässä tapauksessa on 250 ohmin tarkkuusvastus. Signaalilenkin johdinvastukset eivät vaikuta mittaustulokseen ja virtasignaali saadaan muunnettua jännitesignaaliksi lukemista varten käyttämällä toista 250 ohmin tarkkuusvastusta, jonka yli mitattaessa saadaan jälleen jännite 0 - 5,1 V. Kytkeä on luonnollisesti olemassa erilaisia ja niillä voidaan vaikuttaa mm. tarvittavien johtimien lukumäärään.



Kuva 6. Kytkeäpiirustus esittää potentiometrin muokkaaman jännitesignaalin siirtämisen virtasignaalin. Esimerkkikytkennässä mittaussiiriin syötetään tasajännite V , zener-diodi $Z1$ vakioi potentiometrille R_{poti} tulevan jännitteen halutulle tasolle, vastukset R_{loop} kuvaavat virtasignaalisilmukan johdinresistansseja ja V_m silmukassa olevan tarkkuusvastuksen yli mitattua jännitettä. Toinen 250 ohmin vastus säätelee silmukkaan halutun virran.

Käytännössä tällainen muunnos voidaan helposti hoitaa käyttämällä kaupallisia viestimuntimia (engl. *signal conditioner* tai *converter*, *interface converter*), joita on saatavilla monenlaisiin signaaliuunnoksiin.

Kierretty parijohdin sisältää kaksi toistensa ympärille kierrettyä johdinta, joiden impedanssi on identtinen (engl. *unshielded twisted pair* eli UTP). Ideana on, että magneettisten häiriöiden johtimiin aiheuttamat häiriöt ovat vastakkaisvaiheiset ja häiriöt kumoavat toisensa. Kierretyn parin ympärillä voidaan käyttää myös metallista suojavaippaa (engl. *shielded twisted pair* eli STP), jonka avulla voidaan parantaa häiriösuojausta sähkökenttien suhteen. Tällainen kaapelointi vähentää myös johdinten ulospäin säteilemiä häiriöitä.

Signaalin siirtämiseksi digitaalisesti on useita vaihtoehtoja, jos varsinainen asennontunnistus tehdään jo poljinyksikössä. Tällöin asentotieto voidaan lähettää digitaalisesti esim. sarjamuotoisena signaalina (SSI, LIN), PWM-signaalina tai CAN-väylän avulla. PWM:n etuna on suuri signaali-kohinasuhde, mutta se edellyttää käytännössä prosessointia molemmissa päissä, jolloin tiedonsiirto lähes samalla vaivalla voitaisiin toteuttaa käyttäen LIN- tai CAN-väylästandardia. CAN edellyttää, että jokaisella laitteella on oma ID ja melko monimutkainen viestirakenne aiheuttaa broadcast-verkossa kuormituksen tarpeetonta kasvamista käytettäessä sitä jonkin yksittäisen laitteen arvojen lähettämiseen. Sitä vastoin sarjamuotoinen LIN-väylä (engl. *Local Interconnect Network*) puolestaan on luotu juuri tähän tarkoitukseen. Se on yksijohtiminen kaksisuuntainen tiedonsiirtoväylä, jossa jännite on alatilassa 0 V tai ylätilassa akkujännite, esim. 12 V. Kynnykset ovat selkeitä, signaali-kohinasuhde hyvä, ja koska tiedonsiirtonopeus on rajoitettu 20 kbit/s, ei ylä- ja alatilojen välisissä transiioissa tapahtuvat nousu- ja laskuaikaviiveet vaikuta signaalin luettavuuteen. Samaan LIN-väylään voidaan liittää useampia laitteita, joiden viestit erotetaan samantapaisen tietorakenteen avulla kuin CAN-väylässä. Sitä käytetäänkin usein yksinkertaisempien laitteiden ohjaukseen tai tietojen lukemiseen vaikkapa valokatkaisijalta. Varsinainen master-laite voi olla kytkettynä CAN-väylään ja paikallisesti hoidettavia asioita toimitetaan LIN-väylän kautta, jolloin samoihin CAN-viesteihin voidaan yhdistää useampia tietoja ja näin verkkokapasiteettia voidaan käyttää hyväksi tehokkaammin. Kaasupoljinta ajatellen on kuitenkin arvioitava tarve kahdennetun signaalitien käyttöön ja onko järkevää liittää kaasupolkimen kanssa samaan LIN-väylään muita laitteita, jotka voisivat vikaantuessaan aiheuttaa tiedonsiirto-ongelmia. (Reif K. et al 2011 s. 1079-1080).

Ajoneuvojen väyläjärjestelmissä FlexRay on vielä suhteellisen uusi tulokas. Se luotiin reaaliaikaiseen tiedonsiirtoon jatkuvasti kasvavan tiedonsiirtomäärän vuoksi. FlexRay ei ole sinänsä tarkoitettu korvaamaan CAN:ia vaan se voi toimia yhdessä sen kanssa, ja monissa ajoneuvoissa se onkin suuria datanopeuksia edellyttävän tietoverkon ytimenä eri satelliittiohjainlaitteiden hoitaessa CAN ja LIN-aliverkkoja. Luonnollisesti olemassa on myös monia muita yhteysvaihtoehtoja, joissa jokaisessa on omat hyvät ja huonot puolensa. Käytännössä edellä mainittu FlexRay ja esimekriksi PSI5 eivät ole tässä tapauksessa kiinnostavia, koska niiden tukemiseksi valituilla laitteilla jouduttaisiin tekemään runsaasti ylimääräistä työtä. (Reif K. et al 2011)

Sähköisten siirtoteiden lisäksi käytetään myös optisia vaihtoehtoja, joskin henkilöautoissa useimmiten vain äänentoistojärjestelmissä suurten tiedonsiirtokapasiteettivaatimusten johdosta. MOST-väylä on esimerkki tällaisesta tekniikasta. Optinen tiedonsiirtojärjestelmä edellyttää molempiin päihin soveltuvia toimilaitteita ja tämän vuoksi se soveltuu huonosti

ajoneuvon moottoritulassa sensorien kanssa suoraan käytettäväksi. Sitä vastoin ohjainlaitteiden väliseen tietoliikenteeseen se on optimaalinen, joskin kustannuksiltaan arvokkaampi kuin sähköjohtimiin perustuva. Toisaalta valona siirtyvä signaali on käytännössä täysin immuuni sähkömagneettisille häiriöille. (Reif K. et al 2011)

Langatonkin siirtotie on mahdollinen, muttei useinkaan kovin järkevä ajoneuvokäytössä. Häiriösietoisia kriittisissä sovelluksissa käytettyjä langattomia järjestelmiä on kyllä olemassa, onhan esimerkiksi militäärikäytössä kauko-ohjattavia miehittämättömiä lentoaluksia. Koska tällaisen ohjausjärjestelmän on oltava ehdottoman luotettava, tarvitaan erityisiä ratkaisuja ja usein taloudelliset seikat eivät ole kaikkein päällimmäisinä suunnittelukriteereinä. Ajoneuvokäytössä tällaiset järjestelmät eivät kuitenkaan tarjoa merkittäviä etuja. On myös huomioitava, että langattomiin järjestelmiin on mahdollista kohdistaa helpommin hyökkäyksiä, joten myös tietoturvaan on kiinnitettävä erityistä huomiota. Usein fyysiset johtimet on pyritty sijoittamaan siten, ettei niihin pääse turhan helposti käsiksi.

Tietoverkkojen ja älykkään ohjauksen avulla voidaan vähentää kaapelointia ja parantaa integroitavuutta. Toisaalta yksittäisten sensoreiden liittäminen väylään edellyttää usein myös ylimääräisiä johtimia, jotta tarvittava sisäinen ohjainlogiikka voidaan lisätä sensoriin. Yksinkertaisten sensorien suhteen tämä useinkaan ei ole järkevää. Toisaalta taas laitteita, joihin on aiemmin mennyt lukuisia johtoja, voidaan liittää nyt muutamalla johdolla ja silti väylän kautta voidaan saada monenlaista informaatiota vaikkapa jonkin käyttöpaneelin nappuloiden tiloista. Monimutkaiset järjestelmät edellyttävät kuitenkin huolellista verkkotopologian suunnittelua, jotta varattu verkkokapasiteetti on riittävä ja optimaalisesti hyödynnetty.

3.2.2. Signaalin digitointi ja käsittely

Mikäli suoraan digitaalista signaalia tuottavaa poljinta ei käytetä, polkimen säätämä analoginen jännite- tai virtasignaali joudutaan lukemaan ADC:llä. Nyqvistin teoreeman mukaisesti signaalin digitoinnissa näytteenottotaajuuden tulee olla vähintään kaksinkertainen haluttuun näytteenottotaajuuteen nähden, jotta laskostumista ei tapahtuisi. Kvantisointitasojen määrä tulee ratkaista ääriarvojen ja tarvittavan resoluution suhteen. Kaasupolkimen ollessa kyseessä on luontevaa ilmaista mittaustulos prosentteina liikeradan maksimista, käytännössä vaikkapa 8-bittisenä suhdelukuna välillä 0 - 255. Useimmissa tapauksissa 8-bittiä riittää hyvin kvantisointiin, mikä 0 - 5 V jännitevälillä vastaa käytännössä 0,0195 V resoluutiota. Käytännön ADC:illa tämä edellytetty tarkkuus ei ole mikään ongelma.

Esimerkiksi standardi SAE J1939 määrittelee raskaan ajoneuvokaluston tietoliikenteelle tietyt perusedellytykset. Osio J1939-71 määrittelee kaasupolkimen asentotiedolle pituudeksi yhden tavun. Tällöin resoluutio on 0,4 % mitta-alueen kuvastaessa arvoja välillä 0 - 100 %. CAN-väylän viestirakenteita suunniteltaessa tulee varmistaa verkkokapasiteetin riittäminen kaikelle tarpeelliselle liikenteelle. Koska CAN:issa on käytössä ID-numeroon perustuva kilpavarausmenettely, saattaa liian tiukoilla ajoituksilla alemman prioriteetin viestit jäädä jalkoihin. Vanhempi J1939 määrittelee väylän nopeudeksi 250 kbit/s ja esimerkiksi ryhmä, johon kaasupolkimen asentotieto kuuluu, lähetetään 50 ms välein. Lisääntynyt ajoneuvoelektronikka on lisännyt tarvetta suuremmille siirtonopeuksille, mutta vasta vuonna 2011 viralliseen standardiin lisättiin 500 kbit/s nopeusluokka. Henkilöautoissa vastaava nopeus on ollut käytössä pidempään. (SAE J1939)

Potentiometriin perustuvalla polkimella tulee ensin syöttää stabiili jännite, jonka jälkeen ADC:lla mitataan jännite potentiometrin lähdöltä. Järjestelmä kalibroidaan siten, että resistanssin liukuman aiheuttaman jännitevälin ääripäät luetaan raja-arvoiksi polkimen kalibroimiseksi. Ääripäihin lisätään marginaalia, jota voidaan käyttää apuna järjestelmädiagnostiikassa.

