

Lean-burn-kaasumoottoreiden päästöjen minimointi voimantuotannossa

Tom Eklund, Matti Kytö & Nils-Olof Nylund

VTT Energia



ISBN 951-38-5088-9
ISSN 1235-0605
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energian käyttö, Biologinkuja 3-5, PL 1601, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 460 493

VTT Energi, Energiandvändning, Biologgränden 3-5, PB 1601, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 460 493

VTT Energy, Energy Use, Biologinkuja 3-5, P.O.Box 1601, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 460 493

Tekninen toimitus Leena Ukskoski

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1997

Eklund, Tom, Kytö, Matti & Nylund, Nils-Olof. Lean-burn-kaasumoottoreiden päästöjen minimointi voimantuotannossa [Minimisation of emissions from lean-burn gas engines in power production]. Espoo 1997. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1813. 49 s. + liitt. 9 s.

UDK 621.433:628:681.5

Avainsanat gas engines, emissions, control systems, detectors, reduction, oxygen, exhaust gases, nitrogen oxides, energy production, environmental protection

TIIVISTELMÄ

Tavoitteena oli kehittää takaisinkytketty seoksensäätöjärjestelmä yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotantolaitoksen (CGP) laihaseoskaasumoottoria varten. Työssä käytettiin Sisu Dieselin valmistamaa ja Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa laihaseoskäyttöiseksi kehitettyä, 7,4-litraista, kipinäsytytteistä, avoimella palotilalla varustettua Valmet 634 GA -kaasumoottoria.

Seossuhteen takaisinkytkentäsignaaliksi valittiin kaupallinen, pakoputkeen asennettava, nopea, pakokaasujen happipitoisuutta lineaarisesti mittaava anturi. Koeajot osoittivat, että takaisinkytkentään valittu laihaseosanturi soveltuu laihaseoskaasumoottorin seoksensäätöohjaukseen.

Kehitetty seoksensäätöjärjestelmän ohjaus perustuu ohjelmoitaviin EPROM-muistipiireihin, joihin voidaan ohjelmoida erityyppisiä säätöstrategioita. Seoksensäädön lisäksi järjestelmään voidaan integroida vakiopyörintänopeussäätimen ja sytytysennakon säädön ohjaukset.

Pienet pakokaasupäästöt, etenkin typenoksidipäästöt, ovat seoksensäätöohjatun laihaseoskaasumoottorin tärkein tavoite. Laihaseostekniikka vähentää myös hiilimonoksidipäästöjä, mutta hiilivetyypäästöt (metaani) jopa kasvavat siirryttäessä typenoksidipäästöjen kannalta riittävän laihaan seokseen. Tästä syystä tutkittiin myös erityisesti maakaasulle kehitettyjen hapettavien laihaseoskatalyysaattorien vaikutusta pakokaasupäästöihin. Mitatut katalyysaattorit poistivat pakokaasuista lähes täydellisesti hiilivedyn ja hiilimonoksidin, mutta typenoksidipäästöt pysyivät odotetusti ennallaan.

Tutkimuksen tavoitteet saavutettiin pääosin. Järjestelmän toimivuutta pitkäaikaiskäytössä ei voitu varmistaa työssä. Muita tämän mitan kokonaisenergiälaitoksiin ja takaisinkytkentään soveltuvia antureita ei toistaiseksi ole saatavissa. Kirjallisuuden mukaan Japanissa on kehitteillä nopea typenoksideja mittaava anturi.

Eklund, Tom, Kytö, Matti & Nylund, Nils-Olof. Lean-burn-kaasumoottoreiden päästöjen minimointi voimantuotannossa [Minimisation of emissions from lean-burn gas engines in power production]. Espoo 1997. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1813. 49 p. + app. 9 p.

UDC 621.433:628:681.5

Keywords gas engines, emissions, control systems, detectors, reduction, oxygen, exhaust gases, nitrogen oxides, energy production, environmental protection

ABSTRACT

The aim was to develop a closed-loop mixture-control system for a lean-burn gas engine of a combined heat and power generating plant (CHP). A Valmet 634 GA 7,4-litre spark-ignition gas engine with an open combustion chamber, manufactured by Sisu Diesel, was used as the test engine. It was changed lean-burn at the Technical Research Centre of Finland.

A commercial sensor was chosen for the feed-back signal of the mixture ratio. The sensor was installed in the exhaust pipe, it was fast, and measured the oxygen content of exhaust gases linearly. The test runs indicated, that the lean-burn sensor chosen is well suitable for controlling the mixture regulation of the lean-burn gas engine.

The control system developed for mixture regulation is based on programmable EPROM memory circuits, in which different types of regulation strategies can be programmed. In addition to mixture regulation, controllers for engine speed and ignition advance can be integrated to the system.

The most crucial aims in the use of the mixture-controlled lean-burn gas engine are small exhaust emissions, in particular, nitrogen oxide emissions. Lean-burn technology also reduces carbon monoxide emissions, while hydrocarbon emissions (methane) may even increase when using a mixture that is optimal with regard to nitrogen oxide emissions. For this reason, the effect of oxidizing lean-burn catalytic converters developed especially for natural gas on exhaust emissions was studied. The catalytic converters measured removed the hydrocarbons and carbon monoxide nearly completely, while the nitrogen oxide emissions remained unchanged, as expected.

The objectives of the study were mainly achieved. However, it was not possible to verify the operability of the system in the long-term use by this work. There are no other sensors suitable for total energy power plants of this size class and for feed-back systems as yet. According to literature references a fast nitrogen-oxides measuring sensor is under development in Japan.

ALKUSANAT

Työ oli osa Teknologian kehittämiskeskuksen (TEKESin) rahoittamaa energia- ja ympäristötekniikan tutkimusohjelmaa SIHTI 2 ja se toteutettiin VTT Energian Moottoritekniikan tutkimusryhmässä vuosina 1994 - 1995.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää takaisinkytketty seoksensäätöjärjestelmä CHP-laitoksen laihaseos-kaasumootoria varten. Työssä käytettiin Sisu Dieselin valmistamaa, VTT Energiassa laihaseoskäyttöiseksi kehitettyä Valmet 634 GA -kaasumootoria. Tavoitteet saavutettiin pääosin, mutta järjestelmän toimivuutta pitkäaikaiskäytössä ei työssä voitu varmistaa.

Työn valvojina olivat dipl.ins. Kari Saviharju VTT Energiasta ja dipl.ins. Raija Pikku-Pyhältö TEKESistä. Tutkimuksen vastuunalaisena johtajana toimi tekn. tri Nils-Olof Nylund ja muina tutkijoina dipl.ins. Matti Kytö ja dipl.ins. Tom Eklund, kaikki VTT Energiasta. Erikoislaboratoriomestari Pekka Martelius Teknillisen korkeakoulun (TKK) autolaboratoriosta vastasi säätöjärjestelmän suunnittelusta ja ohjelmoinnista.

Espoo, joulukuu 1996

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
1 JOHDANTO	9
2 TAVOITTEET JA TOTEUTUS	10
3 KIRJALLISUUSKATSAUS	11
3.1 Yleistä	11
3.2 Maakaasun (metaanin) polttoaineominaisuuksia	11
3.3 Laihaseosmoottorin toimintaperiaate ja -edellytykset	13
3.3.1 Yleistä	13
3.3.2 Seossuhde	13
3.3.3 Palotila	15
3.3.4 Kerrospoltto	15
3.3.5 Sytytysennakko ja imuilman lämpötila	17
3.3.6 Säätojärjestelmä	20
3.4 Esimerkkejä laihaseosmoottoreista	23
3.4.1 Cummins L10-240G- ja B5.9G-maakaasumoottorit	24
3.4.2 JARI-laihaseosmoottori	24
3.4.3 Nissanin maakaasumoottori	25
3.4.4 TNO-kaasumoottori	26
4 MOOTTORIASENNUS	28
4.1 Koejärjestely	28
4.1.1 Moottori	28
4.1.2 Sytytysjärjestelmä	29
4.1.2 Kaasunsyöttöjärjestelmä	29
4.1.4 Takaisinkytketty seoksensäätojärjestelmä	29
4.1.5 Mittausjärjestely	30
4.2 Alustavat koeajot	31
4.2.1 Perussäädöt ja suoritusarvot	31
4.2.2 Koeajomatriisi	31
5 MITTAUKSET	33
5.1 Laihaseosanturi	33
5.2 Pakokaasut	33
5.2.1 Typen oksidit	34
5.2.2 Happi	36
5.2.3 Hiilidioksidi	36
5.2.4 Hiilimonoksidi	37
5.2.5 Hiilivedyt	37
5.3 Polttoaineenkulutus ja hyötysuhde	38

6	SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN OHJELMOINTI	40
6.1	Ohjaavat suureet	40
6.1.1	Pyörintänopeus	40
6.1.2	Kuormitus	40
6.1.3	Seossuhde	40
6.2	Säätöstrategiat	40
6.3	Koeajot valitulla säätöohjelmalla	41
6.3.1	Säätöohjelma	41
6.3.2	Mittaukset	42
6.4	Vakionopeussäätimen integrointi	44
7	KOEAJOT LAIHASEOSKATALYSAATTORILLA	46
8	YHTEENVETO	45
	LÄHDELUETTELO	48
	LIITTEET 1 - 6	

1 JOHDANTO

Maakaasukäyttöisillä yhdistetyillä lämmön- ja sähköntuotantolaitoksilla (CHP-laitoksilla) lienee tulevaisuudessa tärkeä asema hajautetussa sähköntuotannossa kokoluokassa 0,1 - 10 MW_e. Pelkällä maakaasulla toimivilla moottoreilla on mahdollista saavuttaa lähes sama sähköntuotannon hyötysuhde kuin dieselmootoreilla merkittävästi pienemmillä päästöillä. Maakaasu on erittäin hyvä ottomoottoripolttoaine. Oktaaniluku on korkea, maakaasumoottorista ei tule näkyvää savutusta tai rikkidioksidipäästöjä, partikkelipäästöt ovat hyvin pieniä ja pakokaasujen HC-, CO- ja NO_x-päästöt voidaan pitää pieninä katalysaattori- tai laihaseostekniikalla.

Moottoreissa käytettävät palamisjärjestelmät ovat neljää eri tyyppiä riippuen kokoluokasta ja käyttötarkoituksesta. Ajoneuvomoottoreissa ja pienehköissä aggregaateissa käytetään yleisesti stoikiometristä seosta ja kolmitoimikatalysaattoria. Raskaissa ajoneuvomoottoreissa ja aggregaateissa (sylinterihalkaisija alle 200 mm) käytetään myös laihaseostekniikkaa avoimella palotilalla. Halkaisijaltaan suuremmissa (150 - 300 mm) moottoreissa tulee usein kysymykseen esikammio ja lean-burn-tekniikka. Tätä suuremmissa moottoreissa voidaan soveltaa myös kallista ja monimutkaista korkeapaineaasutekniikkaa dieselsytytysruiskutuksella.

Erittäin matalaan päästötasoon päästään stoikiometrisellä seossuhteella, takaisinkytketyllä polttoainejärjestelmällä ja kolmitoimikatalysaattorilla. Rajoituksena on matala tehollinen keskipaine (lämpökuorma/nakutus) ja dieseliä sekä muita palamisjärjestelmiä alempi hyötysuhde. Lisäksi pakokaasupäästöjen pienuus on vahvasti sidoksissa seoksensäätöjärjestelmän toimivuuteen.

Laihaseosmoottorin etuja ovat pieni lämpökuorma ja optimaalisesti toimivissa versioissa korkea terminen hyötysuhde. Osakuormilla hyötysuhteen nostoon on kiinnitettävä huomiota. Ahtaminen on yleensä välttämätöntä, jotta moottorista saatava teho pysyisi riittävän korkeana. Kriittinen NO_x-päästö voidaan laskea matalalle tasolle laihentamalla seosta riittävästi, mutta rajoittavana tekijänä on moottorin stabiilisuus: vaihtelut seoksen syttymisessä ja palamisessa ovat sallittuja vain vähäisessä määrin. Laihaseostekniikalla toimiviin maakaasumoottoreihin panostetaan nykyisin voimakkaasti eri puolilla maailmaa.

Laihaseosmoottoreissa ei toistaiseksi ole enemmälti käytetty takaisinkytkettyä seoksensäätöä riittävän matalan päästötason ja tasaisen toiminnan varmistamiseksi. Tässä tutkimuksessa perehdytään tarkemmin avoimella palotilalla varustetun laihaseosmoottorin takaisinkytketyn seoksensäätöjärjestelmän ohjausmahdollisuuksiin.

2 TAVOITTEET JA TOTEUTUS

Projektin tavoitteena oli kehittää takaisinkytketty seoksensäätöjärjestelmä laihaseoskaasumoottoreita varten. Varustamalla moottori takaisinkytketyllä polttoainejärjestelmällä moottori saadaan toimimaan optimaalisesti kaikissa toimintapisteissä. Täten ulkoisten seikkojen muuttuminen (lämpötilat, kaasun paine, kaasun koostumuksen hetkelliset vaikutukset, komponenttien likaantuminen ja kuluminen) eivät pääse vaikuttamaan moottorin toimintaan. Optimointityössä huomioon otettavia seikkoja ovat pakokaasupäästöt (erityisesti typen oksidit), polttoainekulutus, teho/tehollinen keskipaine, moottorin lämpökuorma ja pakokaasujen lämpötila sekä mahdollisesti käytettävän hapettavan katalysaattorin toiminta. Projektin tuloksena ei vielä syntynyt lopullista kaupallista tuotetta. Tavoitteena oli demonstroida kaasumoottorin ohjausmahdollisuudet yleisellä tasolla.

Tutkimuksen ensimmäinen vaihe oli kirjallisuustutkimus, jolla selvitettiin laihaseosmoottoreiden tekninen taso, erityisesti saavutettavissa oleva päästötaso sekä edellytykset tietyn päästötason saavuttamiseksi.

Kokeellisen osan perustana on VTT Energian usean vuoden kokemus stoikiometrisellä seossuhteella toimivista kaasumoottoreista. Suurin osa työstä on tehty Valmet-moottoreilla. Kaasunsyötönohjausjärjestelmän kehittäminen toteutettiin myös tässä työssä nopeakäyntisellä Valmet 634G -kaasumoottorilla, jonka iskutilavuus on 7,4 litraa ja puristussuhde 10:1. Työhön kuului moottorin toiminnan optimointi, suoritusarvojen määrittäminen seossuhteen funktiona sekä takaisinkytkentään soveltuvien signaalien määrittäminen.

Takaisinkytketty seoksensäätöjärjestelmä kehitettiin siten, että ohjaussignaalina voidaan käyttää mitä tahansa jännite- tai virtaviestiä. Seossuhdesäätö toteutettiin pulssisuhdesäätönä ja magneettiventtiilin välityksellä ohjattavana, suureena kaasun syöttöpaine. Moottorin kuormituksen tunnistukseen käytettiin valinnaisesti imusarjapainetta tai moottorijarrun momenttisygnalia simuloimaan generaattorin kuormaa. Säätöjärjestelmään voidaan ohjelmoida seossuhteen tavoitearvot eri kuormituspisteissä. Järjestelmällä voidaan tarvittaessa ohjata myös sytytysennakkoa. Takaisinkytkentäjärjestelmän lisäksi tutkittiin myös hapettavan katalysaattorin vaikutusta pakokaasupäästöihin.

Takaisinkytkettyä säätöjärjestelmää kehitetään ja demonstroidaan aluksi moottoridynamometrissä. Säätöjärjestelmää voidaan myös koekäyttää aggregaattiasennuksen yhteydessä.

3 KIRJALLISUUSKATSAUS

3.1 YLEISTÄ

Kirjallisuusselvityksessä keskityttiin nopeakäyntisiin, laihaseostekniikalla toimiviin maakaasumootoreihin, jotka on pääsääntöisesti tarkoitettu ajoneuvokäyttöön. Laihaseosmoottorin suoritusarvoja verrataan tapausittain vastaavaan lambda 1 -kaasumootoriin tai dieselmootoriin. Kaasumootorit muunnetaan usein kipinäsytytteiksi ottomootoreiksi dieselmootoreista. Muunnoksissa tarvittavat laitteet rajattiin kirjallisuusselvityksen ulkopuolelle, ja teknisiä yksityiskohtia käsitellään vain siltä osin, kuin ne vaikuttavat laihaseosmoottorin toiminnan optimointiin.

3.2 MAAKAASUN (METAANIN) POLTTOAINEOMINAISUUKSIA

Maakaasu on Suomessa lähes puhdasta metaania, jonka oktaaniluku on erittäin korkea: modifioidulla ASTM-menetelmällä mitattuna tutkimusoktaaniluku (RON) on 133 ja moottorioktaaniluku (MON) 130. Korkea oktaaniluku merkitsee hyvää puristuskestävyyttä, joka voidaan hyödyntää moottorin korkeana puristussuhteena.

Stoikiometrisen maakaasu-ilmaseoksen energiatiheys on alempi kuin bensiini-ilmaseoksen, mutta korkeampi kuin dieselpolttoaineella käytännössä toimittavilla ilma-polttoainesuhteilla. (taulukko 1). Tämä merkitsee moottorista saatavan tehon jäämistä pienemmäksi kuin vastaavalla bensiinimoottorilla, mutta korkeammaksi kuin ahtamattomalla dieselmootorilla. Maakaasumootorit korvaavat yleensä dieselmootoreita, joten vertailukohtana on luonnollista käyttää myös dieselmootoria. Maakaasu laihaseosmoottorissa tarkoittaa noin 1,5:n ilmakerrointa. Silloin seoksen energiatiheys laskee jo selvästi dieselmootorin arvoja alemmaksi. Käytännössä laihaseosmoottorin ahtaminen on ehdoton edellytys hyväksyttävän tehotason saavuttamiseksi.

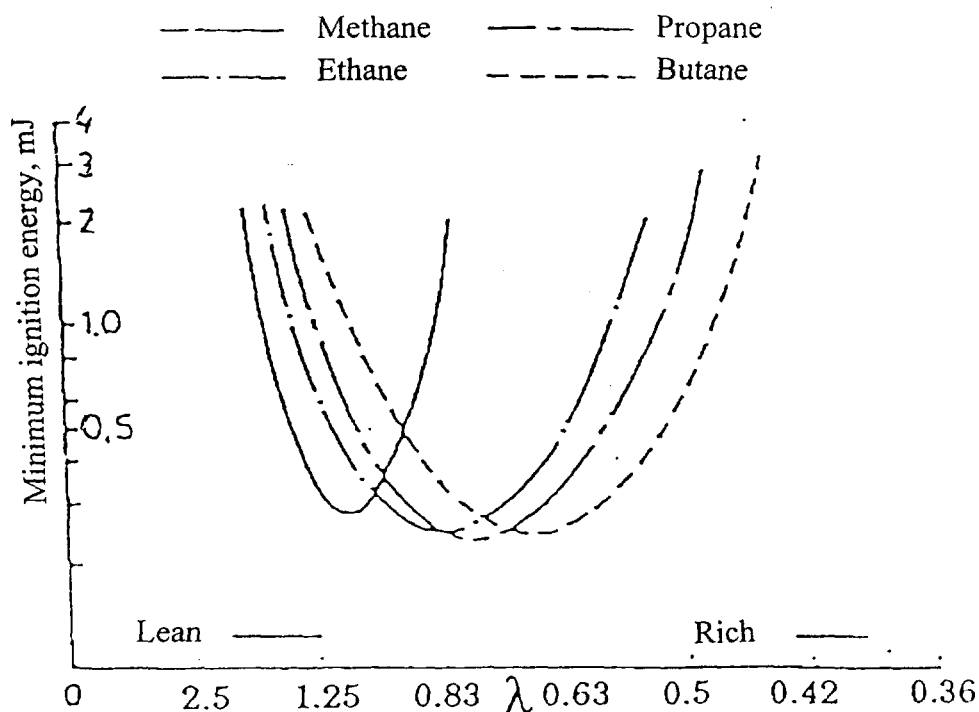
Taulukko 1. Ilmakertoimet sekä stoikiometrisen seoksen energiatheydet eri polttoaineilla [1].

	Stoikiometrisen seos			Suhteellinen energiatiheys
	Ilmakerroin	Tiheys, kg/m ³	Energiatiheys, MJ/m ³	
Vety	34	0,94	3,21	0,84
Metaani	17,2	1,24	3,40	0,89
Propaani	15,6	1,32	3,68	0,96
Metanoli	6,4	1,49	3,98	1,04
Etanoli	9	1,44	3,85	1,01
Bensiini	14,7	1,38	3,83	1,00
Diesel	14,5	1,38	3,79	0,99
Diesel (lambda = 1,3)	18,9	1,36	2,92	0,76

Taulukko 2. Pakokaasujen koostumus eri polttoaineilla stoikiometrisellä seoksella ideaalitapauksessa [1].

	CO ₂ , %	H ₂ O, %	N ₂ , %
Vety	0	35	65
Hiili	21	0	79
Metaani	9,5	19	71,5
Etaani	11	16,5	72,5
Propaani	11,6	15,5	72,9
Butaani	12	15	73
Dieselpolttoaine	13,4	12,6	74
Metanoli	11,6	23,1	65,3
Etanoli	12,3	18,4	69,3

Metaanin vety-hiilisuhde on korkea, ja hiilidioksidin (CO₂) muodostuminen on siis suhteellisen vähäistä (taulukko 2). Moottorissa polttoaineenkulutus (hyötysuhde) vaikuttaa luonnollisesti suhteelliseen CO₂-päästöön. Maakaasun hyvä ominaisuus on myös laaja syttymisalue laihan seoksen puolella. Toisaalta palamisnopeus on hidas, noin 10 % hitaampi kuin nestekaasulla. Maakaasulla, kuten muillakin moottori-kaasuilla, on korkea syttymisenergia, mutta maakaasulla minimikohta on muista polttoaineista poiketen hieman laihan seoksen puolella (kuva 1). Maakaasulla toimivassa laihaseosmoottorissa tarvitaan voimakas kipinä, ja erityisesti laihalla seoksella syttymisen olisi oltava varmaa, jotta palaminen lähtisi nopeasti käyntiin ja moottori toimisi vakaasti.



