



Boris Rimpilä

Lamborghini Gallardon 5,0L V10 moottorinosien
suunnittelu

Insinööri AMK

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Ajoneuvosuunnittelu

Insinööriyö

9.4.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Boris Rimpilä
Otsikko:	Lamborghinin Gallardon 5,0L V10 moottorinosien suunnittelu
Sivumäärä:	67 sivua
Aika:	9.4.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaaja:	Erityisasiantuntija Vesa Linja-aho

Tämän insinööriyön tavoitteena oli suunnitella, kehittää ja valmistaa auton moottorinohjausjärjestelmän osia. Moottorin osiksi valittiin Lamborghini Gallardon suorasytytyspuolat. Gallardon suorasytytyspuolia tutkittiin yksityiskohtaisesti, jotta vakio-osat saatiin käänteissuunniteltua.

Lamborghinin moottorin osien käänteissuunnittelun jälkeen selvitettiin tarvittava tieto alkuperäisten sytytyspuolien sisäisestä toiminnasta, jotta Gallardon moottoriin voitiin suunnitella ja valmistaa uusi vastaava tuote eri CAD-järjestelmiä ja 3D-tulostimia käyttäen. Onnistuneen prototyypin valmistuksen jälkeen lopullinen vastaava tuote valmistettiin alumiini-3D-tulostimella ja PCB-tulostimella. Tulostetut osat koottiin tuotteen valmistustekniikan mukaisesti. Uusi tuote asennettiin Gallardon V10-moottoriin.

Avainsanat: Sytytyspuola, sytytysjärjestelmä, Lamborghini, PCB, aikavakio, kipi-näenergia

Abstract

Author: Boris Rimpilä
Title: Designing Engine Parts for the Lamborghini Gallardo
Number of Pages: 67 pages
Date: 9 April 2023
Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: Automotive Production Engineering
Supervisor: Vesa Linja-aho, Senior Advisor

The objective of this Bachelor's thesis project was to design, create, and develop automotive engine parts. The parts to the design were targeted at the electrical sector of the engine management system. The engine parts were chosen from the Lamborghini Gallardo's engine's ignition system.

The coil on plug style ignition coils were studied to a high degree of detail in order to reverse engineer the genuine ignition coils. After reverse engineering the Lamborghini's engine parts, knowledge was obtained in regards of the original ignition coils internal functions to enable designing and developing a new equivalent product for the Gallardo's engine. The new equivalent product was designed, developed, and produced using various CAD systems to match the Gallardo's genuine ignition coils during the prototyping stage.

After successful prototyping, the final product was manufactured using metal 3D-printing and PCB-printing technologies. The new product was installed in the Gallardo's engine having completed the task set at the designing stage. The engine with the new ignition coils installed were tested in test drives and measured using electronic diagnostics tools.

Keywords: Ignition coil, Ignition system, Lamborghini, PCB, Time constant, Spark energy

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

Yhtälöt

1	Johdanto	1
2	Gallardon suorasytytysjärjestelmän perusteet	3
2.1	Gallardon suorasytytysjärjestelmän toiminta	3
2.2	Gallardon suorasytytyspuolan toiminta	5
2.3	Gallardon suorasytytyspuolan sisäinen ohjainlaite	7
2.4	Sytytystulpan toimintaperiaate	9
2.5	Gallardon vakiosytytystulppa	9
3	Gallardon suorasytytyspuolan käänteinen suunnittelu	11
3.1	Vakiosuorasytytyspuolan mittaaminen	11
3.2	Vakiosuorasytytyspuolan ensiö- ja toisiokelan käänteinen suunnittelu	13
3.3	Vakiosuorasytytyspuolan mittaus oskilloskoopilla	16
3.4	Vakiosuorasytytyspuolan kipinäenergian laskenta	20
3.5	Gallardon kampiakselin geometria sytytyksen funktiona	26
3.6	Vakiosuorasytytyspuolan ohjainlaite ja kytkentäkaavio	28
3.7	Vakiosuorasytytyspuolan simulaatio ja kipinän tuottaminen	30
4	Uuden suorasytytyspuolan suunnittelu	32
4.1	Suorasytytyspuolan prototyypin suunnittelu	32
4.2	Uuden suorasytytyspuolan ohjainlaitteen suunnittelu	38
4.3	Uusi ensiökelan käämintäteknikka	45
4.4	Uuden suorasytytyspuolan 3D-mallintaminen	49
4.5	Uuden suorasytytyspuolan kokoonpanon 3D-simulointi	51
4.6	Prototyypin ensimmäisen ja toisen tyypin valmistaminen	55
4.7	Uuden suorasytytyspuolan osien 3D-tulostaminen ja kokoaminen	57
4.8	Uuden suorasytytyspuolan asentaminen Gallardon moottoriin	62
5	Yhteenveto	65
	Lähteet	67