Esimerkiksi eräässä moottoriurheiluun tarkoitetuissa ohjainlaitteissa käytetään kaasupolkimen asennon lukemiseen 500 Hz näytteenottotaajuutta, jolloin saadaan luotettavasti luettua polkimen asento 250 kertaa sekunnissa (Bosch Motorsport 2011). Koska jännitteessä ja ADC:n lukemassa sisääntulosignaalisissa tapahtuu pientä vaihtelua, tarvitsee signaalia suodattaa. Tähän on olemassa lukuisia tapoja. Yksinkertainen ja tehokas impulssimaisten häiriöiden suodatus voidaan tehdä mediaanisuodatuksella, jonka ikkunan koko on vaikkapa viisi näytettä. Tällöin kuitenkin efektiivinen lukutaajuus on keskimäärin vain viidesosa edellisestä eli 50 Hz. Teoriassa tämä aiheuttaa viivettä, mutta käytännössä voidaan todeta viiveen olevan merkityksetöntä, koska edellä mainitun J1939:n edellyttämään päivitystiheyteen nähden voidaan päästä vieläkin yli kaksinkertaiseen lukunopeuteen (SAE 2003). Linja-auton kaasupolkimen vasteelta ei muutenkaan voida edellyttää urheiluauton temperamenttista reagoitua.

3.2.3. Sähkömagneettiset häiriöt

Ajoneuvojen sähkömagneettista yhteensopivuutta eli EMC:tä koskevia vaatimuksia säädellään mm. kansainvälisillä IEC, ISO ja SAE -standardeilla. EMC-testaamiseen on olemassa useita standardoituja menettelytapoja. Bosch Automotive Handbook luettelee (s. 1016) seuraavat standardit:

- häiriösietoisuus
 - ISO 7637-1/-2/-3
 - ISO 11451
 - ISO 11452
 - ISO/TR 10605
- häiriöiden vaimentaminen
 - DIN/VDE 0879-1/-2
 - CISPR 12
 - CISPR 25

Tutkimusrajausten mukaisesti näiden sisältöä ei käydä tässä läpi tarkemmin, vaan tyydytään toteamaan, että tunnettujen valmistajien kaupallisesti tarjolla olevat polkimet ovat valmistajan tai sen edustajan niin vakuuttaessa linja-autokäyttöön sopivat.

Clemsonin yliopiston ajoneuvoelektronikan professori Toby Hubing on tutkinut ajoneuvoissa ilmeneviä sähkömagneettisia häiriöitä. Hän väittää, etteivät nykyiset suunnittelukäytännöt riitä huomioimaan tulevaisuuden autoissa esiintyviä entistä voimakkaampia sähkömagneettisia häiriöitä. Etenkin sähkökäyttöjen aiheuttamat häiriöt lisääntyvät tehontarpeen kasvun myötä. (Hubing 2010).

Tavallisia ajoneuvon EMI-lähteitä ovat mm. laturin aiheuttama värinä (engl. *ripple*), hakkureiden ja sähkökäyttöjen taajuusmuuttajien aiheuttamat kytkentäpulsit, PWM-kuormat, prosessorit ja tietoliikenne sekä mekaanisten osien aiheuttamat korkeataajuiset häiriöt (Reif K. et al. 2011 s. 1014-1017). Häiriöt voivat ilmetä välillisesti anturien ja johtimien tai suoraan ohjainlaitteiden kautta.

Kolmesta kuvatusista asennontunnistusmenetelmästä induktioon ja Hall-anturiin perustuvat järjestelmät ovat alttiimpia kaikenlaisille magneettikentille, joten niiden koteloimiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Teoriassa sopiva häiriö voi aiheuttaa mihin tahansa kahden anturin järjestelmiin identtiset häiriöt ja ECU ei tunnista mitään ongelmaa. Nykyään käytetään usein kolmen Hall-anturin yhdistelmää, jossa kaksi toimii jännitettä lisäävästi ja yksi vähentävästi. Tarkoituksena on vähentää erisuuntaisten sähkömagneettisten kenttien vaikutusta mittaustulokseen. Joidenkin valmistajien potentiometripolkimissa on myös kolme lähtöä. Potentiometrijärjestelmiin voi myös indusoitua jännitteitä, joten ne edellyttävät yhtä lailla huolellista rakenteellista suojausta. Tiedonsiirron osalta tilannetta voidaan parantaa käyttämällä virtaviestiä. (Hubing 2010)

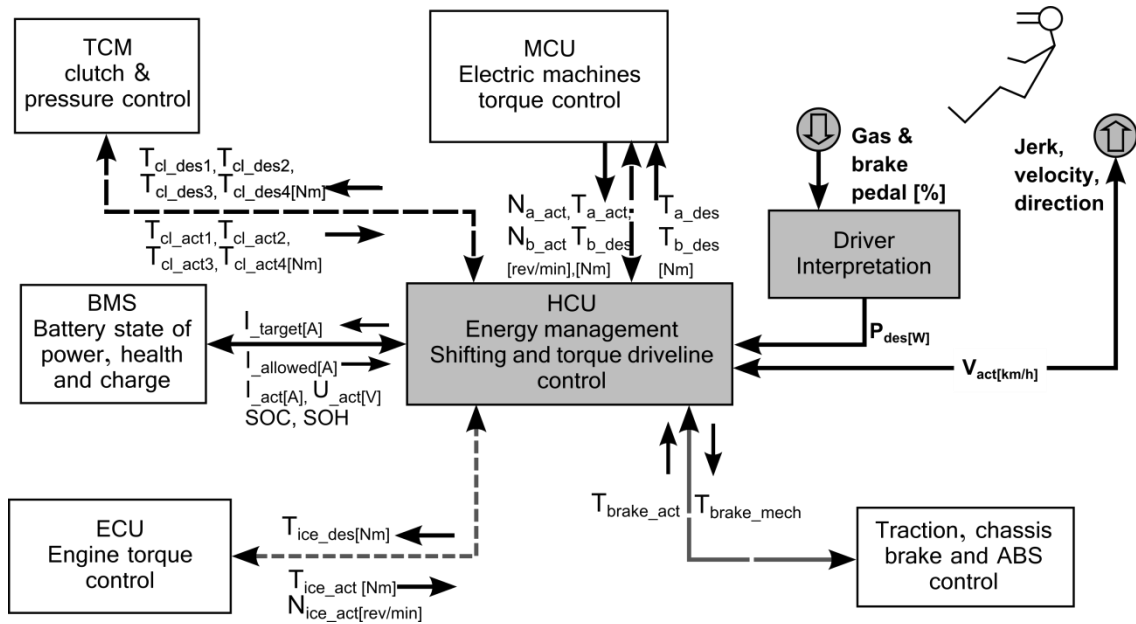
Koska CAMBUS eri osa-alueineen on pitkäaikainen ja monitahoinen projekti, järjestelmän käytännön toimivuutta voidaan testata vasta kun riittävä määrä laitteita on asennettu paikalleen. Silloin voidaan testata todellisissa tilanteissa eri häiriölähteiden aiheuttamia ongelmia. Etukäteen on arvioitu, että suurin yksittäinen häiriölähde on taajuusmuuttajien kytkemien suurten virtojen aiheuttamat vaihtelevat sähkömagneettiset häiriöt ja sähkömoottorin tuottama liikkuva magneettikenttä. Käytännössä on todettu, että taajuusmoottorien lähellä käytettävät jännitesignaalit eivät ole kovin luotettavia.

CAN:in etuna on differentiaalinen signaali, joka jo suojaamattoman kierretyn parihoitimen (UTP) kanssa on erittäin häiriötolerantti (Reif K. et al 2011 s. 1071). Koska ajoneuvossa on voimakkaita EMI-häiriölähteitä, olisi hyvä käyttää analogisia signaaleita mahdollisimman vähän, tarkoituksenmukaisesti suojattuna ja johdinpituus tulisi pitää mahdollisimman lyhyenä ilman turhia silmukoita. Suodatuksella voidaan joissain olosuhteissa parantaa tilannetta (luku 2.2.1), erityisesti digitaalisissa järjestelmissä on mahdollista hyödyntää myös mallinnettuja tunnettuja häiriölähteitä.

Käytännössä induktiivisesti kytkeytyvien häiriöiden ei ole luotettavasti todettu aiheuttaneen vakavia häiriöitä nykyisissä järjestelmissä. Kun *drive-by-wire* eli sähköinen kaasupoljin yleistyi, yleistyi myös ohjainlaitteiden EEPROM:in päivitettävyyden diagnostiikkaväylän kautta. Valmistajat ovat voineet suorittaa huoltojen yhteydessä vaivihkaa pienempiä ohjelmistongelmia korjaavia päivityksiä. Myös Toyotalla kaasupoljinepisodin aikoihin julkaistiin ECU-päivitys. Lisäksi alkuperäisestä ohjelmistosta puuttunut safety switch -ominaisuus saattoi olla yksi tekijä Toyotan kaasupoljinongelmissa. Lisäksi käytössä on ollut useamman eri alihankkijan valmistajia polkimia. Suunnittelijan on myös päivitysten osalta huomioitava, että autoa saatetaan huoltaa sellaisissa huoltopaikoissa, joiden ei ole mahdollista päästä suorittaa asianmukaisia päivityksiä tai edes tietää niiden olemassaolosta. (Sorensen 2010)

3.3. Säätojärjestelmästä

Varsinaisen moottoreita ohjaavan säätojärjestelmän säätöohjeet on suunnittelijoiden toimesta määritetty vääntöohjeiksi. Koska viime kädessä tutkimuksen keskeisenä aiheena on kuljettajan käyttöliittymä, myös käyttötuntuma ja sen kautta kontrolloitava voima on saatava annosteltua loogisesti. Kuvassa 7 on esitelty hybridiajoneuvon säätojärjestelmän peruseriaatteet ja sen pääkomponenttien väliset säätöohjeet.



Kuva 7. Hybridiajoneuvon säätöjärjestelmän peruseräkkeet Isermannin mukaan. Kuvan ohjainlaitteet: HCU Hybrid Control Unit, TCM Traction Control Module, MCU Motor Control Unit, ECU Engine Control Unit, BMS Battery Management System. (Kuva: Isermann 2010 s. 353)

Keskeisiltä toimintaperiaatteiltaan CAMBUS-projektiauton hybridisäätöjärjestelmä on pitkälti kuvan 7 kaltainen. Suunniteltua verkkotopologiaa esitellään tarkemmin luvussa 5.1.

3.3.1. Säätöstrategiat

Tässä luvussa esitellään hybridiautojen yleisimpien voimanlähdetyyppien säätöstrategioita. Moottorityyppien toimintaperiaatteet eroavat toisistaan ja siksi niissä säädetään eri tekijöitä, jotta saavutettaisiin joko haluttu vääntömomenti tai pyörimisnopeus.