Kuva 1. Eri kaasuilla tarvittava syttymisenergia seossuhteen funktiona[2].

3.3 LAIHASEOSMOOTTORIN TOIMINTAPERIAATE JA -EDEL- LYTYKSET

3.3.1 Yleistä

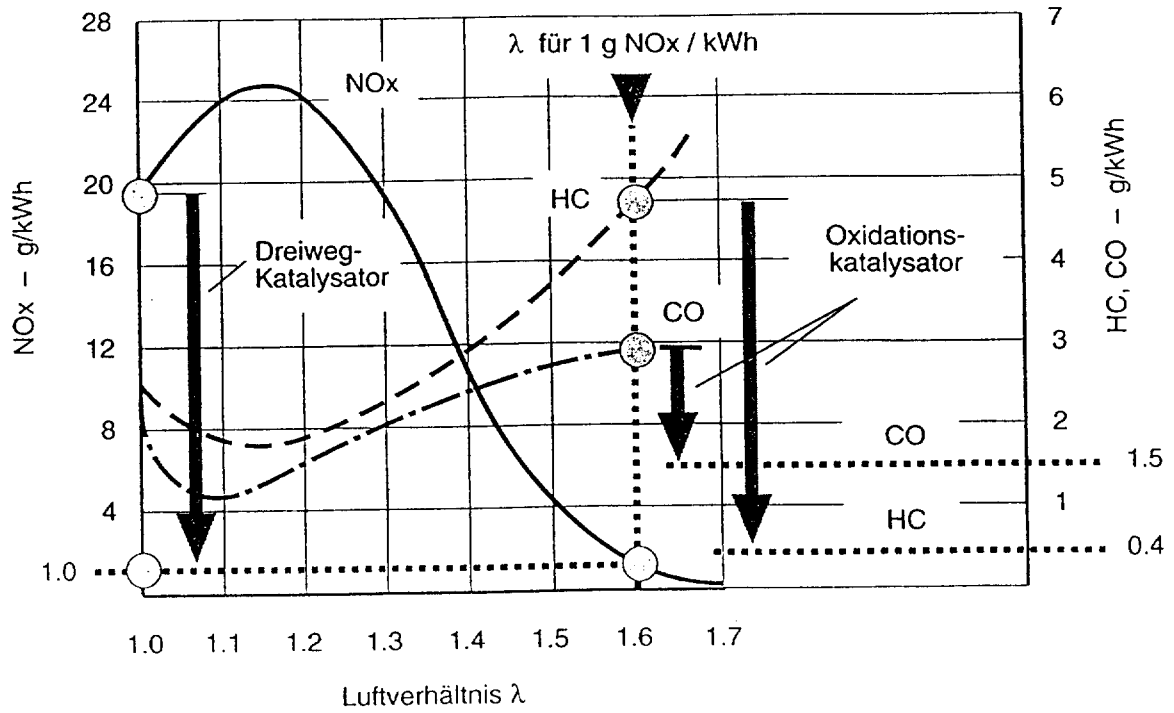
Laihaseosmoottorin idea on siinä, että pakokaasupäästöt saadaan matalalle tasolle ja moottorin terminen hyötysuhde kasvaa. Laiha seos merkitsee myös matalaa pakokaasujen lämpötilaa (palamislämpötilaa) eli pientä termistä rasitusta. Yleensä laihaseosmoottorit on suunniteltu korvaamaan dieselmoottoreita ja on useimmiten jopa muunneltu dieselmoottoreista. Dieselmoottorien käyttöikä on pitkä, ja samaa vaaditaan myös niitä korvaavilta kaasumoottoreilta. Dieselmoottorista muunnetun kaasumoottorin mekaaninen rasitustaso laskee, mutta terminen rasitus on seossuhteen funktio. Stoikiometrisellä seoksella rasitus on selvästi korkeampi kuin dieselmoottorilla, mikä merkitsee materiaaliongelmiä ja mahdollisesti lyhentyneitä käyttöikää. Riittävän laihalla seoksella myös terminen rasitus jää dieselmoottoriin verrattavalle tasolle.

Laihaseosmoottorin toimintaan ja pakokaasupäästöihin voimakkaasti vaikuttavia tekijöitä ovat seossuhteen lisäksi mm. sytytysennakko, palotilassa vallitsevat olosuhteet syttymishetkellä, joihin taas vaikuttavat mm. palotilan muoto, seoksen säätöjärjestelmän toimivuus ja sytytysjärjestelmän tehokkuus. NO_x -päästön rajoittamista tasolle 1 - 5,5 g/kWh on pidetty eri kehitysprojekteissa tavoitteena, ja siihen pääsy on käytännössä merkinnyt seossuhdetta 1,5 - 1,7. Häiriötön vakaa palaminen esimerkiksi ilmakertoimella 1,7 vaatii jo moottorin pitkälle menevää optimointia. Kahden sytytystulpan käyttö on yksi yksityiskohta, jolla laihaseosrajaa voidaan siirtää hieman laihaan suuntaan.

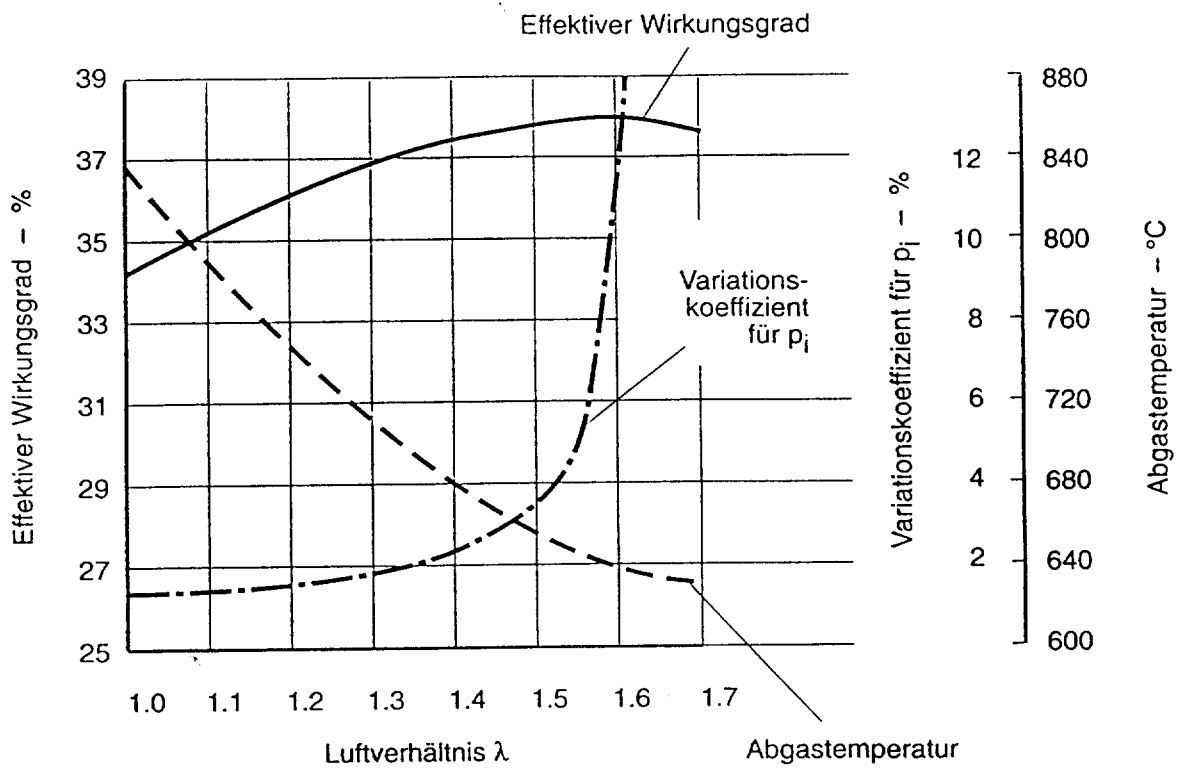
3.3.2 Seossuhde

Laihaseosmoottorissa pakokaasujen NO_x -päästö saadaan matalalle tasolle ilman jälkikäsitteilyä. HC- ja CO-päästön alentamiseen käytetään tarvittaessa hapettavaa katalyysaattoria (kuva 2). Seossuhteen kasvaessa palamislämpötila laskee voimakkaasti, mikä näkyy sekä NO_x -päästön että myös pakokaasujen lämpötilan laskuna. NO_x -päästön sanotaan karkeasti puolittuvan palamisen huippulämpötilan laskiessa 100 °C:lla [3]. Jäähdytysnesteeseen siirtyvän lämmön määrä laskee ja moottorin hyötysuhde kasvaa (kuva 3). Stoikiometrisellä seossuhteella toimivaan moottoriin verrattuna on mahdollista saavuttaa 10 %:n säästö polttoaineen ominaiskulutuksessa. Seoksen laihentamisessa on rajoittavana tekijänä hiilivetypäästöjen kasvu palamisen muuttuessa osittain epätäydelliseksi ja vielä tärkeämpänä tekijänä moottorin käynnin muuttuminen epävakaaksi seoksen syttymis- ja palamishäiriöiden vuoksi. 5 %:n vaihtelukerrointa (kuva 3) pidetään maksimina ajoneuvokäytössä, voimalaitosmoottoreissa vaadittava raja on tiukempi. Epävakaa palaminen merkitsee ajoneuvossa huonoa ajettavuutta, kohonneita HC-päästöjä ja hyötysuhteen alenemistä.

Mazda [4] on kehittänyt laihaseoskatalyysaattorin, joka vähentää kaikkien pakokaasukomponenttien pitoisuuksia nykyisten päästörajoitusten kannalta riittävästi. Tehokas laihaseoskatalyysaattori antaisi lisää vapauksia moottorin toimintapisteen suhteen.



Kuva 2. Ilmakertoimen vaikutus kipinäsytytteisen kaasumoottorin päästöihin [5].



Kuva 3. Ilmakertoimen vaikutus termiseen hyötysuhteeseen, pakokaasujen lämpötilaan ja palamisen stabiilisuuteen [5].

3.3.3 Palotila

Maakaasun palamisnopeus on pieni, ja lisäksi laihaseosmoottorin seos ei maakaasullakaan välttämättä ole täysin homogeeninen. Siksi voimakasta turbulenssia pidetään laihaseosmoottorille välttämättömänä. Sylinterissä tyypillisissä lämpötiloissa palamisreaktioihin kuluva aika on huomattavasti lyhyempi kuin reagoivien yhdisteiden toistensa läheisyyteen saattamiseen kuluva aika, eli reaktionopeus on suurempi kuin kuljetusnopeus. Edullisinta on muotoilla palotila siten, että puristusahdin aikana syntyy voimakas turbulenssi erityisesti sytytystulpan läheisyyteen, jolloin palaminen lähtee nopeasti liikkeelle [5]. Stabiilisuuden kannalta on tärkeää hyvä syttyminen ja nopea palaminen, jolloin vaihtelut tehollisessa keskipaineessa eri sykleissä jäävät pieniksi.

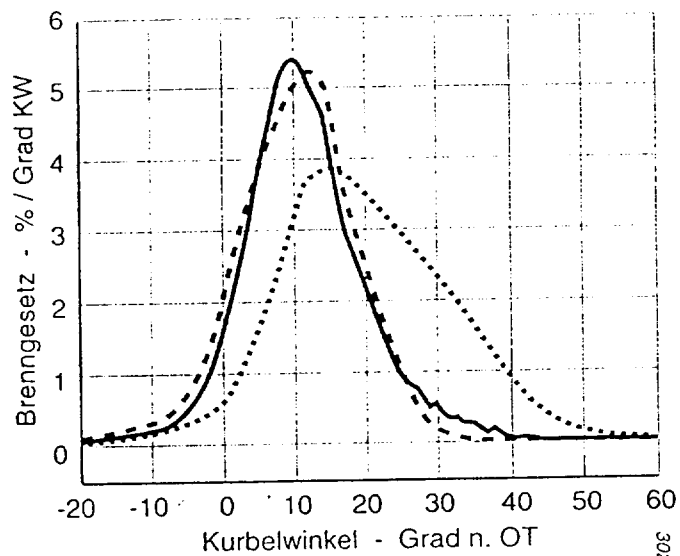
Palotilan muoto sekä syttymis- ja palamisolosuhteet vaikuttavat ratkaisevasti laihaseosrajaan. Eräässä tutkimuksessa konventionaalisella palotilalla saatiin laihaseosrajaksi noin 1,55, mutta optimoidulla palotilalla palamista saatiin nopeutetuksi, niin että laihaseosraja kohosi noin 1,7:ään. Palamisen nopeutuminen tuo lämmön vapautumisen hyvin lähelle stoikiometrisen moottorin arvoja (kuva 4).

Kuvassa 5 on esimerkki laihaseosmoottorin palotilasta. Lähteissä [5] ja [7] kerrotaan palotilavaihtoehdoista ja toiminnan kannalta tärkeistä nopeus- ja turbulenssijakaumista. Jakaumat on osoitettu värien avulla, mustavalkoisesta kopiosta informaatio jää vähäiseksi. Olennaista on jo edellä mainittu voimakas turbulenssi sytytystulpan läheisyydessä syttymisen ja palamisen aikana ja toisaalta myös seoksen pieni keskimääräinen nopeus. Kuvassa 6 esitetään konventionaalisen ja optimoidun palotilan lasketut nopeus- ja turbulenssiarvot kammukulman funktiona sytytystulpan kohdalla.

Pyörteisyyden ja turbulenssin aikaansaaminen ensisijaisesti palotilan muotoilulla kaasumoottoreissa on tärkeää, koska esimerkiksi imukanavan muotoilu lisää imuvastusta. Laihaseosmoottorissa riittävän tehon tuottaminen on tietty ongelma, joka ratkaistaan ahtamisella. Silti ylimääräiset virtausvastukset hankaloittavat ratkaisua. Kaasunsekoittimien aiheuttamaa painehäviötäkin on pyritty vähentämään konstruktiomuutoksilla [8].

3.3.4 Kerrospoltto

Laihaseosmoottoreissa seoksen syttymistä voidaan parantaa ns. kerrospoltolla, jolloin sytytystulpan lähistölle tuodaan rikkaampi seos kuin palotilaan keskimäärin. Ricardo E6 -moottorilla on tutkittu laihaseosmoottorin suorituskykyä perusversiona ja modifioituna versiona, jossa sytytystulpan läpi on johdettu pieni määrä metaania sytytystulpan elektrodien lähelle [8]. Laihaseosraja muuttui selvästi verrattuna homogeeniseen seokseen, hyötysuhde parani myös, mutta palamattoman hiilivedyn määrä yleensä kohosi. Syynä kohoamiseen pidettiin sytytystulpan läheisen rikkaan seoksen palamista epätäydellisesti lähellä rikkaan seoksen palamisrajaa.

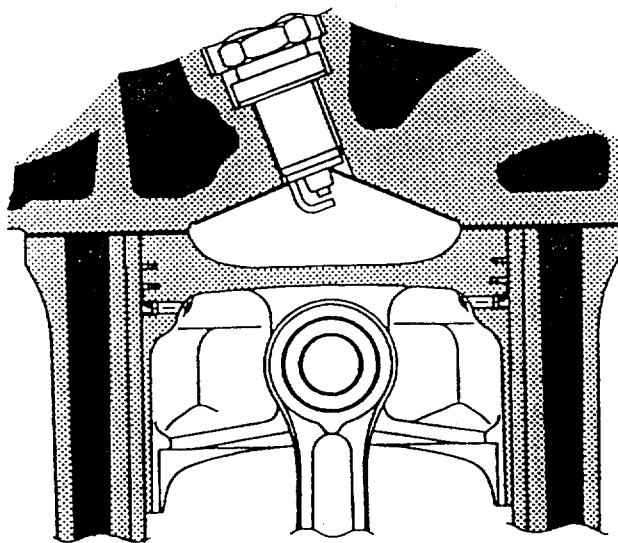


Verbrennungsverfahren

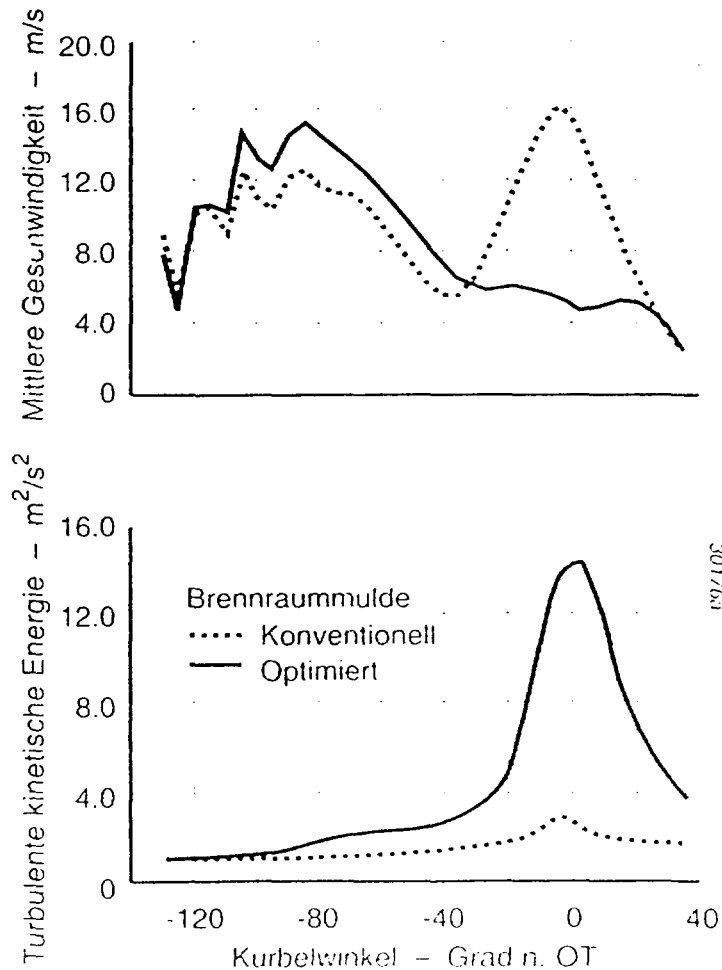
- Otto-Gasmotor mit konventioneller Brennraummulde ($\lambda = 1.55$)
- Otto-Gasmotor mit optimierter Brennraummulde ($\lambda = 1.6$)
- - - Otto-Benzinmotor mit konventioneller Brennraummulde ($\lambda = 1.0$)

30259a

Kuva 4. Lämmön vapautuminen eri kaasumoottoriversioissa 75 %:n kuormalla pyörimisnopeuden ollessa 90 % moottorin maksimiarvosta [5].



Kuva 5. Esimerkki laihaseosmoottorin palotilasta. [6].



Kuva 6. Laskettu keskimääräinen virtausnopeus ja turbulenssin kineettinen energia sytytystulpan elektrodien kohdalla kahdessa palotilassa[5].

Esikammioratkaisu on yksi kerrospolton sovellus. Volkswagenilla on esikammioon perustuva laihaseosmoottori (taulukko 3), samoin ainakin Niigatalla [10]. Niigatan ratkaisussa esikammiossa sytytetään lähes stoikiometrinen seos ja liekki sytyttää sitten varsinaisen palotilan laihan seoksen. Keskimääräinen ilmakerroin on jopa yli 2, maksimihiötysuhde 38 % ja NO_x -pitoisuus pakokaasuissa 200 ppm:n tasolla (kuva 7). Niigatan moottorin sylinterihalkaisija on 260 mm ja teho 6-sylinterisenä versiona 900 kW (1 000 rpm).

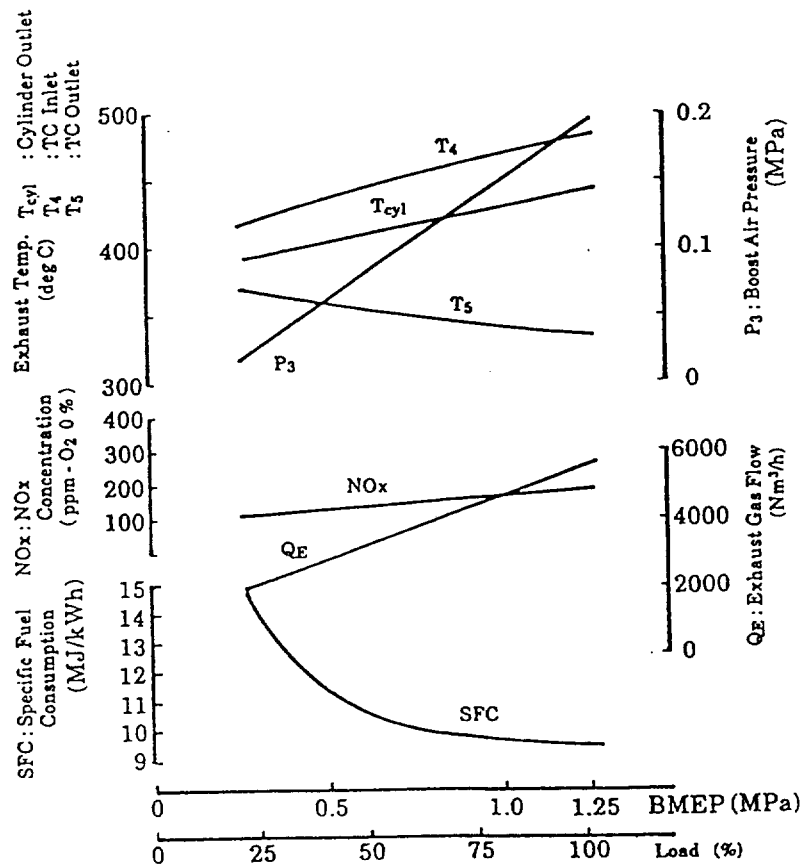
3.3.5 Sytytysennakko ja imuilman lämpötila

Seossuhteen ohella sytytysennakko vaikuttaa voimakkaasti moottorin NO_x -päästöön [11]. Laihaseosmoottorissa tarvitaan suuri sytytysennakko hitaan palamisen takia, mutta yleensä ennakon vähentäminen vähentää myös pakokaasupäästöjä (kuva 8). Poikkeuksena on HC-päästön kohoaminen sytytysennakon pienessä erittäin laihoilla seoksilla (kuva 8). Oikea sytytysennakko on siis optimointikysymys, jossa on otettava huomioon pakokaasupäästöt ja moottorin suorituskyky.