Lyhenteet ja käsitteet

By-pass	By-pass kondensaattorit ovat ohituskondensaattoreita
CAD	Computer Aided Design, mallinnusohjelma tietokoneella
Catia V5	3-D Mallinnusohjelma ammattikäyttöön
Darlington	Kahden transistorin kytkentäkonfiguraatio
EMF	Electromotive Force, sähkömagneettinen voima
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor / Eristyshilainen bipolaaritransistori
KiCad	PCB-elektroniikan mallinnus- ja suunnitteluohjelma
Multisim	Elektroniikan suunnitteluun tarkoitettu simulaatio-ohjelma
NC	Not Connected, jokin komponentti tai pinni ei ole kytkettynä
OBD	On Board Diagnostics, autojen testijärjestelmä
PCB	Printed Circuit Board, tulostettu piirilevy
Pinout	Liittimen pinnien kytkentäjärjestys
$R_{ds(on)}$	Resistance Drain to Source, vastus transistorin yli ollessaan päällä
Step-up	Transformaattori, joka nostaa jännitettä
V10	Moottori, jossa on kymmenen sylinteriä, viisi kullakin puolella V-kulmassa

Yhtälöt

Virran nousu ampeereina	$I = I_0 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}} \right)$
Jännitteen nousu voltteina	$U = U_0 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}} \right)$
Aikavakio sekunteina	$\tau = \frac{L}{R}$
Induktanssi henryinä	$L = \frac{\mu N^2 A_C}{l}$
Resistanssi ohmeina	$R = \frac{\rho l}{A}$
Itseinduktanssi voltteina	$\varepsilon = -L \frac{dI_P}{dt}$
Toisiokelan jännite voltteina	$U_S = N_S \frac{A_p \mu N_P}{L_S} \frac{dI_P}{dt}$
Aikavakion suunnittelu sekunteina	$\tau = \frac{\frac{\mu N^2 A_C}{l}}{\frac{\rho l}{A_w}}$
Lämpöenergia jouleina	$J = W_S$
Lämpölaajeneminen metreinä	$\frac{\Delta L_L}{L_L} = \alpha_{AL} \Delta T$
Loppupituuden laskenta	$\Delta L_L + L_L = L_F$

Induktiokelojen induktanssi rinnakkain

$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}}$$

Kipinäenergia jouleina

$$W = \frac{I^2 L}{2}$$

Ohmin laki

$$I = \frac{U}{R}$$

Resistanssi rinnakkaisessa kytkennässä

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \dots$$

Teho watteina

$$P = UI$$

Magneettivuon tiheys tesloina

$$\phi_B = \frac{LI}{NA}$$

1 Johdanto

Ajoneuvojen sytytysjärjestelmät voidaan jakaa neljään sukupolveen. Alkuaikoina bensiinimoottoreihin kehitettiin magneettosytytys, jossa sytytyspuolan yhteydessä on generaattori, joka pyöriessään tuottaa generaattorin tapaan ensiökelaan virtaa, ja tämä virta katkaistaan oikealla hetkellä mekaanisilla katkojan kärjillä. Korkeajännite ohjattiin korkeajännitejohdolla sytytystulppaan ja magneeton akselia pyöritettiin moottorin kampiakselista. Tästä järjestelmästä siirryttiin akkusytytysjärjestelmiin, joissa sytytyspuolan ensiökelaan varattiin virtaa suoraan akusta ja katkottiin mekaanisilla katkojan kärjillä kuten magneetossakin. Korkeajännite ohjattiin yhä korkeajännitejohdoilla sytytystulppaan.