Ottomoottorissa moottorin saamaa ilmamäärää rajoitetaan halutun tehon säätämiseksi ja koska palamistapahtumassa on oleellista oikea polttoaineen ja ilman suhde, ns. stökiometrinen suhde, käytetään bensiinikoneella perinteisesti volymetristä säätöä (engl. *volume based*) (Bosch Motorsport 2011). Käytännössä kaasupoljin säätää kaasuläppää rajoittaen moottorin saamaa ilmamäärää ja seoksensäätöjärjestelmä hoitaa halutun kaasun seossuhteen kulloisenkin ilmamäärän mukaisesti. Kaasuläppää tai kaasutinta säädettiin perinteisesti mekaanisella vajjeriyhteydellä. Myöhemmin yleistynyt sähköinen ohjaaminen mahdollisti mm. erilaisten oppivien mallien käytön ja vasteiden optimoimisen niin, että järjestelmä kykenee eri tilanteissa vastaamaan paremmin ennalta suunniteltua käyttäjäkokemusta. (Feder et al 2006) (Lamberson 2003)

Dieselmoottorin toiminta poikkeaa huomattavasti ottomoottorin toiminnasta. Polttoaineen palaminen ei edellytä vastaavaa tarkkaa seoksensäätöä ja palotilassa on käytännössä jatkuva ilmaylimäärä. Vastaavaa kaasuläppää ei lähtökohtaisesti tarvita ja puhutaan ns. kvantitatiivisesta säädöstä (engl. *quantity-based*), jossa säädetään moottorin palotilaan ruiskutettua polttoainemäärää. Perinteisesti kaasupoljin vaikutti suoraan polttoainepumppuun. Polttoaineen määrällä kontrolloidaan suoraan moottorin tuottamaa vääntömomenttia ja toisaalta, syötettyä polttoainemäärää rajoitetaan otetun ilmamäärän mukaan palamisen lopputuloksen parantamiseksi, ts. estetään erityisen suurella polttoainemäärällä ilmenevä savutus. (Reif K. et al 2012)

Erilaisia sähkömoottoreita säädettäessä voidaan vaikuttaa niiden tuottamaan vääntömomenttiin ja nopeuteen säätämällä jännitettä, virtaa ja taajuutta. Sähkömoottoreiden tehovaste on yleensä huomattavasti lineaarisempi kuin polttoainetta käyttävien moottoreiden ja vääntömomentti on suurimmillaan pienillä pyörimisnopeuksilla (Reif K. et al. 2011, s. 646).

Järjestelmän aikavakio ja sen tuottama vaste on teknisistä syistä johtuen eri toteutuksilla hyvinkin erilainen. Mekaanisella pumpulla varustetun vapaasti hengittävän dieselin kaasupoljin edellyttää painamista syvemmälle ja pitempään vasteen saamiseksi, kuin esimerkiksi tyypillisen ottomoottorin kanssa. Sähkömoottorilla suurin vääntömomentti on käytävissä heti paikaltaan lähtiessä ja tehokäyrä on suurempi. Digitaalisten säätöjärjestelmien avulla vaste on helppo muokata tietynlaisen tavoitellun käyttäjäkokemuksen mukaiseksi. Mallintamalla voimanlähde voidaan useiden eri voimanlähteiden antamaa tehoa kontrolloida siten, että käyttäjän kannalta ohjaustuntuma säilyy kaikissa olosuhteissa samanlaisena myös voimanlähdettä vaihdettaessa.

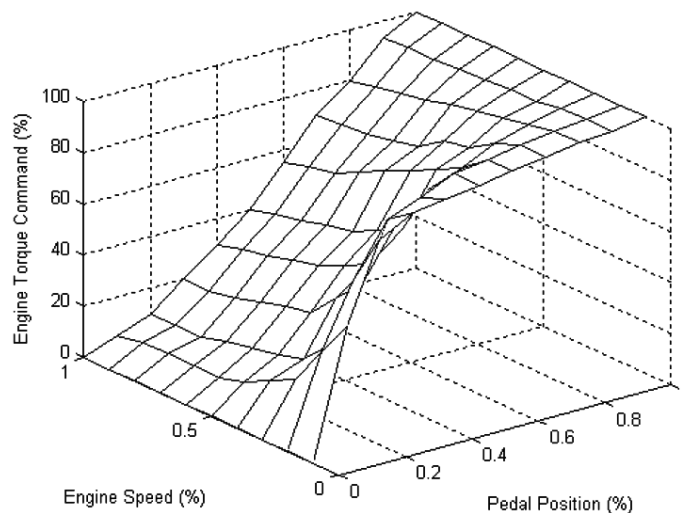
3.3.2. Säätöohjeet

Pyörimisnopeussäädössä pyritään järjestelmän pyörimisnopeus pitämään haluttuna, toisin sanoen ohjearvoa vastaavana (saks. *sollwert*, engl. *setpoint value*), käyttäen kulloisenkin järjestelmän erilaisia ohjausmenetelmiä. Sähkömoottoria ajettaessa voidaan käyttää taajuusmuuttajaa, bensiinikonetta ohjattaessa käytetään volymetristä säätöä ja niin edelleen. Antureiden ja säätölogiikan avulla huolehditaan siitä, että nopeus pysyy haluttuna. Järjestelmän mallista riippuen säätöjärjestelmän virityksessä voidaan huomioida paremmin ajoneuvon nopeuden mukaan kasvavat vastukset. Modernin moottorinohjauksen kanssa pyörimisnopeusohje toteutetaan epäsuorasti vääntömomenttiohjauksen avulla (Volkswagen Antriebssysteme 2012).

Tarkasteltaessa kaasupoljinta säätötekniikan näkökulmasta, kutsutaan sitä ulkomaisessa kirjallisuudessa nykyään ”kuljettajan toiveeksi” (saks. *fahrerwunsch*, engl. *driver request*). Puhekielessä sitä joskus kuulee sanottavan leikkisästi toivomuspolkimeksi. Ajoneuvopuolella vääntömomenttiohje on nykyään yleistynyt erityisesti pidonhallintajärjestelmien kehityksen myötä ja käytännössä toivomuspolkimen tai -säätimen asento tulkitaan erilaisten matemaattisten menetelmien avulla toivotuksi vääntömomentiksi. (Reif K. et al 2011)

Vastaavasti auton muut järjestelmät tuottavat erilaisia vääntömomenttiohjeita. Ilmastoinnin ohjainlaite kompressorin aiheuttaman kuormituksen mukaan lisää kuljettajan pyyntöön oman kompensatioarvionsa. Lisäksi huomioidaan laturin aiheuttamaa kuormitusta ja luistonesto puolestaan voi pyytää vähentämään vääntömomenttitoivetta havaittujen ajo-olosuhteiden perusteella. Moottorinohjaus eri säätöstrategioiden ja toiminnallisten lohkojen keinoin pyrkii tuottamaan moottorilla toivotun vääntömomentin. Vääntömomenttiohjetta ja elektronisia toimilaitteita käyttämällä säätöjärjestelmästä voidaan tehdä monipuolisempi ja sen avulla voidaan parantaa moottorin hyötysuhdetta. (Reif K. et al 2011)

Kuvassa 8 on esitetty eräänlainen moottorinohjainlaitteen urheilullista kaasupoljinvastetta kuvaava kartta. Vaste voidaan ohjelmoida kiinteäksi, siitä voidaan tehdä ajotavan mukaan oppiva tai se voi olla kuljettajan itse valittavissa. Kartan lisäksi tulkintaan vaikuttavat muut parametrit, kuten moottorin lämpötila ja sen hetkinen kuormitus. Maksimivääntö ja järjestelmän käyttäytyminen (vaste, aikavakio) on ennalta mallinnettu. Karttoja voidaan päivittää nykyisten ohjainlaitteiden EEPROM-tekniikan ansiosta. (Feder et al 2006) (Lamberson 2003)



Kuva 8. Kuljettajan toive eli kaasupolkimen asento tulkittuna vääntömomentiksi kierrosluvun funktiona $ET(ES,PP)$. (Kuva: Lamberson 2003)

Käytännössä kuljettajalle annetaan mahdollisuus valita tai ECU valitsee oppimiensa arvojen perusteella kuljettajalle jonkun sopivan ohjaustavan, jonka lisäksi moottorinohjainlaite voi käyttää pyörimisnopeusohjetta esim. tyhjäkäynnin ylläpitämiseksi. Vääntömomenttiohjatuissa järjestelmissä tyhjäkäyntiä ylläpitävä funktio laskee moottorin mallin ja vallitsevien olosuhteiden perusteella tarvittun vääntömomentin tyhjäkäynnin ylläpitämiseksi.

Usein ohjearvoa laskettaessa huomioidaan vallitsevat olosuhteet, esimerkiksi moottorin sen hetkinen kuormitus, minkä perusteella saadaan tarkempi kuva siitä, millä tavoin kuljettaja haluaa vaikuttaa tilanteeseen (Feder et al 2006). Moottorin tuottamaa vääntömomenttia voidaan myös rajoittaa esimerkiksi moottorin tai voimansiirron kestävyyttä ajatellen. Monien tehokkaiden turbomoottoreiden ohjainlaitteissa ahtopainetta ja vääntöä rajoitetaan vaihdekohtaisesti. Koska sähkömoottoreiden tuottama vääntömomentti on suurimmillaan paikaltaan lähtiessä, on sitä usein tarpeen rajoittaa voimansiirron säästämiseksi.

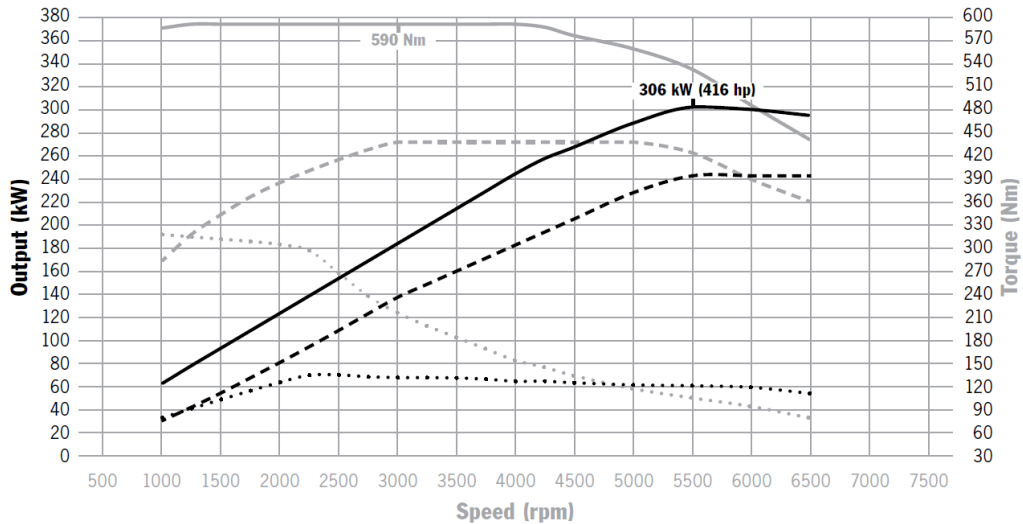
Uudempia diesel-ohjainlaitteita käyttävissä teollisuusmoottoreissa nopeussäätö toimii samalla periaatteella kaasupolkimen antaessa prosentuaalisen nopeuden minimin ja maksimin välillä, ja työskentelynopeutta säättävä järjestelmä laskee tavoitenopeuden ylläpitämiseksi tarvittavan vääntömomentin (Volkswagen Antriebssysteme 2012). Viime kädessä moottorin varsinainen alemman tason säätölogiikka käyttää siis pelkästään vääntömomenttiohjetta (Reif K. et al 2012 s. 536). Nopeussäätöä tarvitaan mm. voimansiirron nopeuksien synkronointiin ja esimerkiksi polttomoottorin käynnistämässä pyörimisnopeussäätö on usein käytännöllisempi. Kuljettajan näkökulmasta kaasupoljin toimii viimekädessä moottorin tai ajoneuvon nopeussäätimenä.