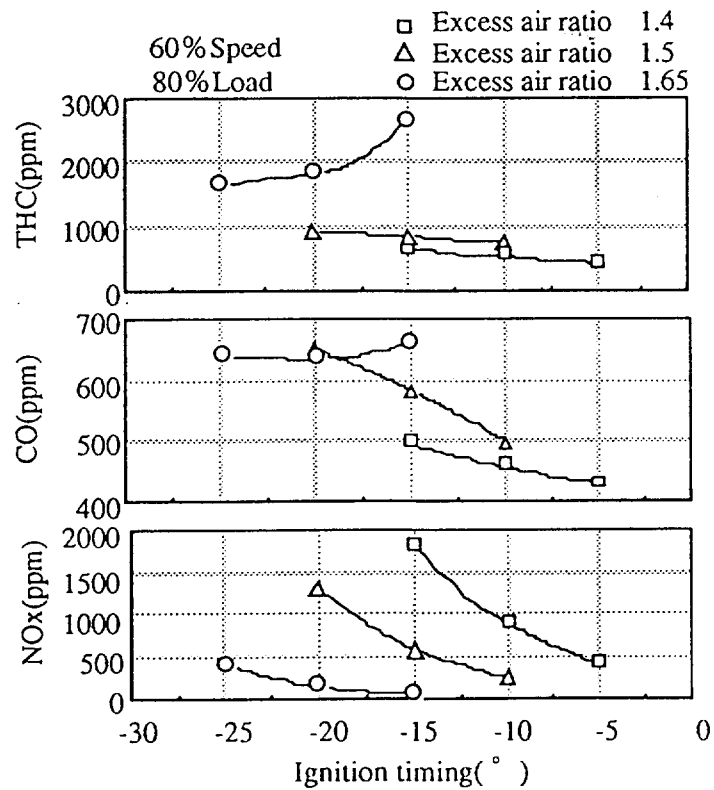
Imuilman lämpötila vaikuttaa myös pakokaasupäästöihin. Tässäkin on etsittävä optimi HC- ja NO_x-päästöjen suhteen (kuva 9). NO_x-päästöjen kannalta imuilman välijäähdytys on välttämätöntä, mutta jossakin pisteessä jäähdyttäminen alkaa lisätä HC-päästöä. Toisaalta imuilman lämpötila saa kasvaa, ja NO_x-päästön pysyy silti vakiona, jos seosta vastaavasti laihennetaan [12].

Taulukko 3. Kerrospolttoprosesseja [9].

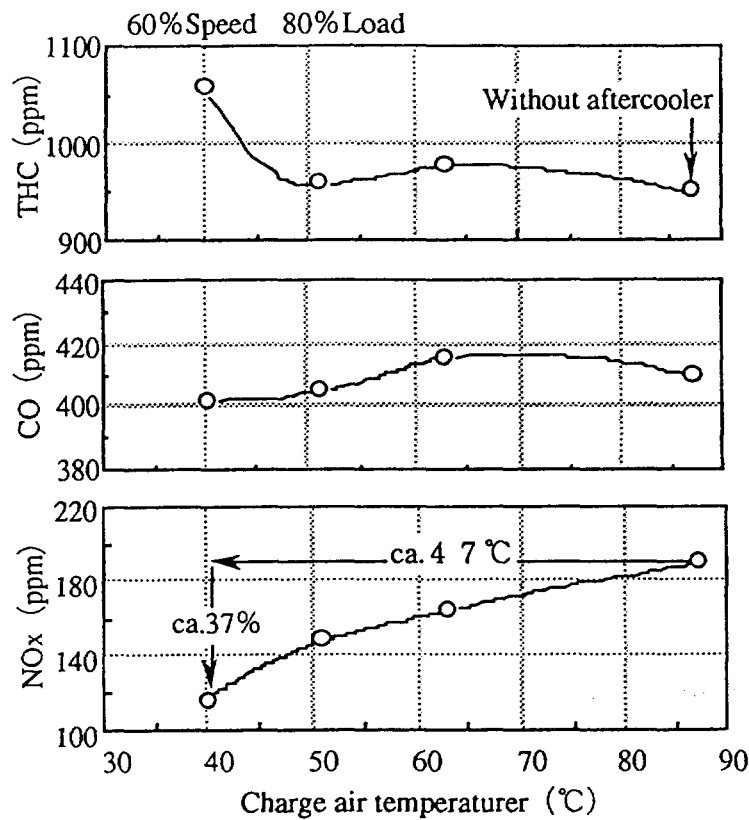
Research organization and process	Fuelling and combustion system	Operational characteristics
<i>Ford</i> Programmed combustion process (PROCO)	Low-pressure direct injection. Open chamber enhanced swirl. Twin spark plugs	EGR and oxidation catalyst required
<i>Honda</i> Compound vortex controlled combustion (CVCC)	Carburation into divided combustion chamber	Low fuel consumption. Good emission control. Developed into production engine for cars (CVCC 2)
<i>MAN</i> FM system	Open chamber high swirl direct injection technique employing surface evaporation	Modified spark plug. Exhaust catalyst. Multi-fuel capability includes methanol and ethanol
<i>Mitsubishi</i> Mitsubishi combustion process (MCP)	Open chamber. Fuel injection with variable retraction delivery valve	Multi-fuel capability including kerosene. Production engine for agricultural machines
<i>Texaco</i> Texaco controlled combustion system (TCCS)	High-pressure direct injection. High swirl, late ignition. Included turbocharged version	EGR and oxidation catalyst. Multi-fuel capability. Peak power limited by smoke emissions
<i>Volkswagen</i> Prechamber injection system (PCI)	Variable fuel supply injected to spherical precombustion chamber	Thermal reactor to reduce CO and HC emissions
<i>Curtiss-Wright</i> <i>John Deere</i>	Open chamber rotary engine	Multi-fuel capability including natural gas
<i>Orbital</i> Orbital combustion process (OCP)	Two-stroke engine. Low-pressure air-assisted direct injection	Low emissions using EGR and oxidation catalyst. Low fuel consumption



Kuva 7. Niigatan ultra-lean-kaasumoottorin suorituskykykäyrät [10].



Kuva 8. Maakaasumoottorin pakokaasupäästöt seossuhteen ja sytytysennakon funktiona moottorin toimiessa 60 %:n nopeudella ja 80 %:n kuormalla [11].



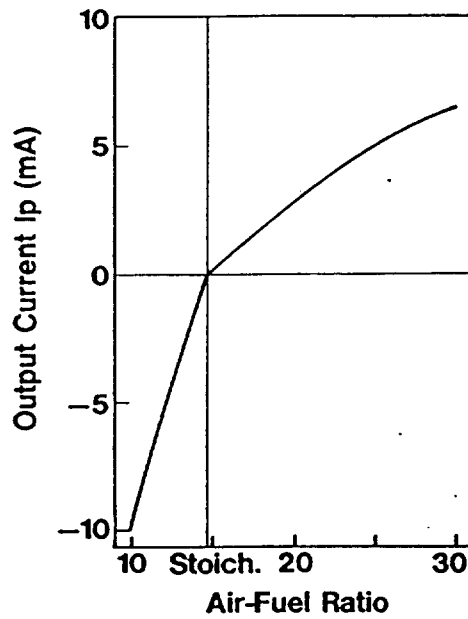
Kuva 9. Moottorin imuilman lämpötilan vaikutus pakokaasupäästöihin [11].

3.3.6 Säätojärjestelmä

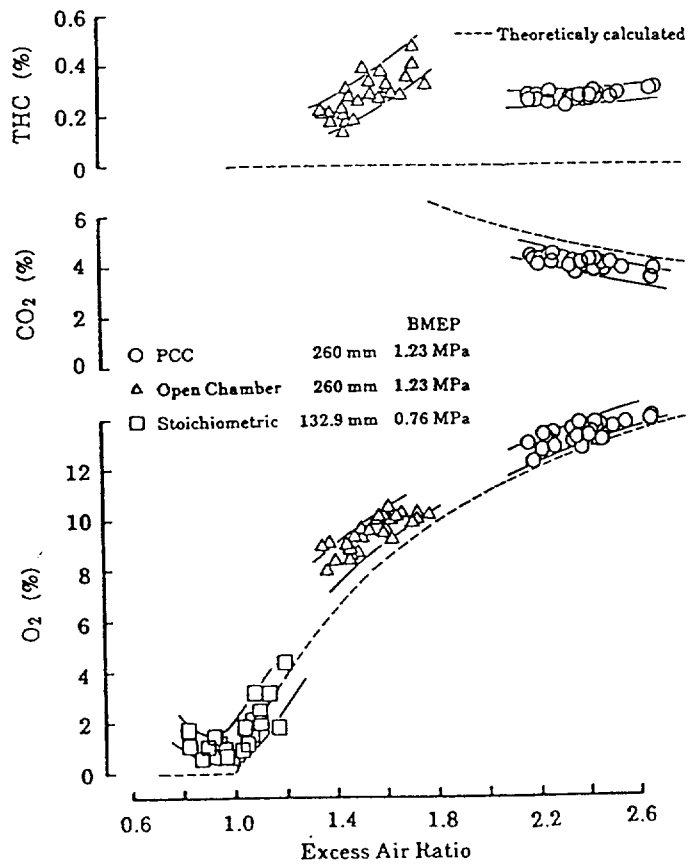
Laihaseosmoottorin säätöön käytetään pääasiassa erilaisia happiantureita ja bensiini-moottoreissa myös palamisen stabiilisuutta tarkkailevia painanturijärjestelmiä. Ohjaus ja säätöjärjestelmän tarkkuusvaatimukset sanelevat pitkälle anturivaihtoehtot. Yleisesti säätötarkkuuden kohotessa myös säätöjärjestelmän hinta nousee. Esimerkiksi hapen ja typen oksidien määrän mittaaminen pakokaasuista antaisi jo tarkan kuvan moottorin toiminnasta.

Happianturi

Laihaseosanturina käytetään yleisesti ZrO_2 -anturia, joka vertaa seosta stoikiometriseen seokseen. Anturista tulee ulos varsin lineaarinen virtaviesti (kuva 10). Happianturi soveltuu kohtuullisen hyvin moottorin ohjaukseen, kun tavoitteena on seossuhteen pitäminen tietyllä tasolla. Jonkin verran mittavirhettä aiheuttaa se tosiseikka, että palaminen ei ole aivan täydellistä, vaan pieni osa teoreettisesti täydelliseen palamiseen tarvittavasta hapesta jää reagoimatta (kuva 11). Pääasiassa em. syystä pakokaasuista mitattu happipitoisuus ei kerro tarkasti hapen määrää palotilassa. Perinteisen happianturin käyttöikä on myös kritisoitu. Koska tarkkuus huononee käytön myötä, seurauksena on käynnin stabiilisuusongelmia [13].



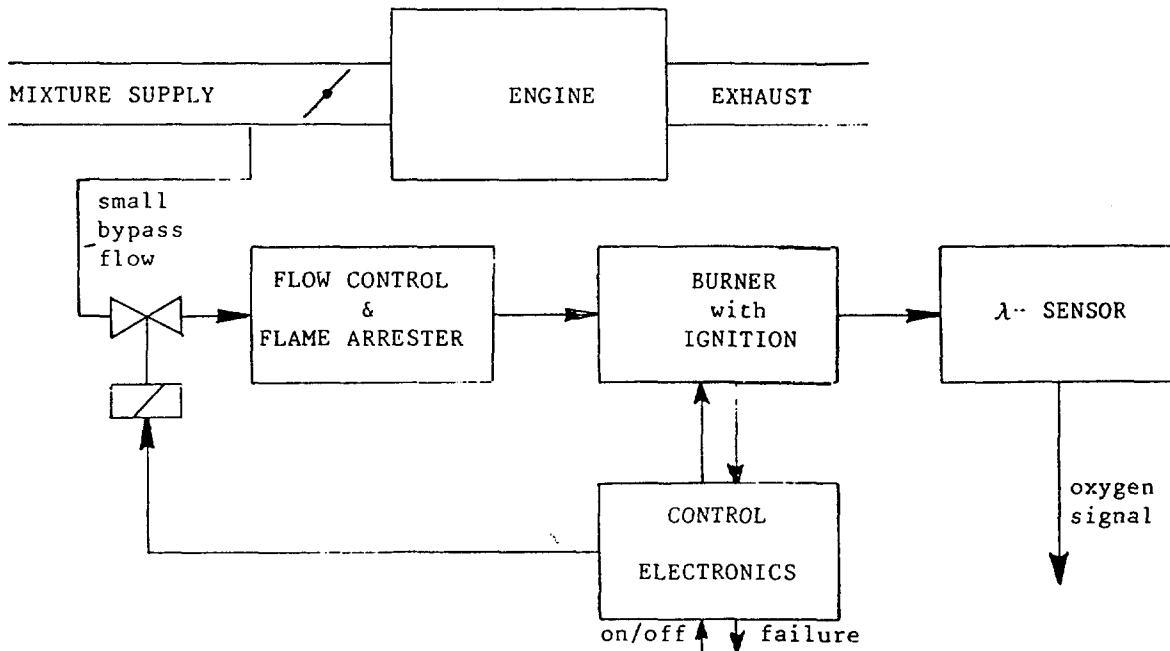
Kuva 10. Seossuhdetta mittaavan happianturin ominaiskäyrä [6].



Kuva 11. Hapen, hiilidioksidin sekä hiilivedyn teoreettiset määrät ja mitatut arvot pakokaasuissa seossuhteen funktiona [9].

Sylinteriin tulevasta seoksesta seossuhteen mittaava anturi

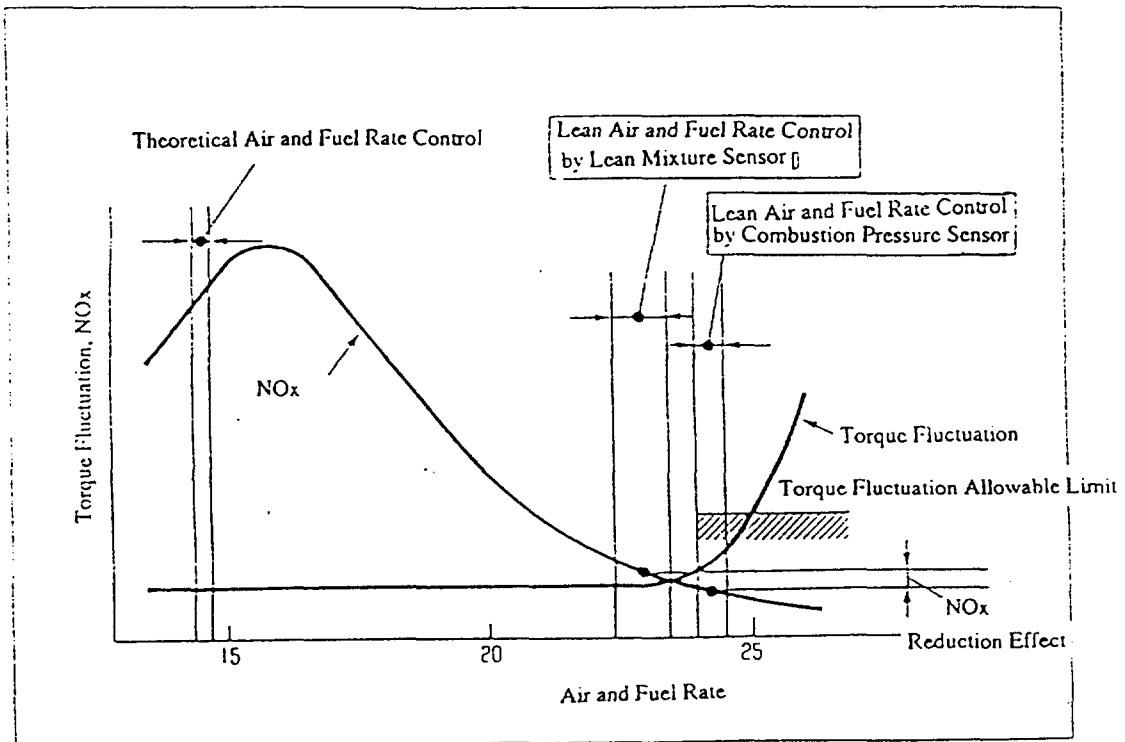
Anturi ottaa pienen sivuvirran moottorin imukanavasta ja polttaa sen täydellisesti (kuva 12). Seossuhde mitataan jäännöshapesta erittäin tarkasti. Imukanavasta otettu näyte on vapaa mm. voiteluöljyn palamisjäänteistä, jotka voisivat pitkän ajan kuluessa häiritä anturin toimintaa. Siten sen käyttöikä on pitkä. Stationäärimoottoreissa on tavanomaisissa lambda-antureissa havaittu jo 500 tunnin ajon jälkeen herkkyysmuutoksia, jotka eivät ole hyväksyttävissä. Sylinteriin tulevan seoksen sivuvirtaan perustuvalla anturilla on tehty yli 4 000 tunnin pitkäaikaiskokeet hyvällä menestyksellä. Anturin toiminta pysyi vakaana kokeen ajan.



Kuva 12. Moottoriin menevän seoksen sivuvirrasta seossuhteen mittaavan anturin toimintaperiaate [13].

Paineanturiin perustuva säätöjärjestelmä

Perinteisesti laihaseosmoottoreita on ohjattu happiantureilla, jotka pyrkivät pitämään polttoaine-ilmasuhteen alueella 1:22 - 23. Uusissa moottoreissa Toyota käyttää palamispaineantureita laihaseosantureiden sijaan [14]. Uusi järjestelmä mahdollistaa stabiilin palamisen lähellä palamisrajaa (1:24) ja alentaa edelleen pakokaasupäästöjä sekä parantaa polttoainetaloutta. Paineanturi on kiinnitetty ensimmäiseen sylinteriin. Se mittaa palamisprosessia neljässä pisteessä (kammenkulma-arvolla), laskee vääntömomenttikäyriä ja lisää polttoaineensyöttöä momentin vaihdellessa liian paljon ja vähentää syöttöä momentin ollessa vakaa. (kuva 13). Järjestelmä on suunniteltu bensiinimoottoreihin, mutta samaa periaatetta voidaan käyttää myös kaasumoottoreissa.



Kuva 13. Seossuhteen ohjaukseen käytettävien järjestelmien vertailu [14].

Polttoaineen ja imuilman massavirran mittaukseen perustuva järjestelmä

Impeco on kehittänyt seoksensäätöjärjestelmän, joka koostuu imuilman massavirtamittarista, polttoaineen massavirtamittarista, lambda-anturista ja elektronisesta yksiköstä. Järjestelmän kannalta ratkaisevan tärkeä polttoaineen massavirtamittari perustuu kuumalanka-anemometritekniikkaan.

Elektroninen ohjausyksikkö laskee mittaustuloksista seossuhteen, vertaa sitä kyseisen toimintapisteen tavoitearvoon, joka on ohjelmoitu yksikköön, ja säättää tarvittaessa polttoainevirtaa [15]. Joutokäynnillä seossuhteen tavoitearvo on 1. Takaisinkytkentä on hoidettu lambda-anturilla, jonka toiminta taas varmistetaan joutokäynnillä seossuhteella $\lambda = 1$.

3.4 ESIMERKKEJÄ LAIHASEOSMOOTTOREISTA

Maakaasukäyttöisiä laihaseosmoottoreita on esitelty eri julkaisuissa varsinkin 1990-luvulla. Seuraavat esimerkit perustuvat yhtä poikkeusta lukuun ottamatta (Cummins 10L) Toronton kansainvälisessä konferenssissa lokakuussa 1994 esiteltyihin moottoreihin. Tämän kirjallisuustutkimuksen lähdeluettelon julkaisuissa esitellään eräitä muitakin laihaseosmoottoreita.

Vuonna 1991 tehdyn selvityksen [16] mukaan maailmassa oli käytössä noin 600 maakaasukäyttöistä raskasta ajoneuvoa. Selvityksessä ei eritellä ajoneuvoja laihaseos- ja stoikiometrisiin versioihin. Maakaasun käyttö edellyttää normaalisti ahtamista (teho), ja ahdettu moottori on termisten rasitusten vähentämiseksi edullista suunnitella laihalla seoksella toimivaksi.

3.4.1 Cumminsin L10-240G- ja B5.9G-maakaasumoottorit

Cummins on esitellyt kaksi laihaseosmaakaasumoottoria, ensin L10-dieselmoottorista kehitetyn kaasumoottorin, jonka teho oli 179 kW (2 100 rpm), ja sittemmin vastaavasti pienemmästä dieselmoottorista kehitetyn 147 kW (2800 rpm) -kaasumoottorin. 10 litran moottori on varustettu Impecon polttoainejärjestelmällä. Raskaille ajoneuvoille tarkoitetussa FTP transient -testissä saavutettiin seuraavat päästöarvot seossuhteella 1,6 [17]:

NO _x	1,5 g/kWh
THC	2,2 g/kWh.

Kokonaishiilivetyjen (THC) raja kaupunkiliikenteen linja-autoille (EPA/1994) on 1,7 g/kWh.