3.3.3. Useamman voimanlähteen säätäminen

Hybridiajoneuvon säätöjärjestelmä (HCU) on lähtökohtaisesti epälineaarinen, koska eri tilanteissa käytetään eri voimanlähteitä - joskus eriaikaisesti, joskus samanaikaisesti. Tällöin voi olla tarpeellista, että kaasupoljinta vähän painettaessa pienempi moottori todellisuudessa ottaa enemmän irti voimareservistään ja hyötysuhdetta optimoidaan kuljettajan siitä tietämättä.

Voimanlähteitä eriaikaisesti käyttämällä voidaan optimoida kulutusta ja yhtäaikaisesti käyttämällä voidaan tehomäärää kasvattaa (Reif K. et al. 2011 s. 656). Esimerkiksi EU-kulutussykli noudattaa tiettyä ennalta määrättyä kaavaa. Teoriassa siis kaikki testatut autot ajetaan samalla tavalla, koska syklit sisältävät tarkkaan määritellyä ajoa tietynlaisissa jaksoissa (Reif K. et al. 2011 s. 505). Kun esimerkiksi kaupunkiajon liikkeellelähdet optimoidaan tapahtumaan pääasiassa sähkömoottorilla, voidaan helposti kaunistaa

kulutuslukemia, kun taas voimakkaalla bensiinimoottorilla otetaan suuria tehoja urheilulliseen ajoon. Kuvassa 9 on esitelty Porsche Panamera S E-Hybridin teho- ja vääntökäyriä. Varsin pienen sähkömoottorin avulla ison urheilullisen auton kulutuslukemat on saatu painettua varsin alas (3.5l/100km, 71g/km) (Porsche 2013). Käytännön kulutus voi kuitenkin poiketa tästä huomattavasti.



Kuva 9. Kuvaajassa on esitetty Porsche S Panamera E-hybridin sähkömoottori-generaattoriyhdistelmän, turboahdetun bensiinimoottorin ja niiden yhtäaikaisessa käytössä tuottama vääntö ja teho. Vääntö on esitetty harmaalla, teho mustalla; sähkömoottorin arvot on kuvattu pisteviivalla ja bensiinimoottorin katkoviivalla. Yhtenäinen viiva kuvaa voimanlähteiden yhtäaikaista käyttöä. (Kuva: Porsche 2013)

Koska digitaalisten säätöjärjestelmien avulla voidaan helposti toteuttaa epälineaaraisia järjestelmiä ja ne voivat olla kytkettynä toisiinsa erilaisten toisistaan riippumattomien epälineaaristen ohjeiden kautta, järjestelmät voivat toimia itsenäisesti ja näin kokonaisjärjestelmä tuottaa lopputuloksena mahdollisimman toimivan käyttäjäkokemuksen. Erilaisten vasteiden vaihtelulla voidaan huomioida myös kesken ajon vaihdeltavien erilaisten teholähteiden välistä tehoeroa ja pyrkiä järjestämään niin, että kuljettaja ei periaatteessa huomaa eroa, koska vaste polkimen mukaan on eri järjestelmillä samankaltainen.

Esimerkiksi Siemensin 2003 patentoima hybridin vääntömomenttiohjeen tulkintamenetelmä sisältää kahta voimanlähdettä varten kaksihaaraisen järjestelmän. Tarkoitus on huomioida eri voimanlähteiden tuottamat erilaiset vääntömomenttivasteet. Molemmista haaroissa tulkitaan ensimmäisessä lohossa kaasupolkimen asento eli kuljettajan toivoma vääntömomentti esiasetettujen vastekäyrien perusteella. Tämän jälkeen käyrien tuottamat vasteet syötetään omille lohkoilleen, joissa määritellään varsinainen kyseisen voimanlähteen säätöohje. Säätöohjeen määrittämistä varten on olemassa etukäteen tehty moottorimalliin perustuva

käyrä. Näin kahden voimanlähteen yhteenlaskettu vääntömomenttiohje on korkeintaan suurin kulloinkin sallittu vääntömomentti. Toivottu vääntömomentti ei saa kuitenkaan missään vaiheessa ylittää säädettyä maksimirajaa, sillä ongelmaksi voisi tulla voimansiirron kestävyteen vaikuttavat tekijät. (Gassner et al 2003)

Autolehtien koeajoraporteissa usein keuhataan, jos monimutkaistenkaan teknisten järjestelmien toimintaa ei normaalikäytössä huomaa. Tämä on säätötekniisten laitteiden jatkuvan kehityksen ansiota. Yksinkertaistetusti kuljettaja esittää vääntömomenttitoiveen ja hybridijärjestelmä säätää teholähteitä pyrkiäkseen toivottuun tulokseen mahdollisimman energiatehokkaasti. Mikäli huomataan pidon heikkenemistä, lasketaan anturitietojen sekä fysikaalisten mallien mukaan tarve pienentää kuljettajan toivomaa vääntömomenttia ja näin pyritään estämään renkaiden tarpeeton sutiminen. Voi myös olla, että jarrujärjestelmän kautta aktivoidaan pyöräkohtaisesti jarruja pidon palauttamiseksi tai matkiakseen tasauspyörästä lukkoa. Koska ohjausjärjestelmät joutuvat tekemään valtavan määrän reaaliaikaista laskentaa, on ohjelmoinnin kannalta etsintätaulukot (engl. *lookup-table*) usein järkevin toteutustapa liukulaskennan aiheuttaman kuormituksen vähentämiseksi.

Hybridien säätöön liittyviä patenteja on jo lukuisia. Markkinoilla ja vielä kehitteillä olevissa hybrideissä on päädytty kokeilemaan monenlaisia teknisiä ratkaisuja niin voimanlähteiden kuin voimansiirtotekniikoidenkin osalta. Tekniikan voimakas kehitys edellyttää myös uusien ratkaisujen kehittämistä, jotta säätöjärjestelmät tuottaisivat mahdollisimman toimivia kokonaisuuksia.

3.3.4. Järjestelmämallit

Jotta mekaaninen säädin saataisiin antamaan erilaisia vasteita eri tilanteissa, jouduttaisiin tekemään varsin monimutkaisia ratkaisuja, eivätkä ne useinkaan olisi toteutukseltaan käyttökelpoisia. Digitaalijärjestelmät mahdollistavat tämän kuitenkin huomattavan paljon helpommin. Niissä voidaan milloin tahansa vaihtaa ohjauslogiikkaa ja parametreja modifioimalla tuottaa erilaisia vasteita. Vastetta voidaan muokata ajotilanteen tai vallitsevien olosuhteiden mukaan. Erilaisten oppivien algoritmien käyttö voi vaikuttaa tapaan, jolla käyttäjän toivetta käsitellään. Aiemmin on todettu, että polkimen vaste on usein lineaarinen, mutta sen perusteella asetettava ohjearvo usein määräytyy epälineaarisen mallin perusteella. Nämä puolestaan määritellään mallintamalla ensin moottoreiden toiminta ja ajoneuvon liittyvät perussuureet.

Ajoneuvossa keskeiset liike-energiaan vaikuttavat tekijät ovat moottorin tuottama vääntömomentti, vierintävastus (engl. *rolling resistance*), nousuvastus (engl. *climbing*

resistance), massa, otsapinta-ala ja ilmanvastuskerroin. Näihin vaikuttaa useita tekijöitä, muun muassa ilmanpaine ja -kosteus sekä ilman lämpötila. Kuormitus vaikuttaa erityyppisten moottoreiden toimintaan eri tavoin, esimerkiksi turbomoottorin imuilman määrä lisääntyy kuormituksen myötä lisääntyvän pakokaasuvirtauksen johdosta tiettyyn rajaan saakka. Mallintamisen kannalta monimutkaisemmaksi asian tekee ohjainlaitteen suorittama aktiivinen ahtopaineensäätö.

Moottorin käytöstä voidaan tutkia mittaamalla keskeisiä arvoja erilaisten kuormitusten kanssa. Dynaamisten mallien käyttäminen edellyttää huomattavaa laskentakapasiteettia, joskin yksinkertaisimmillaan moottoria voidaan kuvata siirtofunktion avulla. Moottorimallien identifioimisesta on olemassa runsaasti materiaalia, eikä tämän tutkimuksen puitteissa ole järkevää käsitellä asiaa tämän tarkemmin. (Reif K. et al. 2011)

Moottorimallien perusteella voidaan rakentaa dynaaminen säätöjärjestelmä, jolla on useita toimintatapoja ja joka mukautuu eri tilanteisiin. Kuljettajan ajotapaa voidaan analysoida reaaliaikaisesti ja valita erilaisista ennalta määräytyistä vasteista parhaiten ajotyyliä vastaava. Elektronisesti ohjatuissa automaattivaihteistoissa tällaista logiikkaa on käytetty jo pitkään. Vaihtamisohjelmaa säädellään sen mukaan, ajetaanko enemmän taloudellisesti vai urheilullisesti. Monissa tapauksissa kuljettaja voi itse vaikuttaa järjestelmän reagointiin kytkimen tai valikkoasetusten kautta. Tämä voi tapahtua muuttamalla joitain skaalaavia kertoimia, vaihtamalla laskukaavaa tai käyttämällä eri etsintätaulukkoita. Laskennassa voidaan huomioida sekä asento että asennon muutos ja muutosnopeus. Tällöin järjestelmällä on pelkän asentotiedon lisäksi käytössä useita parametreja, joiden avulla voidaan optimoida toimintaa paremmin kuljettajan tottumuksia vastaavaksi.

3.3.5. Diagnostiikka

Turvallisuus on tärkeä osa ajoneuvosuunnittelua. Säätöjärjestelmän on hyvä pystyä tulkitsemaan, onko kaasupoljin kunnossa ja voidaanko siltä saatuun tietoon luottaa. Tässä luvussa käsitellään lyhyesti joitakin diagnostisia menetelmiä, joiden avulla kaasupolkimen toimintaa voidaan tarkkailla.

Useimmat mittalaitteet antavat vähintään kahdennetun signaalin, joiden käytös eri polkimen asennoissa tunnetaan. Toisistaan määrätyn ajan liikaa poikkeavien signaalien perusteella voidaan epäillä vikaa mittalaitteessa ja tavallisesti järjestelmä tällöin asetetaan vikatilaan. Vikatilassa järjestelmä voi joko mennä tyhjäkäynnille tai toimia rajoitetusti, jos toinen signaaleista voidaan todeta luotettavaksi. On mahdollista käyttää aikarajaa myös vikatilan peruuttamiseen, mikäli poljin näyttää jälleen toimivan normaalisti.

Koska polkimen mekaanisessa tarkkuudessa voi ilmetä pieniä heittoja, voidaan mittausalueen ylä- ja alamarginaaleina käyttää esimerkiksi kymmentä prosenttia. Polkimelta mitattu arvo voi hieman alittaa tai ylittää tuon rajan ja kaikki on vielä kunnossa. Joissain ohjainlaitteissa sadan prosentin raja on asetettu esim. 4,0 Volttiin. Poljin voi antaa täysin painettuna esim. 4,2 V ja diagnostiikassa on vielä jonkin verran marginaalia ylöspäin virhetulkintojen välttämiseksi. Mitatun arvon ollessa 5,0 V voidaan tulkita johtimien olevan oikosulussa keskenään. Jos puolestaan polkimen ollessa ylhäällä jännitteen tulisi olla vaikkapa 0,3 V, mutta mitattu jännite on jatkuvasti 0,0 V, voidaan todeta johtimissa olevan katkos.

Digitaalijärjestelmässä turvallisuutta voidaan lisätä sillä, että vastaanottava pää edellyttää säännöllisiä viestejä kaasupolkimen asennosta. Jos näin ei menetellä ja ohjainlaitteella oleva arvo päivittyy vain viestin saapuessa, on viestiliikenteen pysähtyessä mahdollista, että moottori jatkaa suurella teholla vaikka poljin on jo nostettu ylös. Jos taas tämä huomioidaan ja poljintieto ei päivity ennalta asetetussa määräajassa, voidaan olettaa tekniikassa olevan jokin häiriö ja asettaa järjestelmä varmuuden vuoksi tyhjäkäynnille tai pysähdyksiin.

Usein polkimen mekaniikassa on lisäksi luvussa 3.1.4 mainittu turva- tai tyhjäkäyntikytkimeksi nimitetty kytkin, jonka tarkkailu on huomioitava diagnostiikassa. Hyvin yksinkertainen vikadiagnostinen toiminto voidaan toteuttaa tarkkailemalla, onko poljin yläasennon marginaalialueella ilman, että kytkin on aktivoitunut. Useissa toteutuksissa kuitenkin sekä tyhjäkäynti- että kickdown-kytkin on jätetty pois ja ne tulkitaan ohjelmallisesti polkimen asennon perusteella.

Kaasupoljinsignaalia ajatellen piikkimäisistä häiriöistä voi aiheutua epä mukavuustekijöitä kuten nykimistä. Suurin riski on luonnollisesti silloin, jos järjestelmä kuvittelee polkimen olevan kokoajan pohjaan painettuna. Sen vuoksi polkimen turvakytkin ohittaa aina asentotunnistuksen vähintään ohjelmatasolla. Nykyään usein tehdään myös niin, että jarrupoljinta painettaessa moottorinohjainlaite ohjelmallisesti ohittaa kaasun, mutta esimerkiksi BMW:llä tämä on toteutettu suoraan mekaanisesti (Hubing 2010). Tällöin viimeistään jarrua painettaessa kaasupoljin on aina pois käytöstä.

Vakavien vikojen suhteenärkevintä on estää ajaminen, jolloin käytännössä edellytetään laitteiston tarkastamista ja korjaamista. On tietysti mahdollista, että sekä potentiometri että kytkin ovat yhtäaikaan vialliset, joten kuljettajalla täytyy vielä olla jokin lisäkeino sammuttaa laitteisto turvallisesti odottamattomissa vikatilanteissa.

4. YHTEENVETO

Kaupallisten kaasupolkimien asentotunnistuksessa on käytössä kolme menetelmää, jotka kaikki on käytännössä todettu hyvin kestäviksi, mutta häiriösietoisuus on toisissa menetelmissä jonkin verran parempi. Mitään selkeää vertailututkimusta nimenomaan kaasupoljinvaihtoehtojen EMI-sietoisuudesta ei löytynyt. Useampaan Hall-anturiin perustuva menetelmä vaikuttaisi kuitenkin olevan kaupallisista vaihtoehdoista varmin asentotunnistuksen menetelmä. Optinen kaasupoljin olisi kiinnostava vaihtoehto, joskin se edellyttää jatkokehittelyä ollakseen yhtä luotettava kuin muut käytössä olevat menetelmät.

Eri valmistajien käyttämät perusmenetelmät ovat sinänsä samat, eikä mitään täysin poikkeuksellisia ratkaisuja noussut esille. Eroja ilmeni lähinnä yksityiskohdissa, kuten potentiometrin liuskojen määrässä ja Hall-anturitoteutuksen häiriösietoisuudessa. Mitään suuria näkemyseroja asioista ei noussut esille kirjoittajien kesken, lähinnä EMI-sietoisuutta selvittäessä nousi esiin useampia selitysvaihtoehtoja julkisuudessa olleille Toyotan ongelmille. Niihin on todennäköisesti suurimpana syynä selittäjien omakohtaiset intressit.

Suurempien ja pienempien ajoneuvojen perustoteutukset noudattavat pitkälti samoja periaatteita. Luonnollisesti kovempaan käyttöön tehdyissä työkoneissa ratkaisut ovat robustimpia, eivätkä aina yhtä esteettisesti painottuneita kuin henkilöautoissa. Tiedonsiirron edellyttämät pitkät etäisyydet asettavat suunnittelulle omat haasteensa, jolloin usein pyritään hyödyntämään paikallisina yhdyskäytävinä tai solmuina toimivia keskusohjainlaitteita.

Analogisten sähköisten signaalien suhteen kannattaa suosia virtasignaalia. Käytettävästä ohjauselektronikasta riippuen voidaan paikallisesti luettavissa sensoreissa ja toimilaitteiden ohjauksessa käyttää myös siihen tarkoitukseen luotua LIN-väylää. Kaapeloinnissa voi hyödyntää parikaapelin häiriöitä kumoavia ominaisuuksia ja erityisesti suojattu parikaapeli on tässä tapauksessa suositeltava vaihtoehto.

Tiedonsiirto voidaan toteuttaa analogisesti tai digitaalisesti. Nykyään tiedonsiirto järjestetään käytännössä aina pääosin digitaalisesti ja hyvin suojattuna (virheenkorjaus tai ainakin -tunnistus). Useimmat valmistajat käyttävät perustietoliikenteessä CAN-väylää, joskin jotkin valmistajat ovat ottaneet käyttöön FlexRayn tiedonsiirron kapasiteettivaatimusten kasvettua etenkin luksusautoissa.

Myös johdotus on tärkeä tehdä huolellisesti. CAN-väylän kanssa käytetään usein kierrettyä paria ja eri valmistajilla on omat suosituksensa silmukoiden pituudesta. Optisia järjestelmiä käytetään tällä hetkellä lähinnä äänentoistojärjestelmissä. Niiden etu on käytännössä täydellinen immuniteetti sähkömagneettisia häiriöitä vastaan. Hyvin laadittu väylästandardi

huomioi jo itsessään monia häiriösietoisuuteen liittyviä asioita. Lisäksi se helpottaa järjestelmien integroitavuutta ja vähentää tarvittavan kaapeloinnin määrää. Tarpeeton digitalisointi ja väylään liittäminen puolestaan herkästi lisää johtimien määrää.

Voimakkaita sähkömagneettisia häiriöitä aiheuttavien laitteiden lukumäärä ajoneuvoissa kasvaa nopeasti ja niitä sääntelevät standardit eivät välttämättä ole täysin ajan tasalla. Voimakkaampien häiriölähteiden yleistyessä edelleen asiaa tulisi kenties tutkia tarkemmin ja kehittää ajantasaisia testausmenettelyitä.

Nykyään moottorisäädössä on pitkälti siirrytty vääntömomenttisäädön käyttöön. Tuotettua vääntömomenttia ei useinkaan mitata vaan käytetään avuksi laskennallisia arvoja. Niiden avulla voimansiirron hallintaan liittyvät järjestelmät voivat kommunikoida tarvetta kompensoida kuljettajan toivomusta. Moottorin käytöstä voidaan myös muokata helposti. Kuten edellä on todettu, myös nopeusohje toteutetaan säätämällä vääntömomenttia. Ennalta luotujen etsintätaulukoiden ja matemaattisten mallien avulla reaaliaikaista laskentaa voidaan yksinkertaistaa. Malleja hyödynnetään myös tuotetun vääntömomentin arvioimisessa.

5. CAMBUS TOTEUTUS

CAMBUS:in pohjana on vuoden 1997 Volvo B10B -linja-auto, jossa on käytössä VDO E-Gas Compact -tyyppinen kaasupoljin. Tässä hyödynnetään potentiometriin perustuvaa kaasupolkimen asennontunnistusta, jonka jännitettä dieselmoottoria säättävä Bosch EDC M 7 dieselohjainlaite lukee. EDC puolestaan ohjaa dieselpumppua PWM-signaalin avulla (Volvo 1993). Ainakin alkuvaiheen toteutuksessa pyritään käyttämään hyväksi alkuperäistä poljinta. Järjestelmä on kyseistä ajoneuvoa ajatellen luotettavan tuntuinen, suurimpana herkkyytenä polkimen ja ohjainlaitteen välinen analoginen signaali.

Jotkut vanhan EDC:n, moottorin, vaihteiston ja mittariston väliset analogiset jännitesignaalit kulkivat käytännössä auton päästä päähän, kerrallaan useita metrejä suojaamattomina. Lisäksi samoissa nipuissa kulki myös useita mahdollisesti häiriöitä aiheuttavia signaaleita, kuten magneettiventtiilien PWM-kuormat (Sorensen 2010). Korityöhön liittyvää kaapelointia on ympäri autoa, mm. valojärjestelmässä ja pneumatiikan ohjauksessa, samoin kuin suuri määrä releitä hoitamassa eri asioiden ohjaamista.