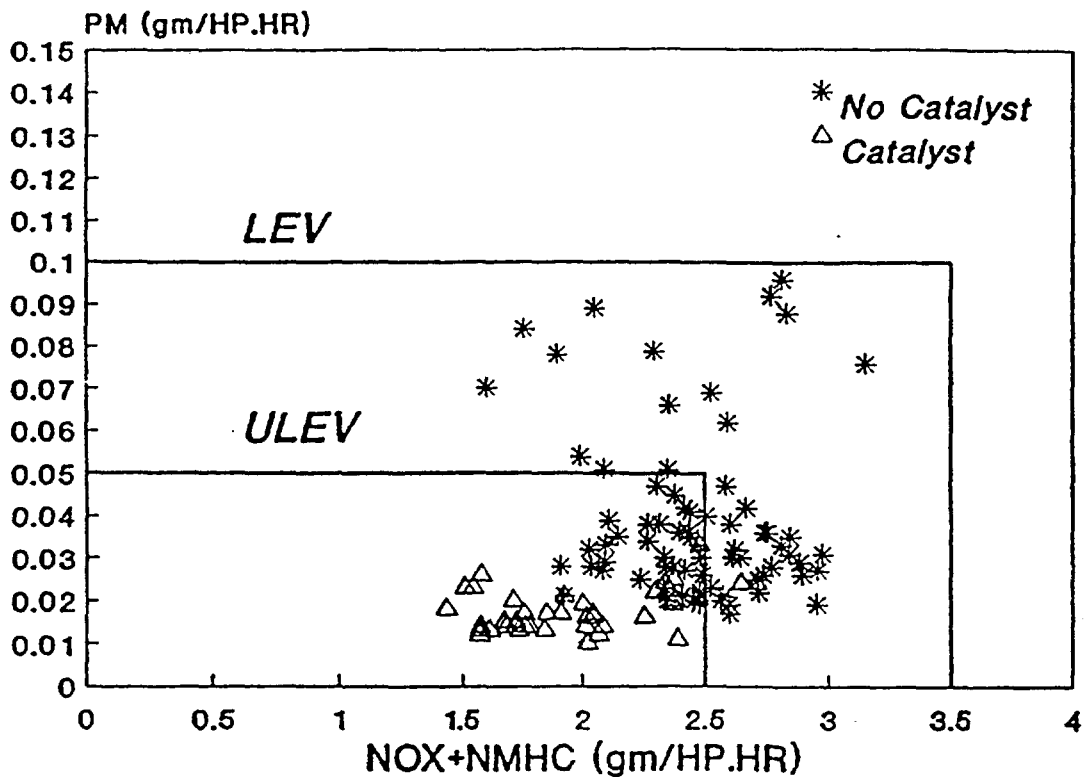
Uudemmassa ja pienemmässä Cummins-moottorissa on takaisinkytketty laihaseosjärjestelmä ja kyseiselle moottorille räätälöity elektroniikka. Useita moottoreita on ajoneuvoissa kenttäolosuhteissa, massatuotanto on aloitettu joulukuussa 1994 [18].

B5.9-moottori on 6-sylinterinen, iskutilavuudeltaan 5,9 litran rivimoottori. Sytytystulpat ovat lähes samoilla paikoilla kuin ruiskutusruiskutimet dieselversiossa. Elektroninen sytytysjärjestelmä ilman virranjaotinta kontrolloi sytytysennakkoa. Polttoainemäärää kontrolloidaan elektronisesti toimintapisteen mukaan. Lämpö sijaitsee välijäähdyttimen jälkeen ja sillä säädetään moottorin tehoa. Turbo on varustettu hukkaportilla ja ahtopainetta kontrolloidaan elektronisesti. Moottorin toimintoja kontrolloiva elektroniikkayksikkö on kehitetty Cumminsin dieselmoottoreissaan käyttämästä yksiköstä.

Maksimihyötysuhteeksi on mitattu 36,7 %. Hapettavalla katalysaattorilla varustetuna moottori alittaa Kalifornian Ultra Low Emission Vehicle (ULEV) -päästörajat (kuva 14). ULEV-raja on määritetty NO_x- ja NMHC-summana (NMHC = hiilivedyt - metaani) ja raja on 3,35 g/kWh. Vastaava Low Emission Vehicle (LEV) -raja on 4,7 g/kWh. Edellä mainittu luokittelu otetaan käyttöön 1998.

3.4.2 JARI-laihaseosmoottori

6-sylinterisen, 11,7-litraisen moottorin puristussuhde on 14:1 ja moottori on varustettu hapettavalla katalysaattorilla. Stoikiometrisellä seoksella toimivasta moottorista kehitettyyn laihaseosmoottoriin tehtiin vain pieniä muutoksia, puristus-suhteen kohottamisen lisäksi ylintä männänrengasta nostettiin ylöspäin ja polttoainejärjestelmä sekä imusarja optimoitiin laihaseosmoottorille sopivaksi [19].



Kuva 14. FTP menetelmän mukaisten päästömittausten tuloksia B5.9G-moottorilla [18].

Ahtamattomalla moottorilla saavutettiin paras hyötysuhde ilmakertoimella 1,5 - 1,7 kuormituksesta ja pyörintänopeudesta riippuen. Hyötysuhde oli korkeimmillaan noin 34 %. Varsinkin matalilla kuormilla hyötysuhde jäi selvästi alemmaksi kuin vastaavilla dieselmoottoreilla.

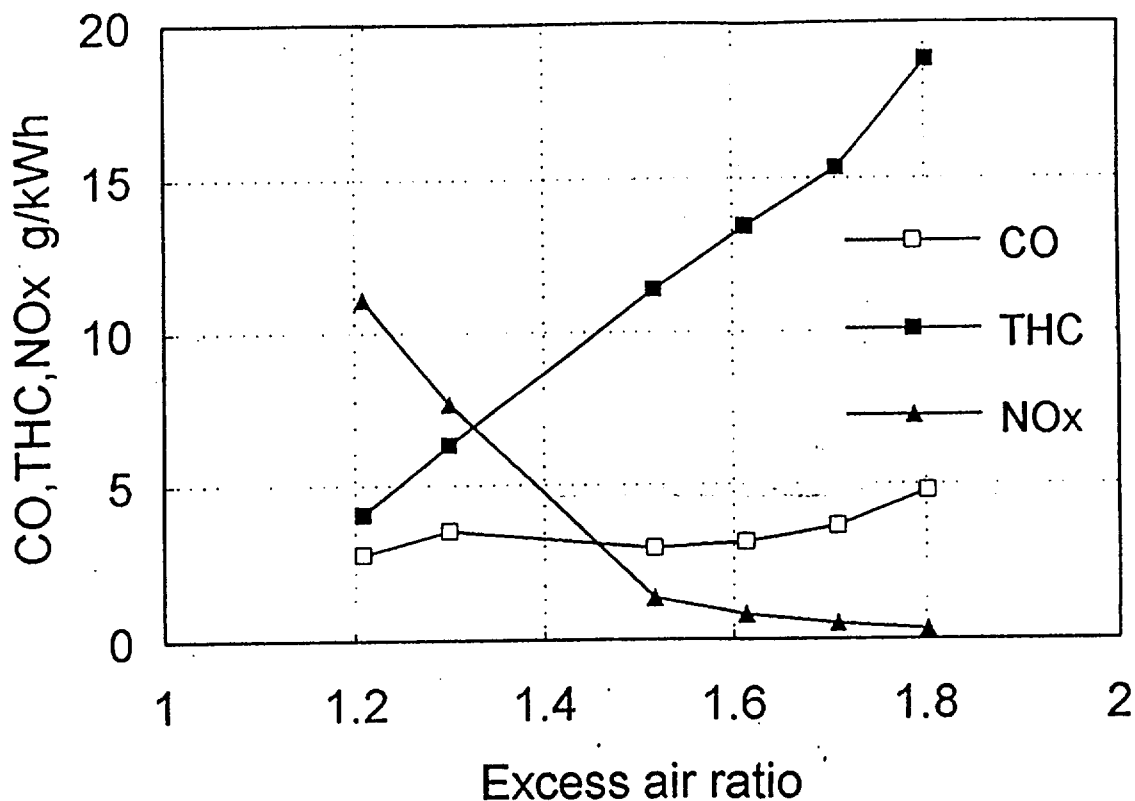
Pakokaasupäästöt japanilaisessa 13-syklisessä kokeessa olivat:

NO _x	1 g/kWh
HC	3 g/kWh.

Kuvassa 15 esitetään moottorin pakokaasupäästöt ilmakertoimen funktiona vakio-momentilla ja -pyörintänopeudella.

3.4.3 Nissanin maakaasumoottori

Ahdetun välijäähdytetyn linja-autommoottorin [20] iskutilavuus on 12,5 l, teho 173 kW/2 100 rpm ja maksimi vääntömomentti 834 Nm/13 00 rpm. Moottorin puristussuhde on 11:1. Ilmakertoimen säätö tapahtuu takaisinkytketyllä lambda-sensorilla. Palotilan muoto on ns. "Texas Dog Fish", matalaturbulenttinen palotila. Kaasumoottori on kehitetty vapaasti hengittävästä dieselmoottorista. Kaasumoottoriversion yhtenä tavoitteena on säilyttää dieselmoottorin tehotaso. Pakokaasupäästöjen suhteen tähdättiin japanilaisten rajoitusten alittamiseen ilman katalysaattoria.



Kuva 15. Seossuhteen vaikutus laihaseosmoottorin ennen katalysaattoria mitattuihin pakokaasupäästöihin toimintapisteessä 900 rpm/300 Nm [19].

Ahdettuna kaasumoottorilla päästiin tavoitteena olleeseen dieselmoottorin suorituskykytasoon. Tokiossa tehdyssä kenttäkokeessa ajettavuutta, melutasoa sekä polttoaineenkulutusta pidettiin hyvänä. Japanilaisessa 13-vaiheisessa pakokaasukokeessa saavutettiin seuraavat tulokset:

NO _x	2,22 g/kWh
CO	4 g/kWh
THC	4.43 g/kWh.

Kaikki tulokset ovat selvästi pienempiä kuin raskaille bensiinikäyttöisille ajoneuvoille määritellyt raja-arvot.

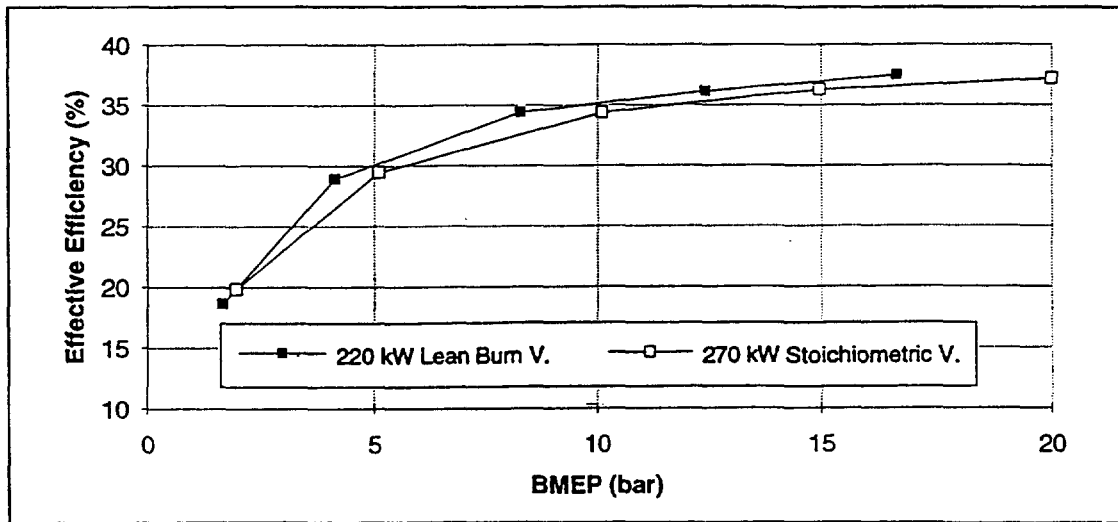
3.4.4 TNO-kaasumoottori

TNO-moottori [20] on 6-sylinterinen, 9,5 litran, ahdettu, välijäähdytetty laihaseosmoottori, jonka puristussuhde on 10.3:1. Polttoainejärjestelmä perustuu Deltec 100 -laitteisiin. Perustana on IVECO-dieselmoottori, josta kehitettiin sekä stoikiometrisen versio että laihaseosversio. Kummankin version hyötysuhdekäyrät ovat kuvassa 16. Hyötysuhde oli korkeimmillaan noin 37 %.

Laihaseosversiolla saavutettiin 220 kW:n ja stoikiometrisellä moottorilla 270 kW:n teho. Laihaseosmoottorin päästöt ECE R 49 -testissä olivat:

NO_x 1,5 g/kWh
CO 2,3 g/kWh
HC 4,4 g/kWh.

Saavutettua NO_x-päästöä pidettiin suunnittelukriteerinä ja rajan saavuttamiseksi sytytysennakko pidettiin pienenä. Akselitehoa kohti laskettu polttoaineenkulutus oli 10,39 MJ/kWh.



Kuva 16. TNO-moottorien hyötysuhdekäyrät maksimimomentin pyörintänopeudella [21].

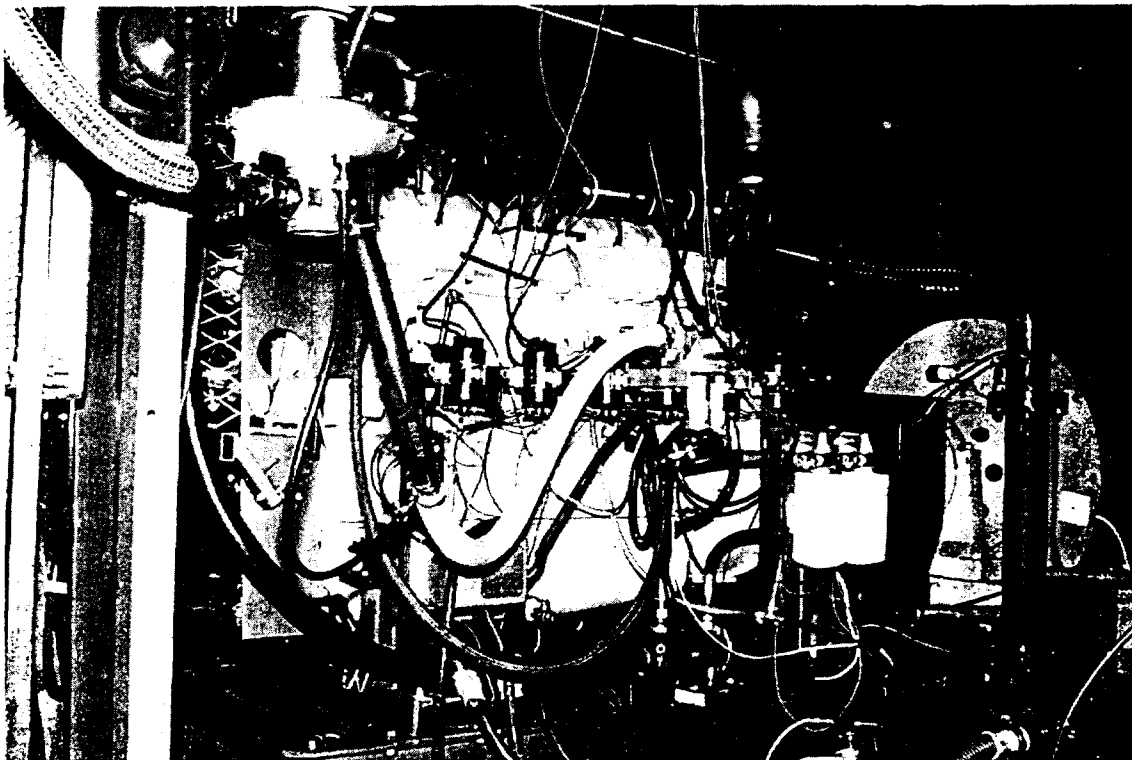
4 MOOTTORIASENNUS

4.1 KOEJÄRJESTELY

4.1.1 Moottori

Kokeissa käytettiin Sisu Diesel Oy:n kipinäsytytteistä kuusisylinteristä Valmet 634G -kaasumoottoria. Moottorin iskutilavuus on 7,4 l ja suurin akseliteho noin 100 kW/1 500 1/min ilmakertoimella 1,5. Moottorityyppi on kehitetty VTT:ssa kaasumoottoriksi dieselmoottorista korvaamalla ruiskutusjärjestelmä sytytys- ja kaasujärjestelmillä sekä alentamalla puristussuhde kaasukäytölle sopivaksi mäntien paltiloja muotoilemalla. Koemoottoria oli ennen laihaseoskokeita käytetty stoikiometrisen ahtamattoman nestekaasuajoneuvomoottorin optimointityössä. Laihaseoskokeita varten moottori varustettiin pakokaasuahtimella ja ilma-ilma-ilmavälijähdytyksellä. Moottorin puristussuhde (10:1) voisi maakaasulaihaseoskokeita ajatellen olla jonkin verran korkeampi. Käyttämällä korkeampaa ahtopainetta voidaan tilanne kuitenkin osittain korjata. Hyötysuhdetta alemmilla osakuormilla voitaisiin jonkin verran nostaa korottamalla puristussuhdetta. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksen kannalta asialla ei juuri ole merkitystä.

Moottori on asennettu moottoridynamometriin, jossa sitä voidaan kuormittaa portaattomasti joko vakiopyörintänopeus- tai vääntömomenttisäätöisenä. Kuvassa 17 esitetään moottorin asennus dynamometriin.



Kuva 17. Koemoottoriasennus.

4.1.2 Sytytysjärjestelmä

Maakaasu vaatii syttyäkseen suuremman syttymisenergian kuin esimerkiksi bensiini ja nestekaasu (propaani). Lisäksi laihaseoskäytössä liikutaan hyvin lähellä seoksen syttymisrajaa, mikä edelleen nostaa syttymisenergian tarvetta. Tästä syystä moottori varustettiin kapasitiivisellä suurtehositytytysjärjestelmällä (Motor-tech IQ250). Järjestelmässä on sylinterikohtaiset sytytyspuolat. Pyörintänopeus- ja kammenkulmatieto saadaan vauhtipyörän käynnistinhammaskehältä magneettipulssianturin välityksellä. Oikea sytytysjärjestyksen liipaisupulssi välitetään puolella moottorin pyörintänopeudella pyörivältä kiekolta (4-tahtimoottori) referenssipulssianturin avulla. Pyörintänopeudesta riippuva sytytysennakkokäyrä voidaan asettaa kahden potentiometrin avulla. Sytytysennakkoa voidaan ohjata myös ulkoisen jännitesignaalin avulla esimerkiksi kuormituksesta riippuvasti.

4.1.3 Kaasunsyöttöjärjestelmä

Kaasu syötetään moottoriin mekaanisen kaasunsekoittimen ja kaksiportaisen kaasunpaineenalennuksen välityksellä. Ensimmäisessä portaassa koetilan kaasulinjapaine, noin 3,5 bar, säädetään painesäätimellä (Krom-Schröder VGBF 25 R40) noin 15 mbariin. Toisessa portaassa (Krom-Schröder GI 25 R02) kaasunpaine säädetään kaasunsekoittajan (Impco 200) ilmanavassa vallitsevaan tai vähän suurempaan paineeseen (0 - 3 mbar). Molempien säätimien balanssilinjat on yhdistetty sekoittajan ilmanavaan, jotta kaasunpaine seuraisi moottorin syötettävän ilman painetta (turbo-ahdin).

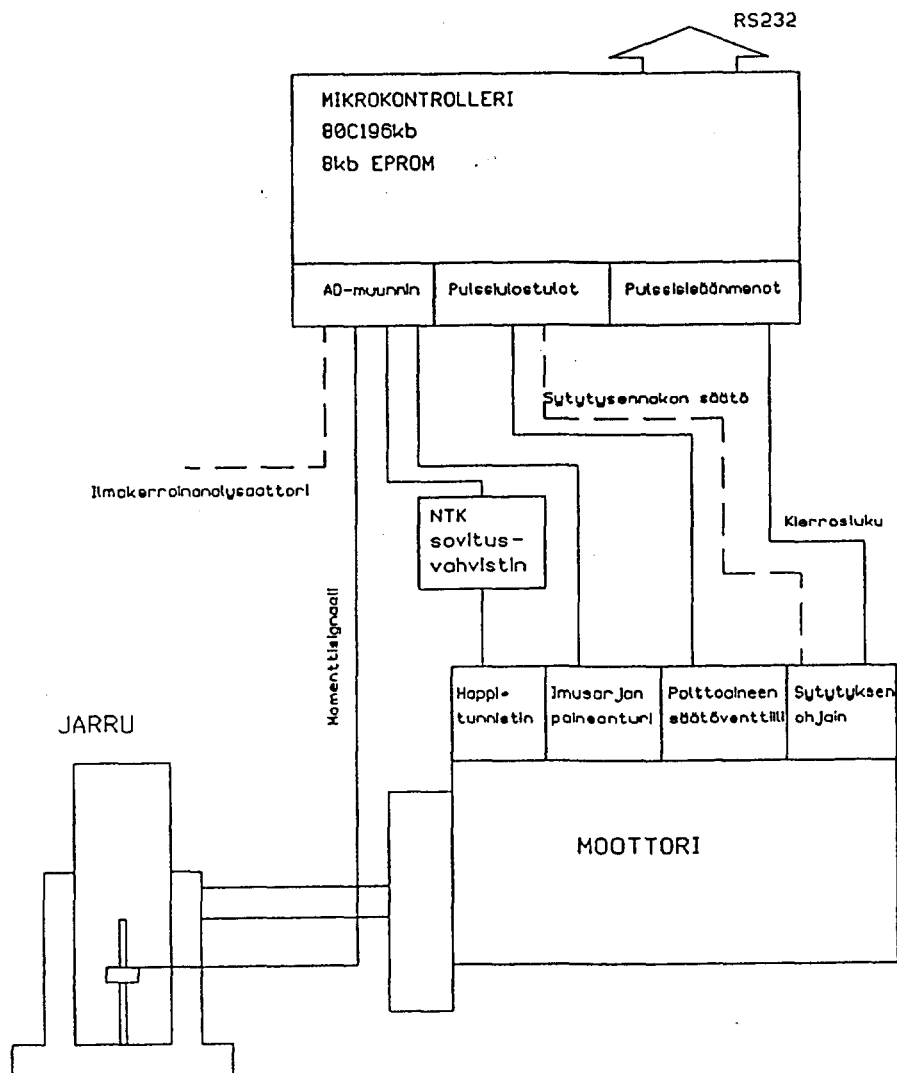
4.1.4 Takaisinkytketty seoksensäätöjärjestelmä

Takaisinkytketty seoksensäätöjärjestelmä on VTT:n ja Teknillisen korkeakoulun (TKK) yhteistyötä siten, että TKK vastaa säätimen elektroniikka- ja ohjelmointipuolesta VTT:n määrittämien reunaehtojen pohjalta.

Takaisinkytketty seoksensäätö tapahtuu toisen portaan painesäätimen balanssilinjaan sijoitetun sähköisen tahtiventtiilin avulla. Tahtiventtiili on 10 Hz:n taajuudella värähtelevä magneettiventtiili, jonka auki-kiinniolosuhdetta (pulssisuhdetta) muutetaan. Kaasujärjestelmän perussäätö on jonkin verran haluttua rikkaampi (venttiili kiinni, eli pulssisuhde = 0 %). Pulssisuhteen kasvaessa seossuhde laihenee, kun venttiili päästää toisen portaan painesäätimen balanssitilaan kaasunsekoittajan "alipaine"-liitännästä normaalibalanssilinjapainetta matalampaa painetta. Täten kaasunsekoittajaan tulevaa kaasunpainetta ja -määrää voidaan säätää halutun seossuhteen saamiseksi.

Takaisinkytketty seoksensäätöjärjestelmä voi käyttää takaisinkytkentäsignaalina mitä tahansa jännite- tai virtaviestiä. Ohjaavina suureina voivat siten olla esimerkiksi pakokaasujen happi-, hiilidioksidi- tai typenoksidipitoisuudet. Säätöjärjestelmän kehitystyössä takaisinkytkentä signaalina on käytetty kaupallista pakokaasujen happipitoisuutta mittaavaa laihaseosanturia (NTK). Säätöjärjestelmän ohjelmointi vaatii myös tiedon moottorin kuormitusasteesta. Tähän on kokeiltu sekä

imusarjassa vallitsevaa painetta että moottoridynamometrin vääntömomenttisi-
naalia. Järjestelmällä on lisäksi mahdollista ohjata moottorin sytytysennakkoa.
Aggregaattikäyttöä silmällä pitäen myös moottorin vakionopeussäätö voidaan
toteuttaa säätöjärjestelmän puitteissa. Kuvassa 18 on kaaviokuva säätöjärjestelmän
kytkennästä moottorin yhteyteen.



Kuva 18. Takaisinkytketty laihaseos säätöjärjestelmä.

4.1.5 Mittausjärjestely

Moottori on asennettu pyörrevirtadynamometriin (Schenck W450), jota ohjaa oh-
jainlaite (Schenck LSG/LEW 2000). Tiedonkeruu tapahtuu dataloggerilla (HP
3497A) ja PC-pohjaisesta tiedonkeruuohjelmalla, joka rekisteröi noin kolmen se-
kunnin välein moottorin toimintapistetiedot (pyörintänopeuden, vääntömomentin),
lämpötiloja (ilman, veden, öljyn, pakokaasun jne.), imuilmamäärän, imusarjan
paineen, laihaseosanturin signaalin (V), ilmakertoimen (lambda-arvon) ja pako-
kaasujen koostumuksen (CO, HC, No_x, O₂, CO₂).

Ilmakertoimen määrittämiseen käytetään nelikaasuanalysaattoria Cussons P8333 (CO, CO₂, HC ja O₂), joka on varustettu ilmakerroinprosessorilla ja polttoaineen hiili-vetyosuuden valinnalla. Pienen CO-pitoisuuden määrittämiseen käytetään infrapuna-analysaattoria ADC RF 2G. Varsinainen hiilivetymittaus tehdään FID-tyyppisellä J.U.M. VE 7 -merkkisellä analysaattorilla (kalibroitukaasuna propaani). Typen oksidit (NO_x) analysoidaan kemiluminisenssianalysaattorilla Thermo Electron 10 AR.

Moottorin käyttämän palamisilmamäärän mittaamiseen käytetään Cussons-ilmamäärämittaria (P7209/P72028). Kulutettu polttoaine lasketaan ilmamäärän ja ilmakertoimen avulla. Lämpötilat mitataan K-tyypin termoelementeillä.

4.2 ALUSTAVAT KOEAJOT

4.2.1 Perussäädöt ja suoritusarvot

Kaasujärjestelmän asennuksen jälkeen moottorille tehtiin perussäädöt, joilla sitä voitiin ajaa laihalla seoksella (λ 1,3 - 1,6). Kokeet tehtiin aggregaattipyörintänopeudella 1 500 1/min. Niissä kokeiltiin mm. erityyppisiä toisen portaan painesäätimiä ja tahtiventtiilin kytkentöjä balanssilinjaan. Kokeet tehtiin ajamalla tahtiventtiilin pulssisuhdetta potentiometriohjauksella ja seuraamalla seossuhteen muuttumista tiedonkeruusta. Rajoittavia tekijöitä olivat laihaseosraja (syttymisvaikeudet) ja käytettävissä olleen pakokaasuahtimen tuottama ahtopaine (tehoraja). Kyseisin toimenpitein päädyttiin kohdissa 3.1.1 ja 3.1.3 mainittuihin suoritusarvoihin ja säätövalintoihin

Suoritusarvovertailussa stoikiometrisen kaasumoottorin kanssa laihaseosmoottorin yhtenä merkittävänä etuna voidaan pitää selvästi pienempää lämpökuormaa, mikä johtuu yli-ilman palotilaa jäähdyttävästä vaikutuksesta. Koemoottoriin on asennettu sylinterikannen venttiilikannaksen lämpötilaa mittaava anturi. Tuotannossa olevan stoikiometrisen kaasumoottorin nimellisteho on 66 kW, jota mittauksissa vastasi venttiilikannaksen noin 180 °C:n lämpötila. Laihaseosmoottorilla vastaavalla akseliteholla ja ilmakertoimen arvolla 1,5 venttiilikannaksen lämpötila oli noin 160 °C. Laihaseosmoottori (λ 1,5) saavuttaa saman lämpökuorman kuin 66 kW:n stoikiometrisen kaasumoottori hieman alle 110 kW:n akseliteholla, joten laihaseosmoottorin nimellisteho voi olla selvästi korkeampi.

4.2.2 Koeajomatriisi

Säätöjärjestelmässä käytettävien takaisinkytkentäsuureiden määrittämiseksi määriteltiin koeajomatriisi, jonka avulla voitiin nähdä eri muuttujien vaikutus lopputulokseen eli pakokaasupäästöihin ja hyötysuhteen kautta polttoaineenkulutukseen.

Peruskoeajojen pohjalta päädyttiin seuraavaan muuttujamatriisiin, kun pyörintänopeus pidetään vakiona (1 500 1/min):

- tehollinen keskipaine (kuorma): 4, 6, 8, 9, 10 bar (37, 56, 75, 84, 93 kW)

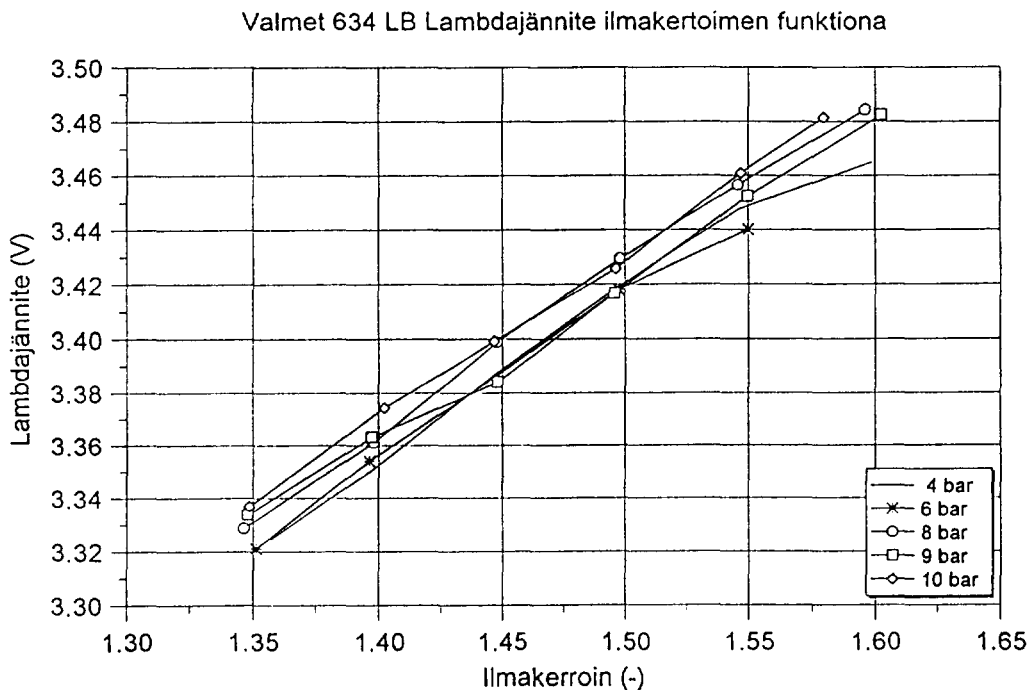
- seossuhde (lambda-arvo): 1,35, 1,40, 1,45, 1,50, 1,55, 1,60
- sytytysennakko: 20, 22, 24, 26, 28 ast.eykk.

Mittausmatriisi käytiin läpi kuormituspistekohtaisesti muuttaen sytytysennakkoa kahden kammikulma-asteen portain (20 - 28 ast. eykk). Lisäksi jokaisessa sytytysennakkoportaassa seossuhdetta muutettiin 0,05:n portain (1,35 - 1,60). Joissakin pisteissä tehtiin mittauksia myös lambda-arvolla 1,65, mutta epävakaan palamisen takia mittauksia ei voitu tehdä kaikissa pisteissä näin laihalla seoksella. Tästä muodostui noin 150 mittauspistettä käsittävä tulosmatriisi, jonka pohjalta säätöjärjestelmään valittiin tiettyjen kriteerien pohjalta sopivat parametrit säätöstrategioita varten.

5 MITTAUKSET

5.1 LAIHASEOSANTURI

Laihaseosanturi tuottaa pakokaasujen happipitoisuudesta riippuvan virtaviestin, joka anturin mukana toimitettavassa sovitussuhteessa muutetaan lineaarisesti jänniteviestiksi. Kuvassa 19 on laihaseosanturin jännitesignaali seossuhteen funktiona eri kuormituksilla sytytysennakolla 24 ast. eykk. Käyristä voidaan havaita pieni riippuvuus kuormituksesta. Osittain hajonta riippuu myös seossuhteen ilmoittavan analysaattorin kalibrointien jälkeisestä ryömimisestä sekä mittausten aikana eri päivinä vallinneiden ulkoisten olosuhteiden eroista. Seossuhteesta riippuva jännite-ero on säätöjärjestelmän takaisinkytkennän kannalta pieni, joten sitä joudutaan säätöjärjestelmässä vahvistamaan. Kuormituksesta johtuvilla eroilla ei ole merkitystä, sillä järjestelmää ohjelmoidaan kuormitusohjatusti, jolloin säädön tavoitearvoa voidaan valita kuormituksen mukaan.

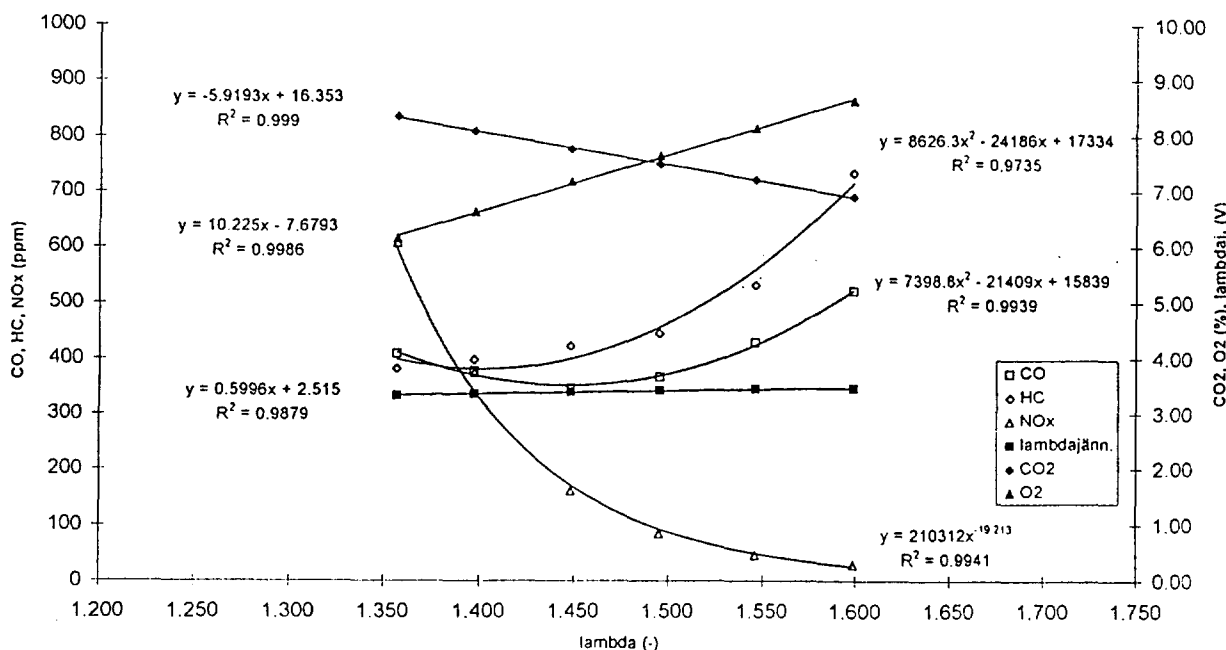


Kuva 19. Laihaseosanturin jännitesignaali ilmakertoimen funktiona.

5.2 PAKOKAASUT

Pakokaasupäästöt laihaseosmoottorista käyttäytyvät seossuhteen funktiona kuvan 20 mukaisesti (osakuormapiste 4 bar tehollista keskipainetta). Kuvassa on mukana myös edellisessä kohdassa käsitelty laihaseosanturin jännite. Säätöjärjestelmän kannalta ohjaavaan takaisinkytkentään voidaan pakokaasupäästöistä kuvan mukaisesti hyödyntää hiilidioksidia, happea ja typenoksideja. Hiilimonoksidi ja hiilivedyt eivät sovellu takaisinkytkentään, koska ne käyttäytyvät epä johdonmukaisesti toivotulla säätöalueella.

Valmet 634 LB Parametrit vs. ilmakerroin 4 bar/24 o



Kuva 20. Laihaseosmoottorin pakokaasupäästöt seossuhteen funktiona (tehollisen keskipaine 4 bar, syt.ennakko 24 ast. eykk.).

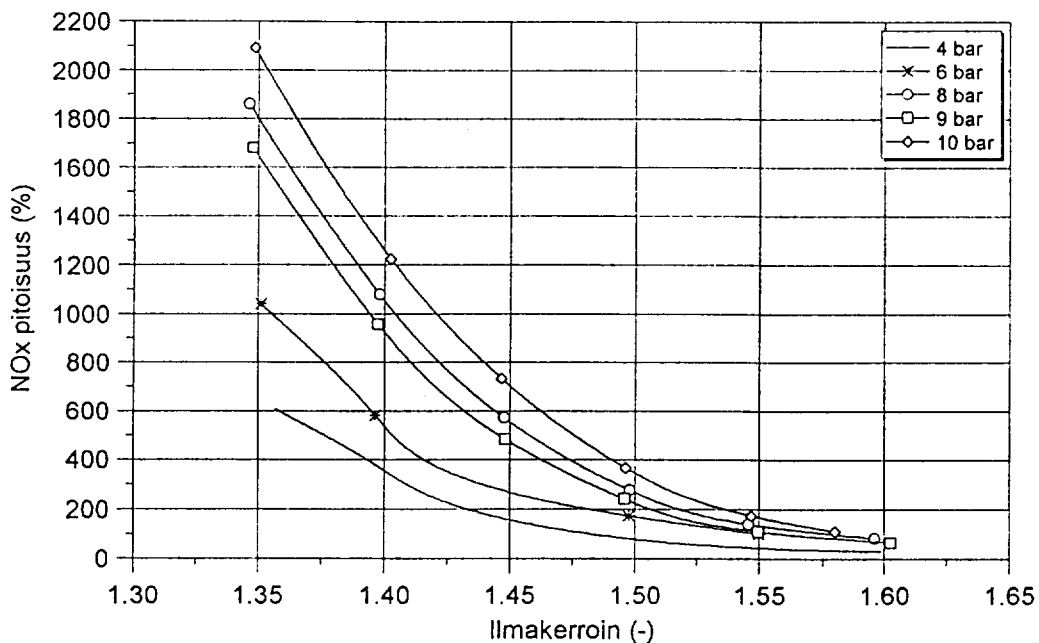
Myös pienimuotoisen voimantuotantoyksikön, kuten kyseisen kaasumoottorin, kohdalla pakokaasupäästöillä on merkittävä ohjaava asema. Tässä asiassa nojaututaan usein saksalaisiin TA-Luft-raja-arvoihin (CO 0,65 g, HC 0,15 g ja NO_x 0,50 g/NM₃ pakokaasujen happipitoisuudella 5 %). Myös tässä työssä käytetään mainittuja raja-arvoja ohjaavina tekijöinä.

5.2.1 Typen oksidit

Typen oksideja (NO_x) syntyy palotilassa korkeassa lämpötilassa. Laihaseostekniikan ensisijainen tehtävä on alentaa nimenomaan typpioksidipäästöjä, mikä aikaansaadaan yli-ilman jäähdyttävän vaikutuksen avulla. Moottorin kuormitus kasvattaa selvästi typen oksidien pitoisuutta, mutta taso ja erot pienenevät selvästi seoksen laihetessa (kuva 21).

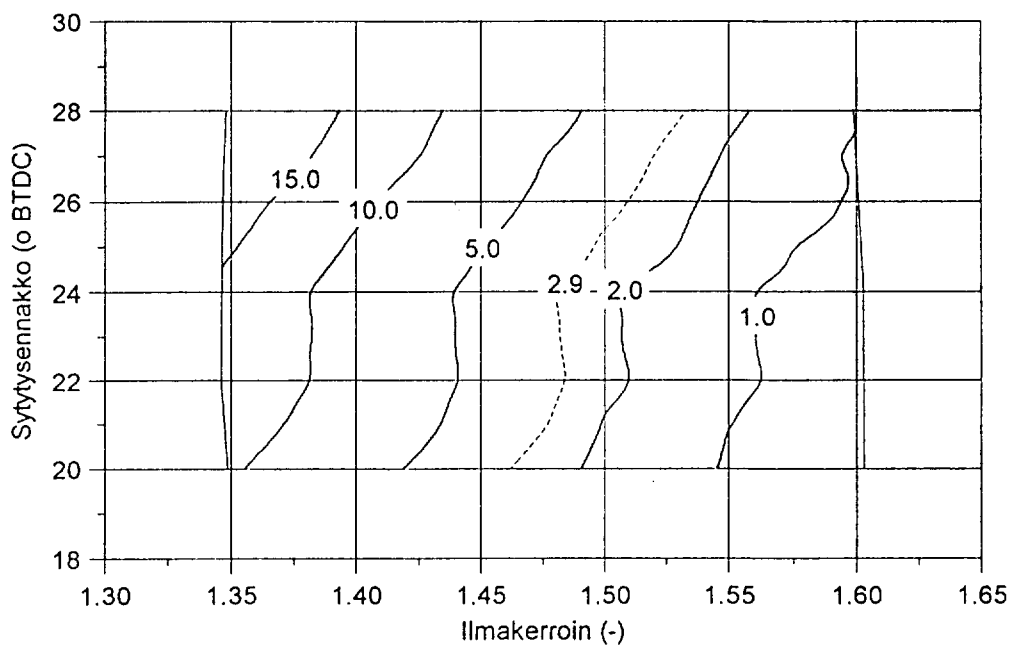
Sytytysennakolla on erittäin suuri merkitys typenoksidipäästöjen muodostumisessa. Kaikilla kuormitustasoilla päästöt alenivat alle puoleen, kun sytytysennakkoa pienennettiin 8 astetta, 28 ast.eykk → 20 ast.eykk. Kuvassa 22 esitetään tulokset kuormituksella 9 bar tehollista keskipainetta. NO_x-päästöt on esitetty ominaispäästöinä (g/kWh). Lisäksi kuvaan on piirretty TA-Luft-normin mukainen raja-arvo typen oksideille (0,50 g/Nm³) muutettuna kyseisen koemoottorin ja sen toimintapisteen ominaispäästökseksi. Mikäli TA-Luft-normin vaatimukset halutaan alittaa, on moottorin säätöjärjestelmän parametrit valittava rajaviivan oikealta puolelta.

Valmet 634 LB NO_x pitoisuus ilmakertoimen funktiona



Kuva 21. Laihaseosmoottorin NO_x-pitoisuudet ilmakertoimen funktiona eri kuormituksilla.