Volvon myöhemmissä alustoissa koko järjestelmä on suunniteltu satelliittitopologiaan perustuvalla CAN-väyläratkaisulla. Niissä kokonaisratkaisu on huomattavasti nykyaikaisempi ja myös EMC-asiat huomioidaan paremmin. Kaapelointia on saatu vähennettyä ja korisähköjen ohjauksjärjestelmää on helpompi muokata ohjelmistopohjaisen toteutuksen ansiosta. Jos kyseisen ajoneuvoaihion järjestelmä olisi ollut SAE J1939 -standardia noudattava, mitä todennäköisimmin useimmat halutut signaalit olisivat olleet helposti saatavilla keskeisiltä väyläohjainlaitteilta ja muunnoksen kokonaisvaltainen toteutus olisi lähtökohtaisesti ollut huomattavasti yksinkertaisempi. (Volvo 1993) (Volvo 2002)

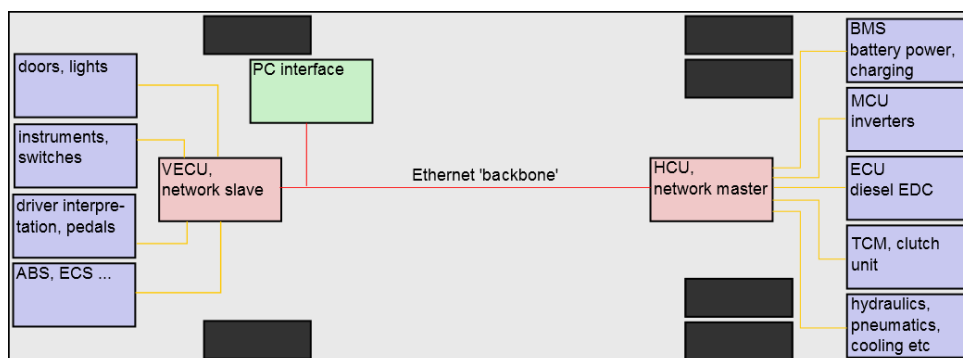
5.1. Verkkotopologia

Koska ajoneuvossa tullaan käyttämään täysin digitaalista säätöjärjestelmää, on järkevää pyrkiä hyödyntämään mahdollisimman laajasti siihen liittyvien laitteiden tukemia tiedonsiirron mahdollisuuksia. Hyvin suunnitellulla järjestelmällä voidaan vähentää kaapelointia, suojautua häiriöiltä ja helpottaa järjestelmien integroitavuutta. Peruslaitteistoksi oli valittu ABB:n valmistamat AC500-sarjan ohjelmoitavat teollisuuslogiikat, jotka tukevat useita eri tietoliikennestandardeja. Ensimmäisinä vaihtoehtoina esiin nousivat CAN ja Ethernet-verkot.

Varsinaisen fyysisen CAN:in ja alemman tason protokollamäärittelyn lisäksi on olemassa useita korkeamman tason CAN-protokollia. Esimerkiksi laajennetun CAN 2.0B:n päälle rakennettu raskaiden ajoneuvojen tiedonsiirtostandardi SAE J1939 olisi tietyllä tapaa

ideaalinen valinta, koska siinä on tiedonsiirron puolesta huomioitu häiriösietoisuus, laitetunnisteet ja viestiformaatti on määritelty selkeästi (SAE 2003). Valitut ohjainlaitteet asettavat kuitenkin rajoituksia, koska esim. standardia CAN:ia tai CANopen:ia tukevista teollisuuslogiikoista ei välttämättä löydy suoraa tukea J1939:lle, jolloin rajapinta joudutaan itse ohjelmoimaan.

Koska auton etupäässä on useita luettavia käyttökytkimien tiloja ja ohjattavia laitteita, ja varsinainen säätöjärjestelmä sijaitsee reilun kymmenen metrin päässä auton takaosassa, on järkevää tehdä etupäähän oma yksikkö, jossa halutut sisääntulot muunnetaan mahdollisimman lyhyiden johtimien avulla suoraan digitaaliseen muotoon. Projektiryhmä päätyi käyttämään PLC-laitteiden välisessä tiedonsiirrossa teollisuus-Ethernet -väylää ja muiden laitteiden kanssa niiden edellyttämiä CAN-standardeja. ABB:n ohjelmointiympäristössä käsiteltävät muuttujat voidaan suoraan linkittää tiettyihin CAN-viesteihin ja laitteet huolehtivat tietoliikenteestä käytännössä automaattisesti asetettujen vaatimusten mukaisesti. Suunniteltu verkkotopologia on esitetty havainnollisemmin kuvassa 10. (CiA 2013)



Kuva 10. CAMBUS-ajoneuvon yksinkertaistettu verkkotopologia, jossa käytetyt lyhenteet noudattavat samoja määritelmiä kuin kuvassa 8. VECU eli vehicle electrics control unit ohjaa auton etupäässä olevia laitteita ja lukee käyttökytkimien asentoja. Samalla se toimii yhdyskäytävänä sen ja varsinaisen hybridisäätöjärjestelmän tietoliikenteen välillä.

Etu- ja takapään ohjainlaitteiden välillä tapahtuva tietoliikenne hoituisi myös esimerkiksi CAN-väylän avulla. Yhteys päätettiin lopulta järjestää Ethernet-verkon avulla, koska se helpottaisi erilaisten PC-laitteiden liittämisen samaan verkkoon. Kummankin pään ohjainlaite voi toimia CAN-yhdyskäytävänä tarvittaessa useiden eri CAN-verkkojen välillä. Tarvittavien tietojen siirtäminen hoituu kyseisillä PLC-laitteilla varsin helposti. Käytetty kaapelointi on luonnollisesti myös tässä suojattu parikaapeli (STP).

5.2. Dieselmootorin säätö

Projekti-auton generaattoria pyörittävä Volkswagenin dieselmoottori on peräisin pakettiautosta ja projektissa hyödynnetään sen olemassa olevaa EDC-ohjainlaitetta. Kyseinen ohjainlaite on vanhahkoa mallia ja se tarvitsee ohjaukseensa luvussa 2.1.3 kuvatun kaltaista analogista jännitesignaalia. Kaiken lisäksi se sijaitsee hyvin lähellä pahimpia häiriölähteitä, joten sen signaalien järjestämiseen järjestelmää ohjaavalta laitteelta tulee kiinnittää erityistä huomiota. Jännitesignaali voidaan muuntaa virtaviestiksi ja ohjainlaitteen päässä taas toisinpäin. Näin joudutaan toimimaan puhtaasti ohjainlaitteen asettamista rajoituksista johtuen. Nykyaikaisten teollisuusmoottoreiden ohjainlaitteissa on mahdollista välittää halutut säätöohjeet käyttämällä CAN-viestintää (Volkswagen Antriebssysteme 2012).

Mainitun dieselmootorin Bosch EDC 15+ -ohjainlaite säätää polttoainetta syöttävää pumppua kaasupolkimen asennon eli analogisen ohjausjännitteen perusteella. Koska hybridisäätöjärjestelmän (HCU) kannalta vääntömomenttiohje on järkevämpi menetelmä, tehdään moottorista matemaattinen malli, jonka avulla sen ohjauksessa voidaan käyttää vääntömomenttisäätöä. Mallin perusteella elektroninen säätöjärjestelmä viritetään niin, että kulloisessakin tilanteessa EDC:tä ohjaavat jännitetasot ovat sopivia ja laitteisto käyttäytyy halutulla tavalla. Taajuusmuuttajat ohjaavat sähkömoottoria ennalta lasketun mallin mukaisesti suoraan CAN-väylästä luetulla vääntömomenttiohjeella.

Hybridisäätöjärjestelmän keskeiset tehtävät ovat ohjata eri moduuleita suorittamaan tarvittavat kytkennät voimalinjassa ja ohjata voimanlähteitä tai niitä ohjaavia laitteita toivotun vääntömomentin tuottamiseksi.

5.3. Automaatiojärjestelmän suunnittelu

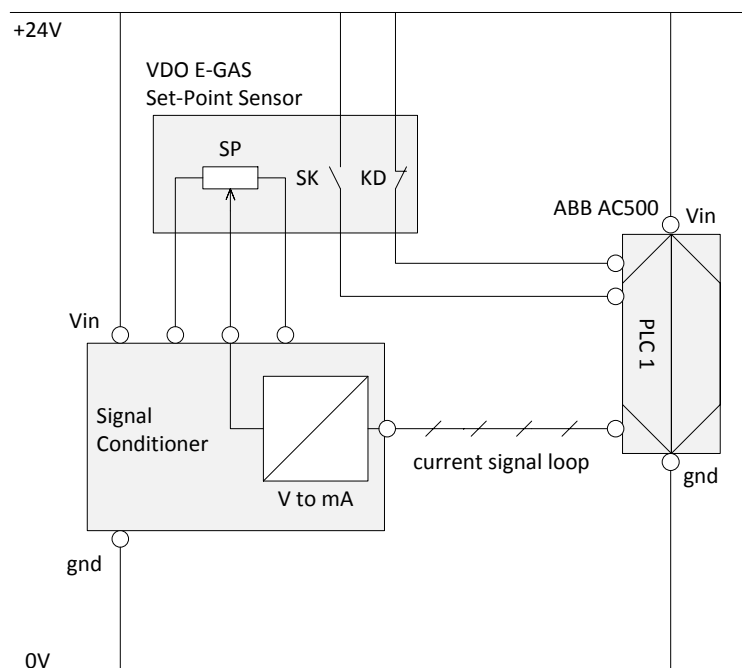
Automaatiojärjestelmästä vastaava projektiryhmä otti suunnittelutyönsä lähtökohdiksi tämän tutkimuksen esittämät tulokset. CANBUS-projekti-auton alkuperäisen kaasupolkimen potentiometrin iästä ei ole tarkkaa tietoa, mutta se todettiin tehdyissä mittauksissa virheettömästi toimivaksi. Poljintiedon siirtämisessä hyödynnetään virtasignaaliuunnosta. Analoginen virtasignaali digitoidaan PLC-teollisuuslogiikalla auton etuosassa ja takaosassa säätöjärjestelmän master-laite käsittelee Ethernet-väylän kautta välitetyt digitaaliset signaalit. Mikäli aikanaan laitteistoa testatessa ilmenisi ongelmia nimenomaan asentotunnistimen toiminnassa, korvataan se uudemmalla Hall-anturitoteutukseen perustuvalla polkimella.

Moottorinohjaus- ja akkujärjestelmät kommunikoivat CAN- ja CANopen -verkkojen kautta. Etupäähän sijoitettu yksikkö voi huolehtia myös käyttäjärajapinnasta. Sillä voidaan ohjata

valo- ja ovijärjestelmiä, lukea käyttökytkimien tiloja ja siihen voidaan liittää mittaristo ja muita tarpeellisia laitteita. Näin voidaan vähentää kaapelointia ja yksinkertaistaa eri järjestelmien ohjausta. Hieman uudemmissa linja-autoissa sähköjärjestelmät on toteutettu vastaavanlaisella verkkotopologialla.

5.4. Kaasupolkimen toteutus

Jo aiemmin oli päätetty käyttää Volvon alkuperäistä kaasupoljinta. Sen kytkeminen järjestelmään päätettiin käytännössä toteuttaa siten, että ajoneuvon etupäähän sijoitetun PLC:n virtasignaalia lukeva tuloportti on kytketty kaasupolkimen yhteydessä olevaan valmiiseen kaupalliseen viestimuuntimeen, joka hoitaa jännite-virtasignaalinmuunnoksen. Käytännössä siis kaasupolkimelle syötetään haluttu vakiojännite (5 V), jolloin viestimuunnin palauttaa potentiometrin ulostulojännitteen mukaisesti PLC:lle 4 - 20 mA virtasignaalin. Polkimen sisältämien kytkimien tilat luetaan suoraan PLC:n binäärisillä tuloilla. Kytkennän perusidea on esitetty kuvassa 11. Polkimen statukset lähetetään luvussa 5.1. kuvattujen väyläratkaisuiden avulla hybridisäätöjärjestelmälle auton takaosaan.