Valmet 634 LB NO_x-päästö (g/kWh), 9 bar BMEP



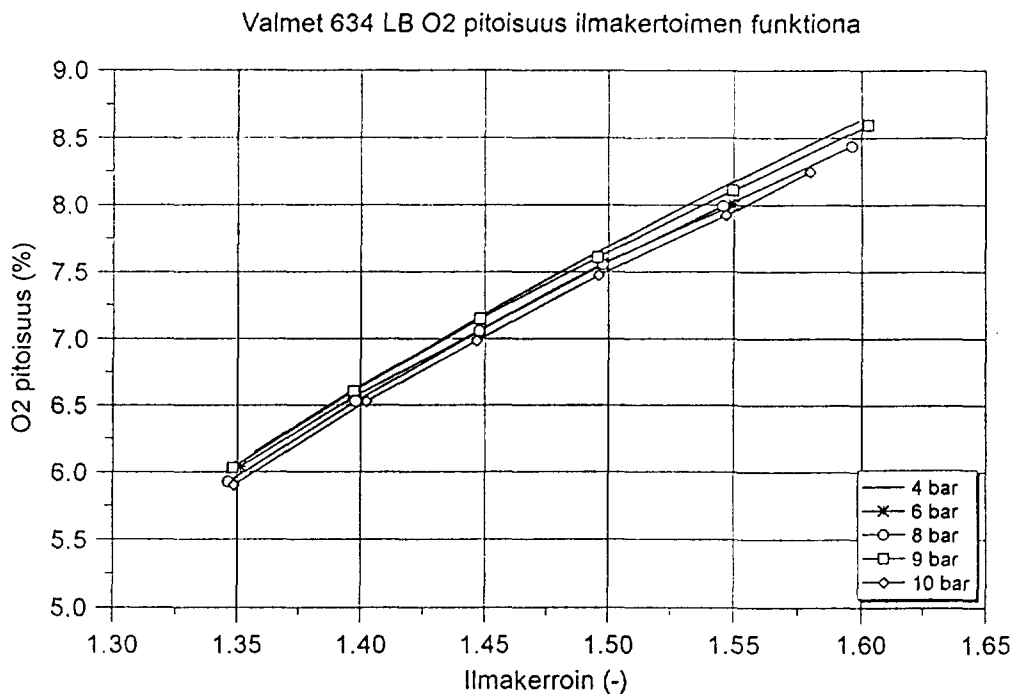
Kuva 22. Laihaseosmoottorin ominaistypenoksidipäästöt ilmakertoimen ja sytytysennakon funktiona 9 barin tehollisella keskipaineella (TA-Luft-raja-arvo merkitty katkoviivalla).

5.2.2 Happi

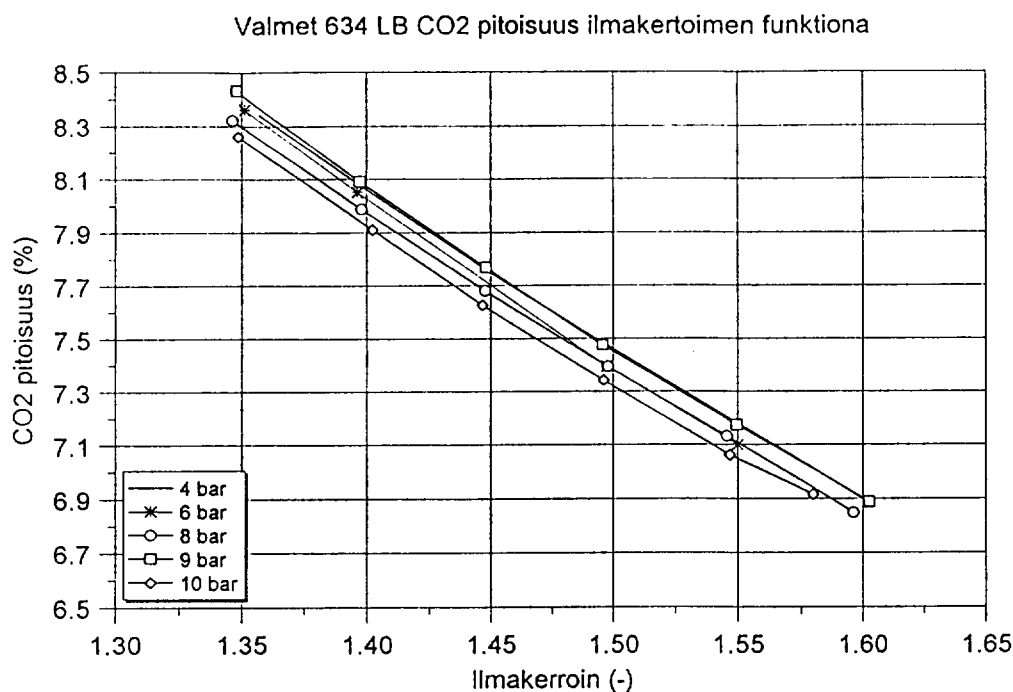
Pakokaasujen happipitoisuus on takaisinkytkentäsuureeksi hyvin käyttökelpoinen, mikä hyvin voidaan havaita kuvista 20 ja 23. Riippuvuus ilmakertoimesta on toivotulla alueella hyvin lineaarinen. Kohdassa 4.1.1 käsitelty laihaseosanturi perustuu juuri happipitoisuuden mittaukseen. Kuten laihaseosanturin kohdalla todettiin, kuormituksella ei ole juuri havaittavaa vaikutusta happipitoisuuteen. Hajonta johtuu lähinnä mittausten välisistä olosuhde- ja kalibrointieroista.

5.2.3 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi käyttäytyy yhtä lineaarisesti ilmakertoimen mukaan kuin happi. Erotuksena on se, että muutos on käänteinen. Hiilidioksidi ei myöskään hapen tavoin reagoi kuormamuutoksiin. Kuvassa 24 esitetään hiilidioksidipäästöjen riippuvuus kuormituksesta ja ilmakertoimesta.



Kuva 23. Laihaseosmoottorin pakokaasujen O₂-pitoisuus ilmakertoimen funktiona eri kuormituksilla.



Kuva 24. Laihaseosmoottorin CO₂-päästöt ilmakertoimen funktiona eri kuormituksilla.

5.2.4 Hiilimonoksidi

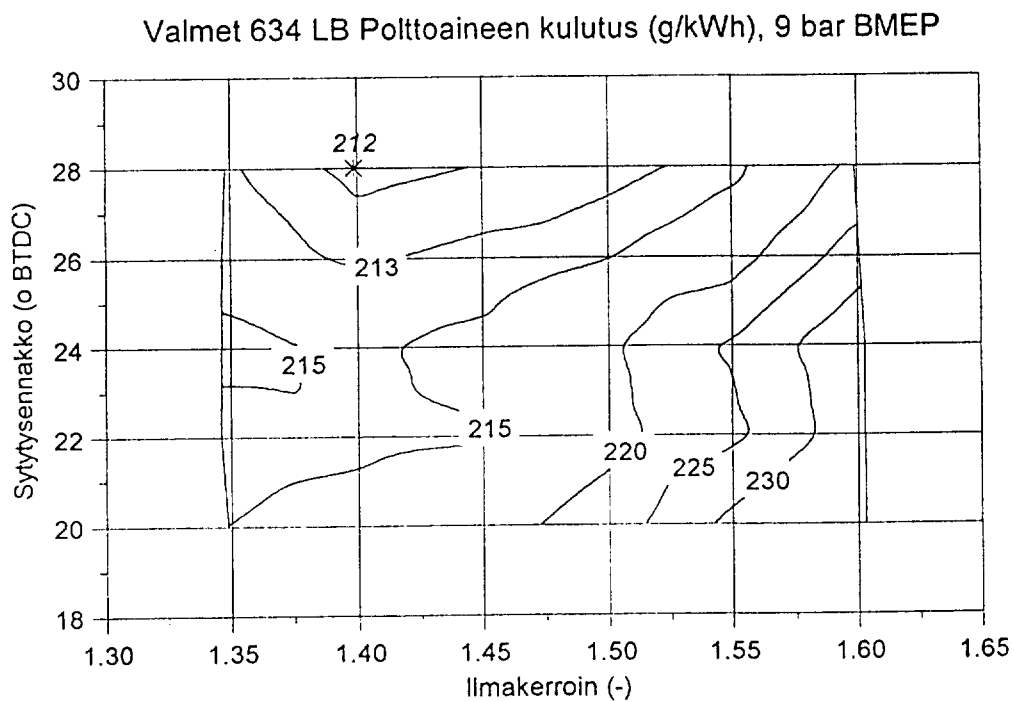
Hiilimonoksidi ei sovellu takaisinkytkentäsignaaliksi kuvassa 20 ilmenevän epälineaarisuuden johdosta. Saksalainen TA-Luft-normi rajoittaa CO-päästöt arvoon 0,65 g/Nm³, kun pakokaasujen happipitoisuus on 5 %. Koemoottorin CO-päästöt olivat lähes jokaisessa koematriisin pisteessä alle kyseisen raja-arvon. Muutamissa lähellä syttymisrajaa olevissa ilmakerroinpisteissä (lambda 1,55 - 1,60) raja-arvo ylittyi hieman. Valittaessa säätöparametreja tämä on luonnollisesti otettava huomioon.

5.2.5 Hiilivedyt

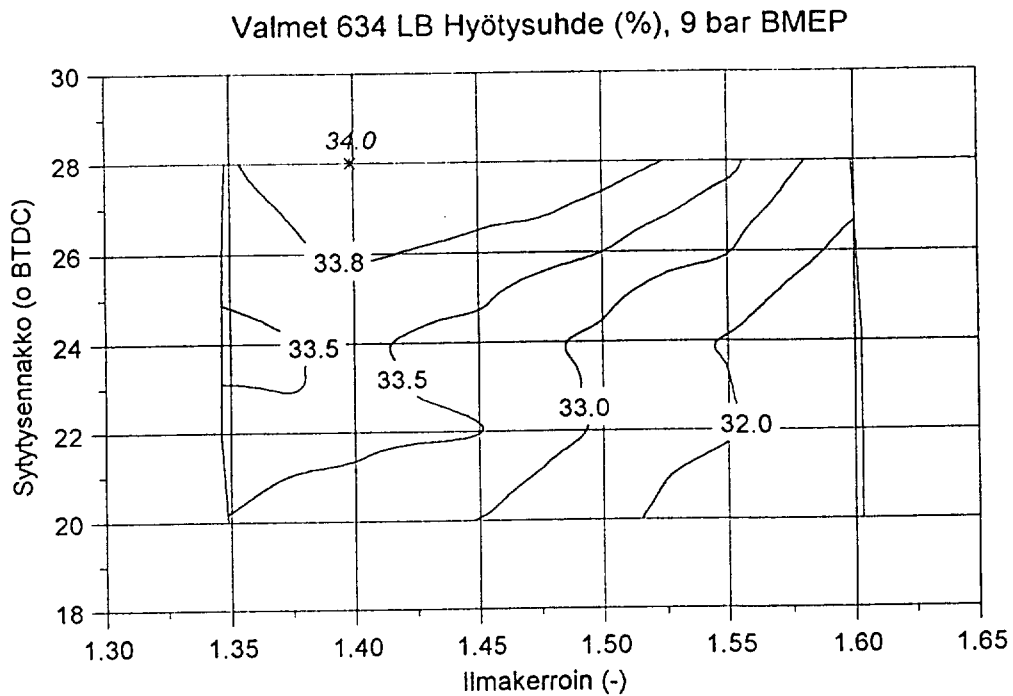
Kuten hiilimonoksidi myöskään hiilivedyt eivät sovellu takaisinkytkentään epälineaarisen käyttäytymisen johdosta (kuva 20). Pakokaasun hiilivedyt lisääntyvät tosin voimakkaasti syttymisrajan läheisyydessä epätäydellisen palamisen seurauksena. Silloin ollaan moottorin toiminnan kannalta jo niin epäedullisella alueella, että toiminnan ylläpitäminen voi olla hankalaa ja moottorille vahingollista. TA-Luft-normi ei ota huomioon metaania ollenkaan rajoitettavana hiilivety päästönä, vaan normissa puhutaan ainoastaan "nonmethane"-hiilivedyistä. Näin ilmaistuna hiilivetyraja-arvo on 0,15 g/Nm³ edellyttäen, että laitos vielä tuottaa yli 3 kg/h metaanittomia hiilivety päästöjä. Koska maakaasumoottorin hiilivety päästöt pääasiassa ovat metaania (yli 90 %), ei hiilivetyjen TA-Luft-raja-arvo käytännössä koske maakaasumoottoreita. Metaanittomia hiilivetyjä koemoottori tuotti enimmillään alle 100 g/h.

5.3 POLTTOAINEENKULUTUS JA HYÖTYSUHDE

Polttoaineenkulutus on mitattu epäsuorasti moottorin käyttämän ilmamäärän ja seossuhteen ilmoittavan nelikaasuanalysaattorin avulla. Tulokset on kerätty kuormituspistekohtaisiin kuviin laskettuna ominaiskulutukseksi ja hyötysuhteeksi (kuvat 25 ja 26). Paras hyötysuhde saatiin ilmakertoimen arvoilla 1,40 - 1,50 ja suurimmilla käytetyillä sytytysennakoilla 26 - 28 ast.eykk. Mitatuissa toimintapisteissä päästiin parhaimmillaan noin 34,5 %:n hyötysuhteeseen.



Kuva 25. Laihaseosmoottorin ominaispolttoaineenkulutus ilmakertoimen ja sytytysennakon funktiona 9 barin tehollisella keskipaineella.



*Kuvaa 26. Laihaseosmoottorin hyötysuhde (akseliteho/polttoainetehto) ilmaker-
toimen ja sytytysennakon funktiona 9 barin tehollisella keskipaineella.*

6 SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN OHJELMOINTI

6.1 OHJAAVAT SUUREET

Kaasunsäätöjärjestelmää ohjaamaan tarvitaan tieto moottorin pyörimisestä, kuormituksesta ja moottorin käyttämästä ilman ja polttoaineen seossuhteesta (kuva 18).

6.1.1 Pyörintänopeus

Moottorin pyörintänopeustietoa tarvitaan lähinnä käynnistysvaiheessa pitämään seos haluttuna käynnistyksen aikana. Pyörintänopeus saadaan sytytysjärjestelmän ohjausyksiköstä pulssitietona. Pyörintänopeustietoa tarvitaan myös myöhemmin mahdollisesti toteutettavassa vakiopyörintänopeussäätimen integroimisessa säätöjärjestelmään.

6.1.2 Kuormitus

Moottorin kuormituksen tunnistamiseen on kokeiltu sekä imusarjan painetta mittaavaa anturia että moottorijarrun vääntömomenttisygnalia. Imusarjan paineeseen perustuva kuormitustieto vaihtelee jonkin verran ulkoisten olosuhteiden (ilmanpaineen ja lämpötilan) mukaan. Tämä kuormitustieto on riippumaton moottorin käyttötarkoituksesta. Käytettäessä moottoria aggregaatin yhteydessä saadaan kuormatieto helposti generaattorin ohjauksesta, jota kokeissa voidaan simuloida käyttämällä moottorijarrun momenttisygnalia.

6.1.3 Seossuhde

Tärkein takaisinkytkentä laihaseosmoottorin ohjauksessa on tietenkin seossuhteen nopeasti ilmoittava signaali. Koska määräävimpänä tekijänä kaasumoottorin yhteydessä ovat pienet typenoksidipäästöt, suoraan pakokaasuista typenoksidit mittaava anturi olisi mielekkäin. Anturityyppiä kehitetään parhaillaan ainakin Japanissa, mutta kaupallisesti sitä ei ole vielä saatavissa.

Alustavissa koeajoissa käytetty kaupallisesti saatavissa oleva ja edullinen (alle 2 500 mk:n) laihaseosanturi todettiin erittäin nopeaksi ja täsmälliseksi takaisinkytkentään sopivaksi laitteeksi, joten sitä on käytetty tämän tutkimuksen primäärisenä takaisinkytkentätyökaluna. Pakokaasujen happipitoisuutta mittaavan anturin sovitussuhteiden antaa tarkan säädön kannalta liian loivan jännitesignaalin (kuvat 19 ja 20), joten sitä on säätöelektronikassa vahvistettu.

6.2 SÄÄTÖSTRATEGIAT

Kaasujärjestelmän säätöstrategioiden valinnassa määräävänä tekijänä ovat pakokaasujen typenoksidipäästöt. Toisena tavoitteena on mahdollisimman hyvä hyöty-

suhde. Toisaalta kokonaisenergiasovelluksessa lämmöntalteenotolla sähkötuoton hyötysuhde ei välttämättä ole ratkaisevassa osassa.

Säädöt valittiin kuormituspistekohtaisesti vertaamalla typenoksidien ominaispäästö- (kuva 22) ja hyötysuhdekuvia (kuva 26). Kun lähtökohtana pidettiin TA-Luft-raja-arvoa typenoksideille, valittiin esimerkiksi säätöpiste, jossa on noin 20 %:n varmuus raja-arvoon (TA-Luft 80 % taulukossa 4) ja mahdollisimman hyvä hyötysuhde. Tällä tavoin määriteltiin kaksi strategiaa, joista toisessa oli kiinteä sytytysennako kaikissa pisteissä ja toisessa pyrittiin mahdollisimman hyvään hyötysuhteeseen pistekohtaisella sytytysennakon säädöllä. Kolmas strategia on TA-Luft-raja-arvosta 50 %:iin pyrkivä versio. Strategiat esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. VALMET 634 G -laihaseosmaakaasu. Säätöstrategiat 1 500 l/min.

KUORMA BMEP	VERSIO 1 TA-Luft 50% λ°EYKK	VERSIO 2 TA-Luft 80% λ°EYKK	VERSIO 3 TA-Luft 80% λ°EYKK
4	1,45/28	1,45/24	1,42/22
6	1,51/28 - 27	1,50/24	1,50/24
8	1,54/28	1,53/24	1,53/24
9	1,56/28 - 27	1,52/24	1,54/26
10	1,53/23	1,54/24	

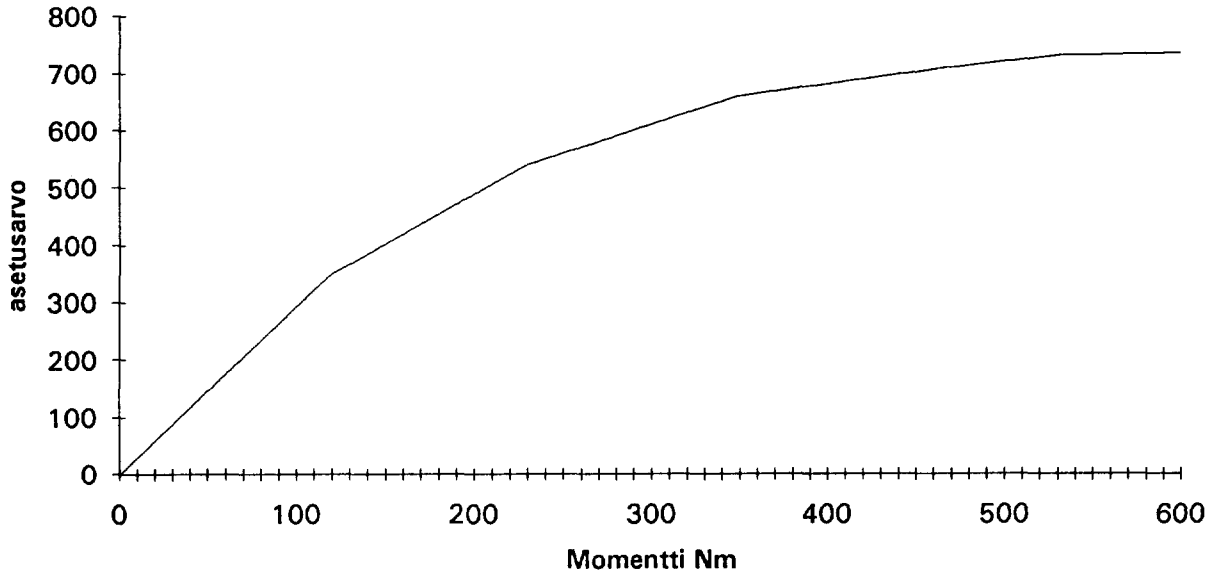
6.3 KOEAJOT VALITULLA SÄÄTÖOHJELMALLA

6.3.1 Säätöohjelma

Käytännön koeajoihin valittiin taulukon 4 mukainen säätöstrategia kiinteällä sytytysennakolla ja TA-Luft 80 % -arvoilla (versio 2). Kuormituspisteiden väliset säätöalueet linearisoitiin ohjelmallisesti (esimerkki kuvassa 27). Säätöohjelma-versiot tallennettiin EPROM-tyyppisiin ohjelmoitaviin muistipiireihin. Ennen muistipiirien ohjelmointia moottoria säädettiin PC:llä asettelemalla erilaisia tavoitearvoja ja säätönopeuksia toimilaitteelle ja seuraamalla muutoksia tiedonkeruusta oikeiden säätöasetuksien löytämiseksi.

Säätöstrategiasta ohjelmoitiin kaksi EPROM-muistipiiriä. Ensimmäisessä kuorman takaisinkytkentäsignaalina käytettiin imusarjapainetta (EPROM-koodi: Laih2) ja toisessa moottoridynamometrin momenttisisignaalina (EPROM-koodi: Mom1). Liitteessä 1 on Mom1-ohjelmaversioiden lähdekoodilistaus. Kuvassa 27 esitetään Mom1-ohjelman seoksensäätötoimilaitteen asetusarvo moottorin kuormituksen mukaan.

Asetusarvo kuormituksen mukaan

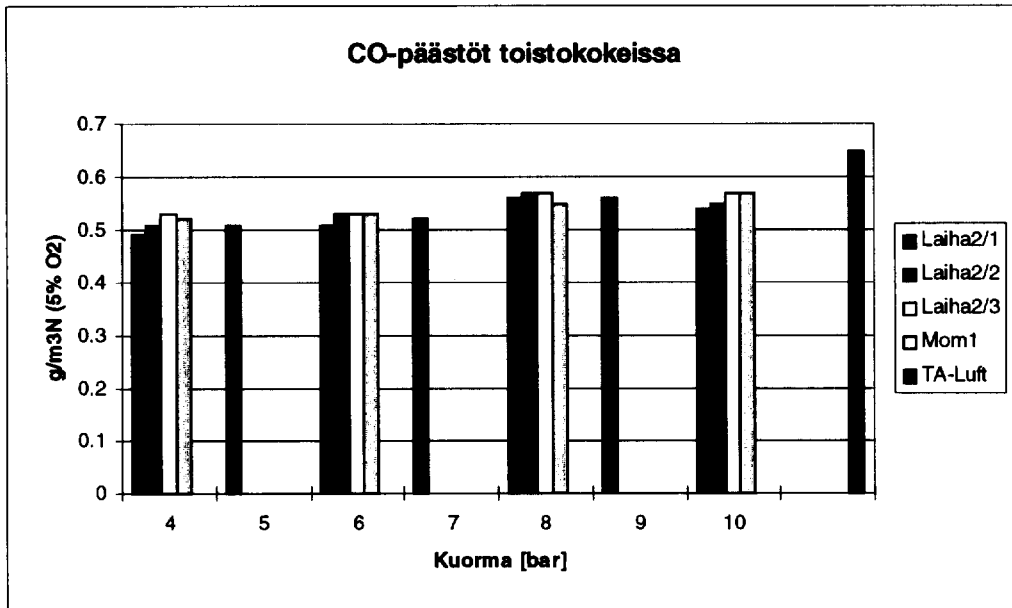


Kuva 27. Seoksensäädön asetuservo moottorin kuorman funktiona.