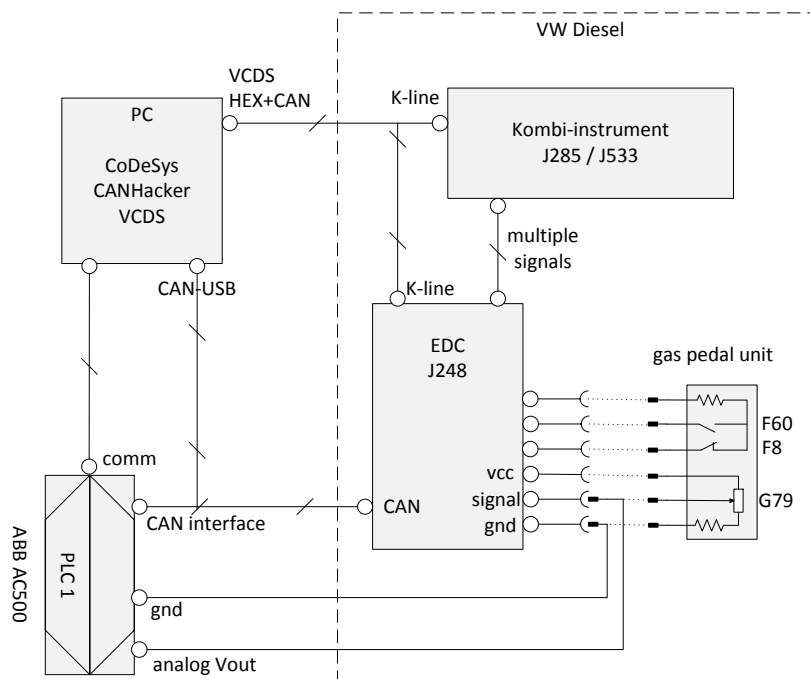
Kuva 11. Kaasupolkimen kytkentä. Kaasupolkimen turva- ja kickdown-kytkimet (SK, KD) luetaan PLC:n binäärisillä tuloilla. Viestimuunnin lukee potentiometrin tilan ja lähettää asentotiedon virtasignaalina PLC:lle.

5.5. Dieselin jänniteohjauksen testaaminen

Kirjallisuusselvityksen varsinaiseen kaasupoljinongelmaan liittyy CAMBUS-projektsissa käänteisesti myös dieselmoottorin kaasupolkimen emuloiminen PLC-logiikalla. Aiemmassa tekstissä on viitattu erilaisiin diagnostisiin mahdollisuuksiin ja esitelty esimerkinomaisia jänniterajoja. Tässä luvussa kuvataan hieman, kuinka järjestelyä testattiin käytännössä ja minkälaisia havaintoja tehtiin.

Ensitesteissä CAN-viestiliikennettä luettiin käyttäen CAN-USB sovitinta ja CANHacker-ohjelmaa. Jotta EDC:n CAN-tilakone ei menisi virhetilaan, oli myös CAN-yhdyskäytävän sisältävä mittaristo (J285) kytketty, kuten toimivassa ajoneuvossa. Viestien tulkintaa suoritettiin aluksi Exceliin siirretyn lokitiedoston avulla. CAN-viestien sisällön selvittäminen onnistui lopulta helposti, joskin EDC:n toimintaa tarkemmin kuvaava Boschin dokumentti Funktionsbeschreibung EDC15+ oli varsin vaikeasti saatavilla. Siinä on kuvattu kyseisen ohjainlaitteen toimintaa ja esitelty seikkaperäisesti myös CAN-viestien rakenne. Kun halutut tiedot oli saatu dekodattua, lisättiin kaasupoljinemulaattoriksi luotuun PLC-ohjelmaan mahdollisuus lukea CAN-viesteistä halutut tiedot suoraan sisäisiksi muuttujiksi.

Testijärjestelyn eri komponentit ja niiden väliset testin kannalta oleelliset signaalit on esitetty yksinkertaistetussa kaaviokuvassa 12. PLC oli kytketty EDC:n kaasupolkimen sisääntuloon edellisessä luvussa kuvastusta järjestelmästä poiketen käyttäen tavallista jännitesignaalia. Koska kyseinen EDC ei edellytä kuin yhtä kaasupoljinsignaalia, PLC:llä säädeltiin vain yhtä jännitesignaalia välillä 0-5 Volttia. EDC:n ja mittariston väliseen CAN-väylään oli lisäksi kytketty nyt edellä mainittu PC ja PLC. Mittariston diagnostinen rajapinta (J533) sisältää CAN-yhdyskäytävän lisäksi myös kytkennät niin kutsutuille K- ja L-linjoille, joilla KWP-protokollien avulla voidaan olla yhteydessä väylään liitettyihin ohjainlaitteisiin. K-linja on standardoitu yksijohtoinen ja kaksisuuntainen tiedonsiirtotie ajoneuvojen diagnostiseen käyttöön. Ross-techin VCDS-diagnostiikkaohjelmaa käyttäen tarkasteltiin EDC:n mitta-arvoja K-väyläyhteyden kautta. Näin voitiin varmistaa, että PLC:llä luetut arvot vastasivat sekä mittariston näyttämiä arvoja että EDC:n diagnostiikalle antamia arvoja. Vasteet kaasupoljinsignaaliin olivat halutunlaisia ja järjestely toimi kokeissa toistuvasti täysin moitteettomasti.



Kuva 12. Kaasupoljinemulaattorin testijärjestely. Kuvan J- F- ja G- numerot vastaavat VW:n kytkentäkaaviossa käyttämää numerointia.

Taulukossa 1 on otettu esimerkiksi kaksi EDC:n CAN-viestinnästä tallennettua viestiä. Kaikki taulukon numeroarvot ovat heksadesimaalilukuja. Molemmat CAN-ID:t ovat moottorinohjainlaitteen lähettämiä, 0x280 on ryhmä *Motor 1* ja 0x288 on ryhmä *Motor 2*. DLC kertoo viestin pituuden tavuissa. Ensimmäisen viestin (ID 0x280) ensimmäinen tavu on bittimaski, jonka viimeinen tavu kertoo EDC:n lukeman tyhjäkäyntikytkimen tilan *S_LGS*. Tässä tapauksessa tavu on binäärilukuna esitettyä 0b01010001 ja koska muuttuja *S_LGS* on yläaktiivinen, voidaan todeta tyhjäkäyntikytkimen olevan suljettu ja näin ollen poljin on normaaliasennossa. Samasta tietueesta saadaan myös kierrosluku. Se kerrotaan tavuissa kolme ja neljä, jotka edustavat yhtä arvoa *N_MOT_MO1*. CAN-viesteissä on huomioitava, että usein sanat esitetään käänteisesti siten, että eniten merkitsevä bitti (MSB) on jälkimmäisen tavun ensimmäinen bitti ja vähiten merkitsevä bitti (LSB) edeltävän viimeinen bitti, muuten bittijärjestys on molemmissa tavuissa vasemmalta MSB:stä oikealle LSB:hen. Nämä yhdistämällä saadaan 16 bittiä pitkä sana, jonka arvo välillä 0-0x7FFF kertoo skaalatun pyörimisnopeuden. Virhetilassa arvo on 0xFFFF. Tässä tapauksessa jakamalla saatu luku neljällä saadaan moottorin pyörimisnopeus. Kuudes tavu on muuttuja *PWGPBM*, joka puolestaan kertoo kaasupolkimen luetun asennon prosenteissa. Tässä 0-100 % edustava lukuväli on 0-0xFE ja 0xFF ilmoittaa virhetilanteen. Koska kaasupoljin on viestejä tallennettaessa ollut ylhäällä, on mitattu arvo 0 %. Toisen viestin (ID 0x288) toisesta datatavusta saadaan puolestaan muuttuja *T_WTF_MO2*, joka kokonaisuudessaan kuvaa EDC:n mittaamaa jäähditysnesteen lämpötilaa, joskin arvoalue 0-0xFE tulee skaalata välille

-40 - +120 °C. Arvo 0xFF on varattu jälleen havaitun virheen ilmoittamiselle. Tässä tapauksessa siis lämpötila on n. 27 °C. (Bosch 2002)

Taulukko 1. Taulukossa on esimerkki CANHackerilla luetuista EDC:n lähettämistä viesteistä. Kaikki taulukon arvot ovat heksadesimaalilukuja.

| ID | DLC | byte1 | byte2 | byte3 | byte4 | byte5 | byte6 | byte7 | byte8 |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 280 | 08 | 51 | 26 | 1C | 0C | 26 | 00 | 27 | 27 |
| 288 | 08 | E8 | 6A | 13 | 00 | 00 | 4E | 74 | 00 |

EDC:n sekä CAN:iin että K-väylään lähettämien tietojen perusteella voitiin päätellä raja-arvot, joiden perusteella kaasupolkimeen liittyvät vikatilanteet voidaan tunnistaa. Nämä rajat on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Taulukossa on esitetty Volkswagenin kaasupolkimen avulla mitattujen jännitteiden ja EDC:n mitta-arvojen jänniterajojen mittaustulokset. Idle-kytkimen raja tulkittiin CAN-viesteistä. Polkimen antama vaste on lineaarinen.

| EDC "implausible signal" | OEM poljin ylhäällä (2kΩ) | EDC mitta-arvo 0% | OEM-poljin idle-sw (EDC mitta-arvo) | EDC mitta-arvo 100% | OEM poljin pohj. (1kΩ) | EDC "signal too high" |
|--------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|
| < 0.1 V | 0.35 V | 0.5086 V | < 5% | 3.96 V | 4.491 V | ≥ 4.66 V |

Korvaamalla kaasupoljin PLC:n säätelemällä jännitesignaaliilla, voitiin saada aikaan haluttu käytös. Vastaavuudet voitiin todeta vertaamalla mittariston näyttöä, PLC:n lukemien CAN-viestien avulla laskettuja arvoja ja VCDS-diagnostiikkaohjelmalla luettuja mitta-arvoja. Säädellessä jännitettä sallituissa rajoissa käytös oli toivotunlaista eikä vikatilaa saatu aiheutettua. Tyhjäkäyntikytkimen emulointia ei tässä yhteydessä testattu, mutta mitään ongelmaa ei siitä huolimatta ilmennyt.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Yksinkertaiselta laitteelta vaikuttava kaasupoljin on muun ajoneuvotekniikan kehityksen ohella muuttunut toteutukseltaan varsin monimutkaiseksi säätölaitteeksi. Hybridiajoneuvossa, jossa edellytetään useiden voimalähteiden ja energiamuotojen hallintaa, kokonaisjärjestelmä on suunnittelun näkökulmasta erittäin haasteellinen. Valmiita komponentteja on tarjolla, mutta kokonaisuuden suunnittelussa tarvitaan runsaasti asiantuntemusta. Pelkkä sähkötekniikan perusteiden tuntemus ei riitä kovin pitkälle, vaan tarvitaan myös syvällistä digitaalelektronikan, säätötekniikan, sulautettujen järjestelmien ja tietoliikennetekniikan ymmärtämistä. Lisäksi hyvä mekaniikan tuntemus ja erityisesti kokemus mekatroniikan alueelta on eduksi.