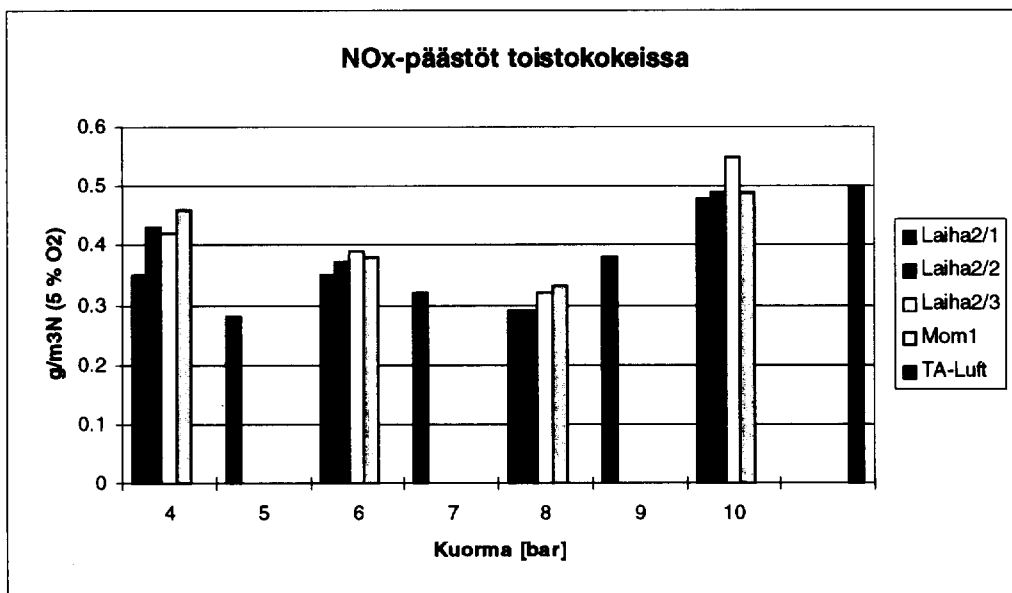
6.3.2 Mittaukset

Kohdassa 6.3.1 mainituilla ohjelmaversioilla ajettiin verifiointimittaukset siten, että Laih2-ohjelmalla tehtiin toistomittaukset kolmena eri päivänä (Laih2/1,2 ja 3). Lisäksi Mom1-ohjelmalla ajettiin eri kuormitustakaisinkytkentöjä (imusarjapaine/momenttisygnäali) vertaava mittaus. Mittauksissa seurattiin lähinnä häkä- ja typenoksidipäästöjen sekä seossuhteen (λ -arvon) toistettavuutta, kun muuttujina ovat olosuhteet (eri mittauspäivät) ja moottorin kuormituksen takaisinkytkentäsignaali. Päästötulokset esitetään kuvissa 28 ja 29. Päästöarvot ilmoitetaan TA-Luft-normin mukaisina yksikköinä, viimeinen pylväs merkitsee normin raja-arvoa. Kuvassa 30 ovat ilmakerroinprosessorilla varustetun nelikaasuanalysointilaitteen ilmoittamat ilmakerroin-arvot.

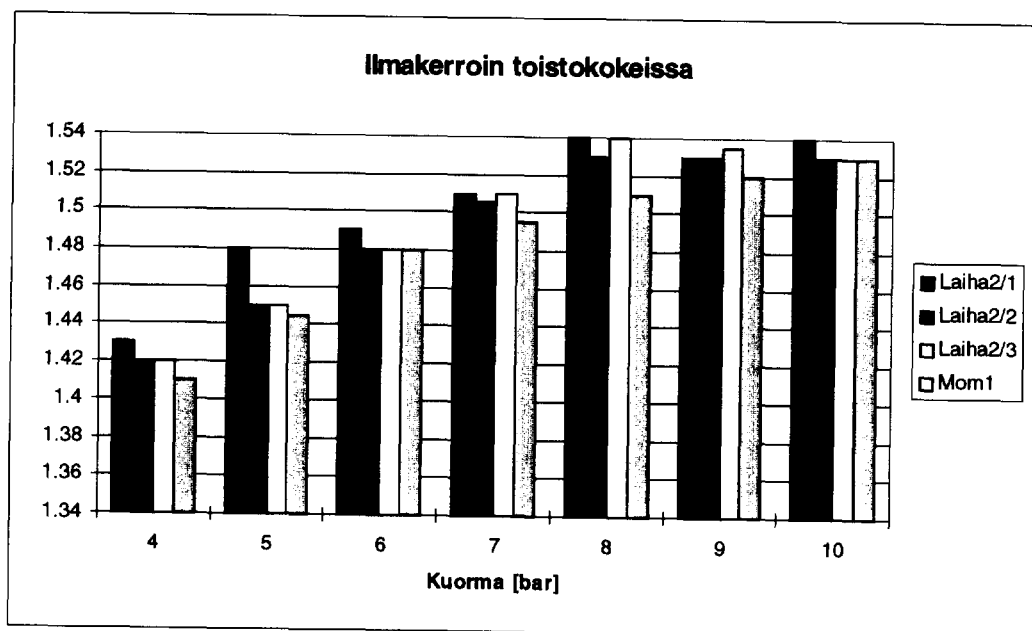
Mittauksista voidaan pitää hyvinä, kun otetaan huomioon monet polttomoottorin palotapahtumaan ja säätöjärjestelmän ohjaukseen vaikuttavat muuttujat sekä mittaus- ja laskentajärjestelmän tarkkuus. Toistettavuus momenttitakaisinkytkennällä on todennäköisesti imusarjapainekytkentää parempi. Samoilla seoksensäädön asetuservoilla molemmat kuorman takaisinkytkentäperiaatteet antoivat samansuuruiset pakokaasupäästöt. Toteutuneet ilmakerroin-arvot olivat hieman tavoitearvoja pienemmät, mikä selittää pakokaasupäästöjen, etenkin typenoksidien, jäämistä osittain tavoitellun 80 % TA-Luft-raja-arvojen yläpuolelle. Haluttu tulos saadaan ohjelmoimalla uusi EPROM-piiri uusilla laihaseosanturin ja seoksensäätötoimilaitteen asetuservoilla.



Kuva 28. Häkäpäästöt toistokokeissa.



Kuva 29. Typenoksidipäästöt toistokokeissa.



Kuva 30. Ilmakerroin toistokokeissa.

Edellä kuvatuilla lyhytaikaisilla kokeilla ei voitu saada esiin säätöjärjestelmän toimivuutta jatkuvassa ajossa, jossa voi ilmetä etenkin laihaseosanturin mahdollinen ”ryöminen”. Ns. kaskadisäädöllä, jossa primäärinä ohjaavana suureena on suhteellisen hidas (esim. NO_x - tai nelikaasuanalysaattori) signaali ja sekundääri-ohjauksena nopea laihaseosanturi, voidaan toteuttaa oppiva säätöjärjestelmä. Tässä laihaseosanturin ryöminen ei vaikuta määrävän (tarkan) ohjaussignaalin säätämään lopputulokseen. Tällaisen kytkennän toteuttaminen on mahdollista myös projektia varten kehitetyllä säätöjärjestelmällä.

6.4 VAKIONOPEUSSÄÄTIMEN INTEGROINTI

Jotta moottoria voitaisiin käyttää aggregaattiasennuksessa, siinä on oltava vakio-
pyörintänopeussäädin. Tätä varten moottori varustettiin aluksi kaupallisella säätimellä (GEC). Tällä säätimellä moottorin pyörintänopeutta ei saatu vakioiduksi, vaan nopeus huojui hyvin voimakkaasti ja joutui välillä kiihtyvään resonanssiin. Tämä johtui kahden eri säätimen (seoksen ja pyörintänopeuden säätimien) yhteisvaikutuksesta, jolloin säätötoimenpiteet pyrkivät jatkuvasti korjaamaan toistensa aiheuttamia muutoksia. Lisäksi turboahtimen ahtopaine aiheutti kaasuläppään voimia, jotka säätöliikkeen kasvaessa voimistivat värähtelyä, jota säätimen toimilaitte (sähkömagneetti) ei kyennyt hallitsemaan.

Edellä mainitusta syystä seoksen säätöjärjestelmään integroitiin myös pyörintänopeussäätö. Toimilaitteeksi valittiin hammaspyörävälityksellä varustettu tasavirtamoottori. Suuri välityssuhde estää kaasuläppään syntyvien voimien vaikutuksen säätölaitteen toimintaan. Pyörintänopeuden säädön ohjelmoinnissa voidaan huo-

mioida seoksensäädön säätöparametrit ja täten minimoida molempien säätöjen päällekkäisvaikutukset. Näin toteutetulla vakionopeussäädöllä voitiin tehdä koeajoja suhteellisen tasaisella pyörintänopeudella. Tarkempi säätö olisi edellyttänyt säätöohjelman hienosäätöä ja toimilaitteen välityssuhteen edelleen kasvattamista. Tämä nähtiin kuitenkin tämän projektin puitteissa tarpeettomaksi, koska säätökokonaisuus kuitenkin toimi kohtuullisesti.

7 KOEAJOT LAIHASEOSKATALYSAATTORILLA

Vaikka TA-Luft-normi ei näin pienen mitan kohteessa määrittele rajoituksia hiilivetyypäästöille, niiden vähentäminen on kuitenkin tärkeää. Etenkin laihaseoskaasumootorin kohdalla hiilivetyypäästöt (metaania) voivat olla huomattavat liikuttaessa lähellä laihaseosrajaa. Hiilivetyypäästöjä voidaan vähentää kytkemällä pakoputkistoon erityisesti vaikeasti hapetettavaa metaania varten kehitetty katalysaattori. Samalla vähenevät myös hiilimonoksidipäästöt.

Ruotsalainen Svenska Emissionsteknik AB toimitti projektin käyttöön kaksi maakaasulle kehitettyä hapettavaa laihaseoskatalysaattoria. Katalysaattoreissa oli erisuuret jalometalli"lataukset", joiden vaikutusta metaanipäästöihin haluttiin verrata. Ennen mittauksia katalysaattorit vanhennettiin ajamalla niitä koemootorissa samanlaisella kuormalla (7 bar/1 500 1/min) 17 tuntia. Katalysaattorille tulevan pakokaasun lämpötila oli tällöin noin 500 °C.

Sisäänajon jälkeen tehtiin pakokaasupäästöjen pitoisuusmittaukset ilman katalysaattoria ja erikseen kummallakin katalysaattorilla käyttäen Laiha2-säätöohjelmaa. Mittauspisteet olivat 4, 6, 8 ja 9 bar tehollista keskipainetta pyörintänopeudella 1 500 1/min.

Mittaustulokset esitetään taulukossa 5. Hiilivedyt analysoitiin kaasukromatografilla. Tulokset osoittavat, että maakaasulle optimoidulla laihaseoskatalysaattorilla voidaan saavuttaa erittäin hyvä konversiosuhde metaanin (CH₄) suhteen. Häkä (CO) poistui myös lähes täydellisesti. Kaasukromatografilla analysoitiin myös muita hiilivetyjä, kuten etaani, eteeni ja propeeni. Kun pitoisuudet ilman katalysaattoria olivat 1 - 20 ppm, ei katalysaattorinäytteistä voitu määrittää näitä komponentteja. Hapettavilla katalysaattoreilla ei luonnollisestikaan ollut mainittavaa vaikutusta typenoksideihin (NO_x). Mitatut katalysaattorit olivat mittausolosuhteisiin (pakokaasuvirtausmäärä) nähden ehkä jonkin verran ylimitoitettut.

Taulukko 5. Pakokaasupäästöt laihaseoskatalysaattoreita käyttäen ja ilman.

Katalysaattori	Kuorma (bar)	CO (ppm)	CH ₄ (ppm)	NO _x (ppm)
Ilman	4	380	1 250	180
	6	380	1 240	130
	8	390	1 100	120
	9	390	1 090	130
ETO 4359A	4	<10	7	130
	6	<10	9	110
	8	<10	17	100
	9	<10	25	110
ETO 4360A	4	<10	21	120
	6	<10	18	110
	8	<10	22	100
	9	<10	27	100

8 YHTEENVETO

Projektin tavoitteena oli kehittää takaisinkytketty seoksensäätöjärjestelmä kokonaisenergialaitoksen laihaseoskaasumoottoria varten. Työssä käytettiin Sisu Dieselin valmistamaa ja VTT:ssä projektin yhteydessä laihaseoskäyttöiseksi kehitettyä, 7,4-litraista, kipinäsytytteistä, avoimella palotilalla varustettua Valmet 634 GA -kaasumoottoria.

Seossuhteen takaisinkytkentäsignaaliksi valittiin kaupallisesti saatavissa oleva, pakoputkeen asennettava, nopea, pakokaasujen happipitoisuutta lineaarisesti mittaava anturi. Säätöjärjestelmä kehitettiin sellaiseksi, että se voi hyödyntää mitä tahansa muuta takaisinkytkentäsignaalia. Koeajot osoittivat, että takaisinkytkentään valittu laihaseosanturi on käyttökelpoinen laihaseoskaasumoottorin seoksensäätöohjaukseen. Anturityypin toimivuutta pitkäaikaiskäytössä ei tämän projektin puitteissa voitu varmistaa.

Kehitetty seoksensäätöjärjestelmän ohjaus perustuu ohjelmoitaviin EPROM-muistipiireihin, joihin voidaan ohjelmoida erityyppisiä säätöstrategioita käyttökohteesta, tavoitteista ja käytössä olevista ohjaussignaaleista riippuen. Järjestelmään voidaan seoksensäädön lisäksi integroida myös vakiopyörintänopeussäätimen ja sytytysennakon säädön ohjaukset.

Pienet pakokaasupäästöt ovat seoksensäätöohjatun laihaseoskaasumoottorin tärkein tavoite. Tämä koskee etenkin typenoksidipäästöjä. Laihaseostekniikka vähentää myös hiilimonoksidipäästöjä, mutta hiilivetyypäästöt (metaani) jopa kasvavat, kun siirrytään typenoksidipäästöjen kannalta riittävän laihaan seokseen. Tästä syystä projektissa tutkittiin myös erityisesti maakaasulle kehitettyjen hapettavien laihaseoskatalysaattorien vaikutusta pakokaasupäästöihin. Mitatut katalysaattorit poistivat pakokaasuista lähes kaiken hiilivedyn ja hiilimonoksidin, mutta typenoksidipäästöt pysyivät odotetusti ennallaan.

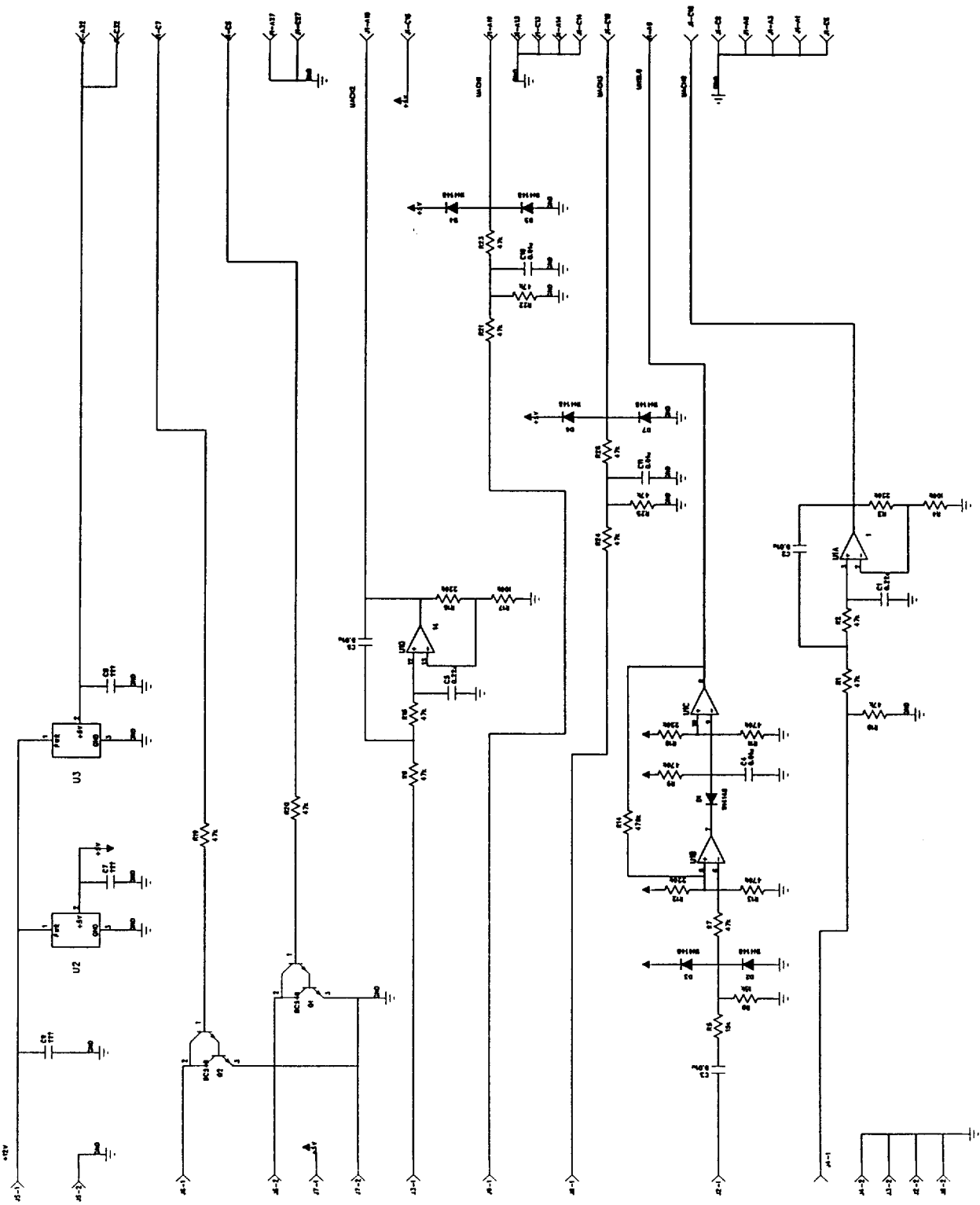
Projektin tavoitteet toteutuivat pääosin. Järjestelmän toimivuutta pitkäaikaiskäytössä ei tämän projektin puitteissa voitu toteuttaa. Toisia tämän mitan yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksiin ja takaisinkytkentään soveltuvia antureita ei toistaiseksi ole saatavissa. Kirjallisuuden mukaan Japanissa on kehitteillä nopea typenoksideja mittaava anturi.