CAN-protokollan fyysisestä määrittelystä on saatavilla hyvin tietoa. Pelkkien tietoliikennettä säätelevien määrittelyjen tunteminen ei kuitenkaan vielä auta kovin pitkälle. Kaupallisten ratkaisujen toimittaja yleensä antaa mukaan riittävät dokumentaatiot, mutta sovellettaessa esimerkiksi käytettyä autonmoottoria ja sen omaa ohjainlaitetta, voi CAN-viestien selvittäminen olla hyvinkin haasteellista. J1939-standardi on kaupallinen standardi, jonka viestirakenteet ovat yleisiltä osiltaan tarkasti määriteltäviä. Vaikka CANopen puolestaan on julkinen standardi ja useiden valmistajien laitteet tukevat myös sitä, sisältävät molemmat standardit valmistajakohtaisiksi varattuja alueita. Näistä on usein hyvin vaikea saada tietoa sellaisten laitteiden osalta, jotka on tarkoitettu käytettäväksi jossain tietyssä niille suunnitellussa ympäristössä.

Boschin kustantamissa käsikirjoissa on havaittavissa lievää painotusta heidän markkinoimaansa tekniikkaan päin. Käytetyistä lähteistä sekä Boschin että Volkswagenin opetusmateriaalit ovat hieman yleisluontoisempia ja antavat monipuolista yleistietoa ajoneuvotekniikan eri osa-alueilta. Isermannin kirjat puolestaan menevät syvemmälle todellisessa suunnittelussa tarvittaviin asioihin, käyvät läpi matemaattisia perusteita ja mm. säätötekniikan sovelluksia ajoneuvoissa käsitellään erittäin kattavasti. Alan kirjallisuutta on tarjolla monipuolisesti, mutta haasteeksi voivat muodostua kieliongelmat. Olisi mielenkiintoista lukea esimerkiksi japanilaisia alan teoksia, sillä onhan Japani ollut pitkään aktiivisesti kehittämässä ajoneuvotekniikan innovaatioita. Lähdemateriaalissa oli myös spesifisiä tietoja sisältäviä teoksia, joiden käyttäminen lähteinä tuli lähinnä CAMBUS-projektissa käytettyjen laitteiden kautta.

Ajoneuvoväylien tietoturva on ollut viime aikoina paljonkin esillä, mutta sitä koskevia selvityksiä ei tämän tutkimuksen puitteissa ollut tarvetta lähteä selvittämään. Tekeillä on kuitenkin tarkempia tutkimuksia ja asiaan tullaan kiinnittämään jatkossa enemmän huomiota.

Käytössä olevissa tiedonsiirtomenetelmissä data on pääsääntöisesti täysin suojaamatonta, joten on mahdollista tehdä järjestelmään ei-toivottuja kytkentöjä, jolloin kriittisiin ohjausjärjestelmiin voidaan vaikuttaa monin tavoin. Tähän liittyy monenlaisia uhkia. Tietoturvaa ajoneuvojärjestelmissä on syytä pohtia tarkoin ja etsiä keinoja estää tällaisia kytkentöjä. Johtimien ja kytkentäpisteiden parempi fyysinen suojaaminen voi asennusteknisestä näkökulmasta hankaloittaa tarpeettomasti korjaustöitä. Kun tietoa aletaan varjella tarkemmin, tarkoittaa se usein lisälaittevalmistajien lisenssikustannusten kasvamista, mikä voi rajoittaa vapaata kilpailua. Nykyäänkin yksityiskohtaisten dataliikennettä koskevien dokumenttien saaminen on erityisesti yksityiselle ihmiselle hankalaa. Usein tietoa kuitenkin vuotaa jostain harrastajienkin saataville. Tietovuodot saattavat kuitenkin pahimmillaan uhata turvallisuutta ja edesauttaa rikollisuutta.

Ajoneuvossa käytettyjen elektronisten laitteiden häiriintymistä pyritään myös hyödyntämään tarkoituksellisesti. Kehitteillä on ns. pulssiaseita, joilla on mahdollista kohdistaa voimakkaita sähkömagneettisia häiriöitä ajoneuvojen elektronisiin laitteisiin. Tavoitteena on saada ohjauselektronikka häiriintymään ja estää ajoneuvon käyttö. Koska kysymyksessä ei ole itse ajoneuvossa syntyvä tai normaali käytössä ilmenevä häiriö, aihe oli tutkimusrajan ulkopuolella. Olisi mielenkiintoista selvittää, kuinka herkästi tällainen ase aiheuttaa laitevaurioita tai vaaratilanteita, jos ohjainlaite jatkaa toimintaansa ja häiriöt vaikuttavat järjestelmään virheellisten ohjaussignaaleiden kautta.

Oma mielenkiinto heräsi myös useassa kohtaa mainittujen voimakkaiden pulssimuotoisten virtojen mahdollisiin terveysvaikutuksiin. Tietävästi tätä aluetta ei ole kovinkaan tarkkaan kartoitettu ajoneuvojen osalta. Niiden suunnittelussa huomiota on kenties kiinnitettävä erityisesti matkustajiin kohdistuvien sähkömagneettisten kenttien minimoimiseen, koska ajoneuvoissa johtimet sijaitsevat lähellä kyydissä olevia ihmisiä. Sähkömoottorilla toimivissa ajoneuvoissa jännitteet ja virrat ovat perinteisiä ajoneuvoja suurempia. Esimerkiksi osassa sydämentahdistimia on havaittu satunnaisia lieviä toimintahäiriöitä magneettikuvauksessa ja linja-auton tapauksessa mahdollisesti altistuvia ihmisiä on myös moninkertainen määrä.

Kaasupolkimessa ei käyttäjän näkökulmasta ole tapahtunut pitkään aikaan mitään erityisen mullistavaa. Hellan markkinoima haptinen järjestelmä on kyllä mielenkiintoinen, mutta tulevaisuus näyttää, kuinka autovalmistajat alkavat ideaa toteuttaa. Mikäli polkimen tuottamat tuntosignaalit ja jäykkyysvasteiden säätö eivät ole yhtenäisiä valmistajien kesken, useita eri autoja käyttävät kuljettajat joutuvat opettelemaan vaihtoehtoisia merkityksiä ja se voi monimutkaisuudessaan viedä pohjan alkuperäisiltä tarkoituksilta.

LÄHDELUETTELO

Bosch, 2002. *Funktionsbeschreibung EDC15+*. Robert Bosch GmbH.

Bosch Motorsport, 2011. *ECU MS 4 Sport Turbo Function sheet*. Bosch Engineering GmbH.

CiA (CAN in Automation), *CANopen*. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.9.2013]. <http://www.canopen.org>

Feder, J. & Maier, S., 2006. *Method And Device For Determining A Driver Torque Setpoint For An Internal Combustion Engine*, US pat. 7124012 B2, 17.10.2006.

Gassner, F., Grassl, G., Gutknecht-Stöhr, F. & Probst, G., 2003. *Method And Device For Determining Torque Setpoint Values For A Motor Vehicle Having At Least Two Drive Assemblies*, US pat. 6588256 B2, 8.7.2003.

Hella KGgA Hueck & Co, 2013. *Active Accelerator Pedal Sensor (AAPS)*. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.10.2013]. <http://www.hella.com/microsite-electronics/146.html>

Hubing, T., 2010. *Does Electromagnetic Interference Cause Sudden Acceleration in Automobiles?* [verkkodokumentti]. [viitattu 28.9.2013]. http://www.cvel.clemson.edu/Presentation_Slides/Houston-UA_Presentation.pdf

Immonen, P., 2008. *Hybridikäytön mitoitus liikkuvan työkoneen energian talteenottojärjestelmäksi*. Lappeenranta: LTY.

Isermann, R., 2010. *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe: Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe*. Viewerg+Verlag.

Kostic, A. D., 2011. *Lead-free Electronics Reliability - An Update*. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.9.2013]. http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2011-NASA-GSFC-whisker-failure-app-sensor.pdf

Lamberson, D.M., 2003. *Torque Management Of Gasoline Engines Combustion Engine*. Berkeley: University of California at Berkeley.

Liikenneministeriö, 1990. *Liikenneministeriön päätös linja-autojen rakenteesta ja varusteista*. Helsinki: Liikenneministeriö.

Porsche (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG), 2013. *The new Panamera*. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.12.2013]. <http://www.porsche.com/uk/models/panamera/panamera-s-e-hybrid/featuresandspecs>

Reif, K., Dietsche, K.-H. et al., 2011. *Bosch Automotive Handbook*. 8. painos. Plochingen: Robert Bosch GmbH.

Reif, K. et al., 2013. *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*. 6. painos. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Reif K. et al., 2012. *Bosch Dieselmotor-Management*. 5. painos. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

SAE, 2003. *Vehicle Application Layer — J1939-71 (through December 2001)*, standardi. SAE International.

Sorensen, C. ja Lunau, K., 2010. *Out of control*, Maclean's. 2/22/2010, Vol. 123 Issue 6, p30-33. 4p.

Texas Instruments, 2013. *LDC1000 Inductance to Digital Converter*. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.10.2013]. <http://www.ti.com/product/ldc1000>

Volkswagen, 1999. *Self Study Program #210 - Electronic Power Control (EGAS)*, Wolfsburg: Volkswagen AG.

Volkswagen, 2003. *Self Study Program #305 - The 2.5 l R5 TDI engine*. Wolfsburg: Volkswagen AG.

Volkswagen, 2002. *Self Study Program #304 - EDC16*. Wolfsburg: Volkswagen AG.

Volkswagen, 2003. *Self Study Program #316 - The 2.0 ltr. TDI engine*. Wolfsburg: Volkswagen AG.

Volkswagen Antriebssysteme, 2012. *VW industrial engine with control unit EDC 17CR Version 1.2*. Wolfsburg: Volkswagen AG.

Volvo, 1993. *Huoltokäsikirja Linja-autot, Osa 3 (37), Sähköjärjestelmä B10B ja B12, Sähkökytkentäkaaviot, toimintakaaviot*. Göteborg: Volvo Bus Corporation.

Volvo, 2002. *Servicehandbok Bussar, Kapitel 3 (37), Multiplex elsystem B10L- och B10BLE-bussar med GH10C-naturgasmotor, Kopplingsscheman för chassikomponenter*. Göteborg: Volvo Bus Corporation.