LÄHDELUETTELO

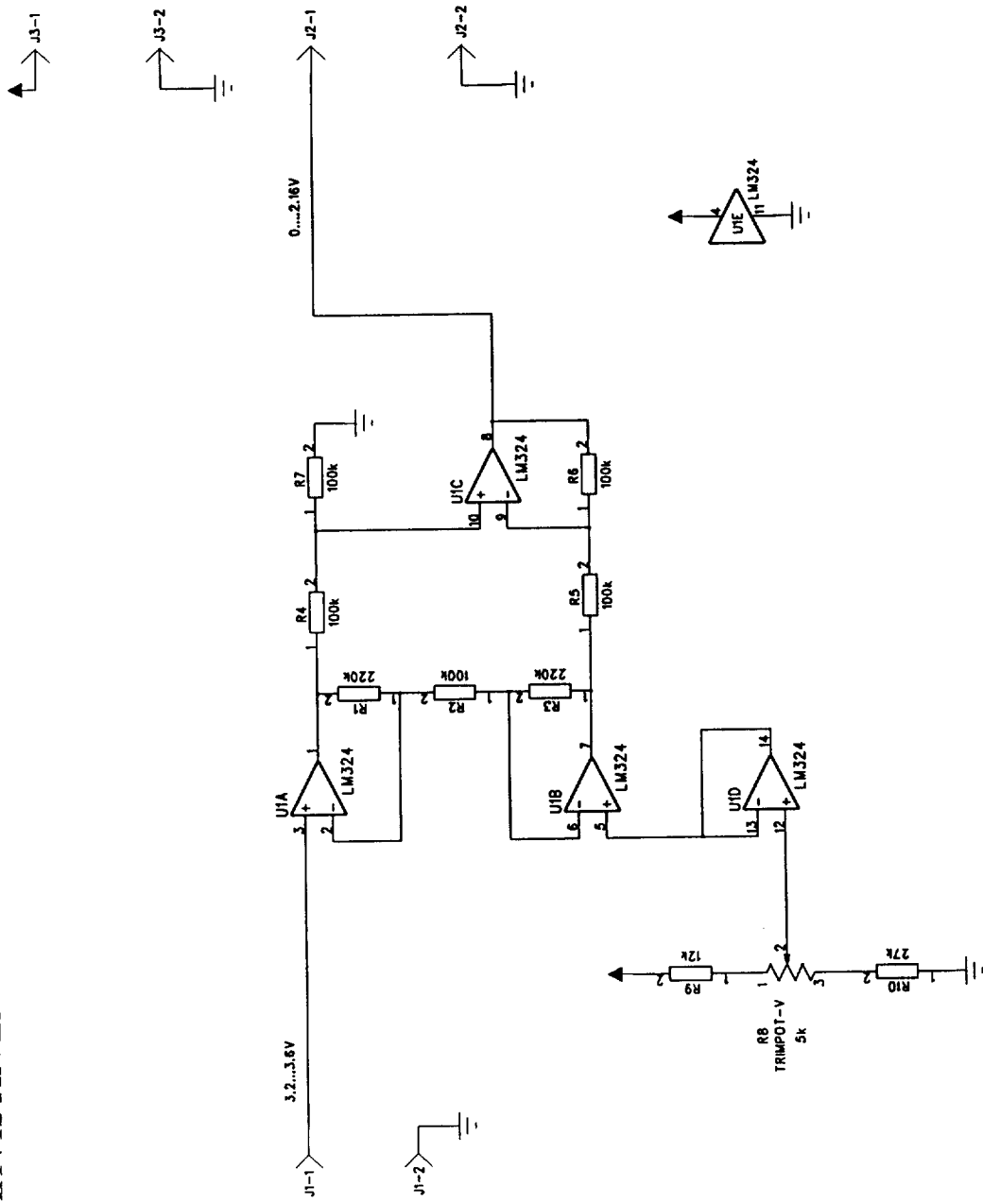
1. Kytö, M., Nylund, N.-O. & Eklund, T. Emissionsbegränsning i snabbgående 4-takts ottomotoren med $\lambda = 1$. Delrapport för Nordisk Gasteknisk Centers projekt "Gasmotorer för värme/kraftproduktion, teknologier för emisjonsbegränsning". Oslo: Nordisk Gasteknisk Center, 1989. 70 s.
2. Ekelund, M. ym. Naturgas som kolvmotorbränsle. Stockholm: STU, 1989. 180 s. (STU-information nr. 751-1989.)
3. Janach, W. & Chastonay, M. Der Erdgas-Magermotor für leichte Stadtautos. VDI Berichte, 1992. Vol. 1020, s. 269 - 277.
4. Lean-burn catalyst offers market boom. New Scientist, 1993. 17 July, s. 20.
5. Chmela, F. & Kapus, P. Das TRI-FLOW-Verbrennungsverfahren für den Magerbetrieb von Gasmotoren. MTZ Motortechnische Zeitschrift, 1994. Vol. 55, nro 9, s. 526 - 535.
6. Horie, K. ym. The development of a high fuel economy and high performance four-valve lean burn engine. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 10 s. (SAE Paper 920455.)
7. Weller, G. The LEGEND project. Proc. International Conference & Exhibition on Natural Gas Vehicles, Toronto 3 - 6 October 1992. Toronto: International Association for Natural Gas Vehicles Inc., 1994. S. 409 - 419.
8. Nagamuna, T. ym. New gas mixer for gas engines - optimized air-fuel ratio with negligible pressure loss. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 12 s. (SAE Paper 922361.)
9. Green, R. & Zavier, C. Charge stratification in a spark ignition engine. Journal of Power and Energy, 1992. Vol. 206, s. 59 - 64.
10. Goto, S. ym. NIIGATA ultra lean burn SI gas engine - achieving high efficiency and low NO_x emission. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1990. 19 s. (SAE Paper 901608.)
11. Takada, Y. ym. Development of a heavy-duty turbocharged and aftercooled CNG-fueled lean burn engine - conversion of a naturally aspirated diesel engine into otto-type CNG engine. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1993. 7 s. (SAE Paper 932818.)
12. Klimstra, J. & Westing, E. Performance of natural gas fueled engines with variable intake-manifold temperatures. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 12 s. (SAE Paper 922364.)

13. Klimstra, J. ym. A lambda sensor using intake mixture of natural-gas-fueled engines: the Censor. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1993. 8 s. (SAE Paper 932821.)
14. Details of Toyota's new lean-burn engine system. Japan Autotech Report, 1992. Vol. 149, 5 August, s. 16 - 24.
15. Wadman, B. Electronic alternative fuel management. High Speed Diesels & Drives, 1993. September, s. 22.
16. Methane as a motor fuel. Ottawa: IEA International Energy Agency, 1992. 167 s.
17. Sharp, C. ym. Transient emissions from two natural gas-fueled heavy-duty engines. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1993. 11 s. (SAE Paper 932819.)
18. Kamel, M. & Duggal, V. Cummins B5.9G natural gas engine. Proc. International Conference & Exhibition on Natural Gas Vehicles, Toronto 3 - 6 October 1994. Toronto: International Association for Natural Gas Vehicles Inc., 1994. S. 351 - 360.
19. Kim, E. ym. Feasibility study on CNG engine technology - performance and exhaust emissions of a heavy duty learn burn engine. Proc. International Conference & Exhibition on Natural Gas Vehicles, Toronto 3 - 6 October 1994. Toronto: International Association for Natural Gas Vehicles Inc., 1994. S. 309 - 320.
20. van der Weide, J. ym. CNG city bus engine with optimized part-load efficiency, high mean effective pressure and low emissions. Proc. International Conference & Exhibition on Natural Gas Vehicles, Toronto 3 - 6 October 1994. Toronto: International Association for Natural Gas Vehicles Inc., 1994. S. 469 - 482.

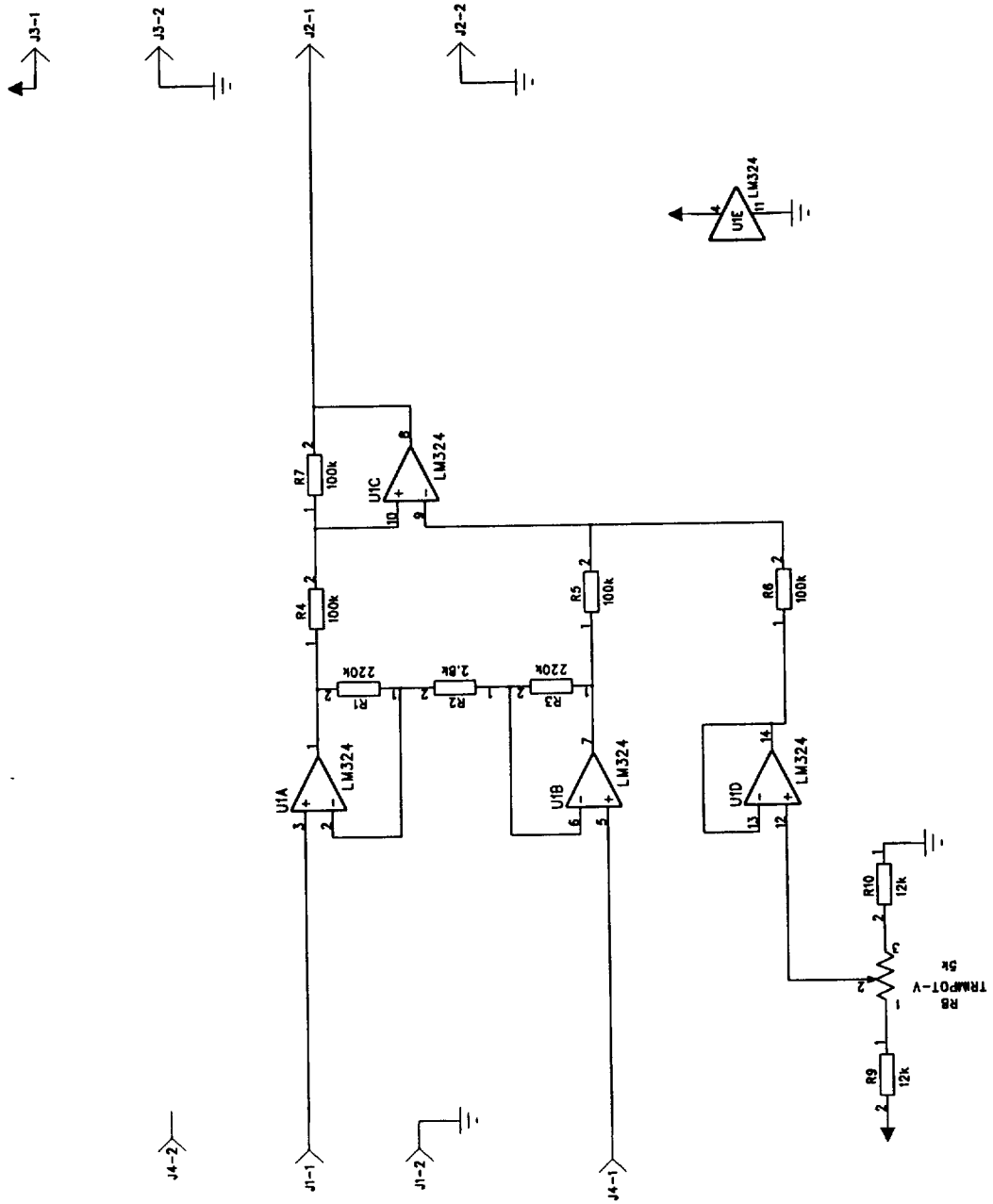
1/0-KORTTI SEOKSEN SÄÄTÖVENTTIILIN OHJAUKSEEN



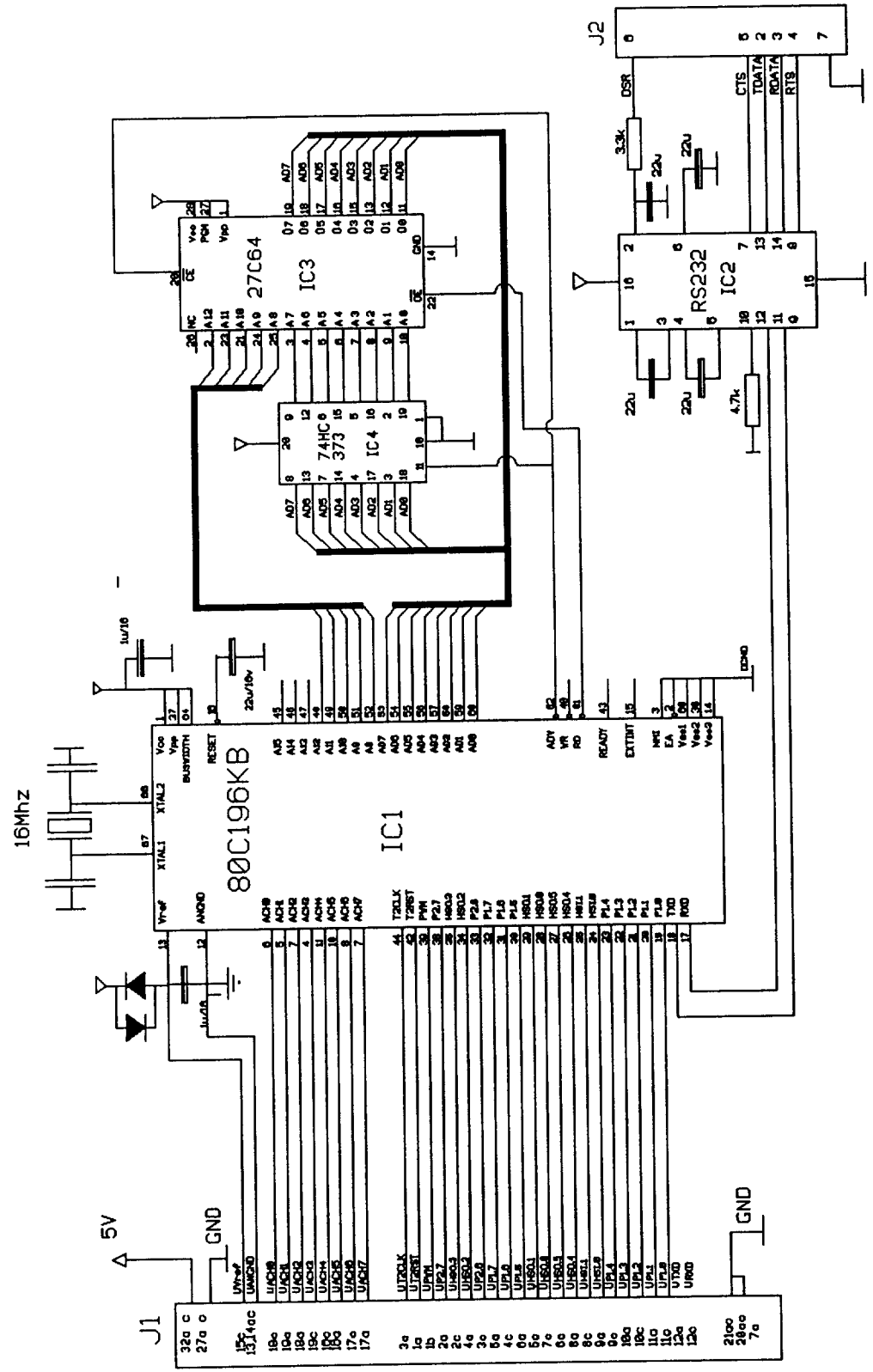
SOVITUSVAHVISTIN LAIHASEOSANTURILLE



VAHVISTIN IMUSARJAN PAINENTURILLE



MIKROKONTROLLERI RS232-LIITÄNNÄLLÄ



LEAN-BURN-KAASUMOOTTORIN LAMBDA-SÄÄTIMEN OHJELMA

Kuvaus:

PI-säätäjä, jonka mitta-arvona on NTK:af_r pakokaasujen happitunnistimen tuotama jännite. Säätäjän ulostulo ohjaa polttoainesäätöventtiiliä pulssinleveys-moduloinnilla. Asetusarvoa ohjataan kuormituksen mukaan momenttianturin avulla.
 *****/

```
#include "80C196E.h"
#include <stdio.h>
#include "lambda.h"

#define KAYNNISSA      1
#define LEVOSSA       0
#define KAYNNISTYS    2
#define LAMMITYS      3

#define KYLLA         1
#define EI             0

#define MAX_SUMINTEG1 5000      /*I-säädön rajat */
#define MIN_SUMINTEG1 -5000

/* kerromme kaantajalle mikä prosessori on käytössä (80C196KB) */
#pragma model(kb)
/* keskeytyspalvelut */
#pragma interrupt(timer_ovf=0, atod_done=1, hsi_data_available=2, \
soft_timer_int=5, hso_int=3)

extern char temp_sp_status; /*apumuuttuja sarjaliikennettä varten*/
short lambda;              /*happitunnistimen jännitteen ad-muunnos*/
unsigned short kierrosluku; /*kierrosluku [rpm]*/
char overflow_flag;        /*prosessorin ajastimen ylivuotomerkki*/
unsigned short vanha;      /*käytetään kierroslukua laskettaessa*/
short asetusarvo;         /*haluttu arvo*/
short momentti;           /*momenttimittauksen jännitteen ad-muunnos */
short venttiili;          /*polttoaineen säätöventtiilin asento 1000=100%*/
short output;             /*säätäjän ulostulo*/
short av_momentti;        /*momenttiarvojen summa keskiarvon laskua varten*/
short av_lambda;          /*lambda-arvojen summa keskiarvon laskua varten*/
char av_count;            /*laskuri keskiarvon laskua varten*/
unsigned char time_hi;     /*hidas aika asetusarvon vaihtoa varten*/
short sum_integral;       /*säätäjän integrointisumma*/

struct toimintapiste{      /*struktuuri asetusarvokäyrän pisteitä varten*/
    int momentti;          /*piste */
    int lambda;            /*haluttu asetusarvo*/
    float k;               /*kerroin pisteen ylittävälle osalle*/
};

/*määritetään asetusarvokäyrän pisteet tässä tapauksessa*/
const struct toimintapiste piste1={0,320,1.04}; /*nollakuorma*/
const struct toimintapiste piste2={120,445,0.95};
const struct toimintapiste piste3={230,550,0.71};
const struct toimintapiste piste4={350,635,0.42};
const struct toimintapiste piste5={470,685,0.25};
const struct toimintapiste piste6={530,700,0.07};
const struct toimintapiste piste7={590,704,0}; /*590Nm*/

/*****
/*Asetusarvon määrittäjäfunktio. Väliarvot interpoloidaan.
*****/

short maarita_asetusarvo()
```

```

{
if (momentti>piste7.momentti) return (piste7.lambda+(momentti-piste7.momentti)\
    *piste7.k);
if (momentti>piste6.momentti) return (piste6.lambda+(momentti-piste6.momentti)\
    *piste6.k);
if (momentti>piste5.momentti) return (piste5.lambda+(momentti-piste5.momentti)\
    *piste5.k);
if (momentti>piste4.momentti) return (piste4.lambda+(momentti-piste4.momentti)\
    *piste4.k);
if (momentti>piste3.momentti) return (piste3.lambda+(momentti-piste3.momentti)\
    *piste3.k);
if (momentti>piste2.momentti) return (piste2.lambda+(momentti-piste2.momentti)\
    *piste2.k);
if (momentti>pistel.momentti) return (pistel.lambda+(momentti-pistel.momentti)\
    *pistel.k);

return (pistel.lambda);
}

/*****/
/*Tämä funktio ajetaan aina kun analogia/digitaali-muunnos on valmis
*****/

void atod_done()
{
short hi,lo;
short temp;
/*Kaivetaan kanavanumero ja tulos kahdesta rekisteristä*/
lo=ad_result_lo;
hi=ad_result_hi;
temp=(lo&0xc0)>>6;
hi=(hi<<2)&0x3fc;
temp=hi|temp;

switch (lo&0x07)
{
case CHANNEL_0:ad_command=(CHANNEL_1);av_lambda+=temp;break;

case CHANNEL_1:ad_command=(CHANNEL_0);av_momentti+=temp;break;

}

/*Jos 10 näytettä kummaltakin kanavalta lasketaan keskiarvo.Tämän
tarkoituksena on suodattaa 50hz häiriöitä,joita esiintyy runsaasti
pyörrevirtajarrun ympäristössä.*/

if (av_count>18){av_count=0;
momentti=av_momentti/10;
av_momentti=0;
lambda=av_lambda/10;
av_lambda=0;
}
else av_count++;
mset_hso(START_AD,SAMPLE_TIME); /*uusi näyte lms kuluttua*/
}

/*****/
/*Tämä funktio ajetaan aina kun prosessorin TIMER1 vuotaa yli.
*****/

void timer_ovf()
{
if (overflow_flag<10)overflow_flag++; /*jos yli kymmenen kertaa
kone ei varmaan käy*/

else kierrosluku=0;

}

/*****/
/*Pulssisuhdeulostulo tehdään tällä funktiolla.Taajuus on noin 10hz.
*****/

void hso_int()

```



```

{
if (venttiili>700)venttiili=700;          /*ei enempää kuin 70% */
if (venttiili<1)venttiili=1;

mset_hso(HSOO_PIN|SET|INT,60000);          /*seuraavan kerran ulostulo ylös*/
mset_hso(HSOO_PIN|CLEAR,60*venttiili);    /*aukioloaika */
mset_hso(SOFT_TIMER1|INT,30000);         /*säätäjän aktivointi*/
}
/*****/
/*Puolalta tuleva kierroslukupulssi herättää tämän funktion.Kierrosluku las-
ketaan edellisen ja tämän pulssin välisestä ajasta,kun pulssien lukumäärä
kierroksella on tiedossa.
*****/

void hsi_data_available()
{
unsigned long templ;
unsigned short temp;

temp=hsi_time;
templ=overflow_flag;
templ=templ*0xffff;
if (overflow_flag<10){
templ=templ+temp;
templ=templ-vanha;
kierrosluku=RPM_CONST/templ;
}
overflow_flag=0;
vanha=temp;
}

/*****/
/* ohjelma-ajastin keskeytyksfunktio
/* 1-ajastin PI-säätäjä kiertoaika kytketty venttiilin taajuuteen (100ms)
/* 2-ajastin hidias aika 50ms
*****/
void soft_timer_int()
{
short err;
short temp;
temp=iosl;

if (temp&SOFT_TIMER1_EXP) {

err=asetusarvo-lambda;
sum_integral+=err;
if (sum_integral>MAX_SUMINTEG1)sum_integral=MAX_SUMINTEG1;
if (sum_integral<MIN_SUMINTEG1)sum_integral=MIN_SUMINTEG1;
output=err+512+sum_integral/10;
}

if (temp&SOFT_TIMER2_EXP) {
mset_hso(SOFT_TIMER2|INT,TIMER_HI);
time_hi++;
}
}

/*****/
/*sarjaportin initialisointi funktio
*****/
void init_ser_port()
{
iocl=0x26;
baud_rate=0x4d;
baud_rate=0x80;
sp_con=0x09;
}

/*****/

alien void main(void)
{
char tila;          /*toimintatila muuttuja*/

```

```

init_ser_port();                               /*sarjaportin initialisointi*/
init_putchar();                               /*printf initiliasointi*/
hsi_mode=0x01;
ioc0=0x01;
venttiili=400;
asetusarvo=20;
lambda=0;
av_count=0;
av_momentti=0;
av_lambda=0;
kierrosluku=0;
time_hi=0;
int_mask=A_D_DONE|\                           /*keskeytyspalvelujen salliminen*/
        HIGH_SPEED_OUTPUT|\
        SOFT_TIMER|\
        HSI_DATA_AVAILABLE|\
        TIMER_OVERF;
mset_hso(SOFT_TIMER2|INT,TIMER_HI);
ad_command=(CHANNEL_0);
mset_hso(START_AD,1000);                       /*ensimmäinen ad-muunnos*/
mset_hso(HSO0_PIN|SET|INT,25000);
tila=ASLEEP;
/*****
/* Tehdään tätä niinkauan kuin sähköä riittää
*****/
for (;;)
{
switch (tila)
{

case LEVOSSA:{ venttiili=0;
               if (kierrosluku>80){tila=KAYNNISTYS;
               break;
               }
case KAYNNISTYS:{venttiili=10;
                 if (kierrosluku>400)tila=KAYNNISSA;
                 if (kierrosluku<=80)tila=LEVOSSA;
                 break;
                 }

case KAYNNISSA:{
                 venttiili=output;
                 if (kierrosluku<=80)tila=LEVOSSA;
                 break;
                 }
}
if(time_hi>20)
{
time_hi=0;                                     /*jos aikaa kulunut 1s*/
printf("%d %d %d %d %d\r\n",                 /*kerrotaan tilanne sarja- */
        kierrosluku,                           /*porttiin mahdollisesti kytke-*/
        asetusarvo,                             /*tylle PC:lle*/
        lambda,
        momentti,
        venttiili);

asetusarvo=maarita_asetusarvo();             /*haetaan asetuservo käyrältä*/
}
}
}

```

1/0-KORTTI KAASULAPAN ASENTOMOOTTORIN OHJAUKSEEN