Seuraavana kehittyi akkusytytysjärjestelmä, jossa perinteiset katkojan kärjet vaihdettiin transistoriksi, jolla katkottiin ensiökelan virta moottorin kampiakselista saadulla signaalilla induktioanturista. Induktioanturin ulostulo on siniaaltovaihtovirtaa. Tähän asti perinteiset katkojan kärjet tai mainittu transistori katkoivat moottorin kaikkien sylintereiden sytytystä yhdellä sytytyspuolalla.

Parannuksia tähän järjestelmään tuli lisää niin, että moottorin jokaiselle sylinterille asennettiin oma sytytyspuola, joista jokaisella on oma transistorinsa. Korkeajännite ohjataan suoraan sytytystulppaan asentamalla sytytyspuola sytytystulpan päälle, näin korkeajännitejohtoa ei tarvita. NykYTEKNIKALLA transistoria ohjataan Hall-anturin signaalin ulostulolla, joka lukee kampiakselia. Hall-anturin signaalin ulostulo on PWM-kanttisignaalia. Lopputuloksena saatiin viimeisimmän sukupolven sytytyspuola, jota kutsutaan suorasytytyspuolaksi. Suorasytytyspuola on komponentti, joka sisältää käämit, transistorin ja transistorin ohjauspiirin. Suorasytytyspuolaa kutsutaan tällä nimellä siksi, koska se asennetaan sytytystulpan päälle. Tässä insinööriyössä keskitytään suorasytytysjärjestelmään.

Insinööriyön projektiksi valittiin tuotteen suunnitteluun ja valmistukseen perustuva työ, jossa suunnitellaan ja valmistetaan uusi auton moottorin osa. Projektin valittiin Lamborghini Gallardon moottorin vakiosuorasytytyspuola, joka käänteis-suunniteltiin, jotta saatiin referenssimitat uuden vastaavan osan suunnitteluun ja valmistukseen.

Suorasyytytyspuolan sisäinen sähköjärjestelmä käännteissuunniteltiin ekstraktoimalla vakiosuorasyytytyspuolan sisäiset komponentit, jotta voitiin piirtää järjestelmän kytkentäkaaviot. Ulkomitat mitattiin työntömittatarkkuudella sekä 3D-mallin-
nusohjelmalla, jotta saatiin kaikki käännteissuunnittelussa tarvittavat parametrit ja voitiin suunnitella uusi vastaava tuote vakiosuorasyytytyspuolan tilalle.

Laboratoriomittauksiin tuotiin kyseinen ajoneuvomalli, josta mitattiin vakiosuorasyytytyspuolan ohjaussignaali ja moottorin venttiilikoneiston kotelon mitat. Suorasyytytyspuolan sähköisiä parametrejä mitattiin moottorin käydessä, jotta saatiin referenssimitat vakiosuorasyytytyspuolan sisäisen sähköjärjestelmän toiminnasta ja moottorin ohjainlaitteen ohjaussignaalin ominaisuuksista.

Käännteissuunnittelusta saaduissa referenssimitoissa ja kytkentäkaavioissa oli mahdollistettu Gallardon vakiosuorasyytytyspuolan simulointi ja syytytyskipinän generoiminen laboratoriossa funktiogeneraattorilla ja virtalähteellä ilman kyseisen ajoneuvon moottorin ohjainlaitteen signaalia. Näistä mittauksista voitiin laskea vakiosuorasyytytyspuolan kipinäenergia ja muut parametrit uuden vastaavan suorasyytytyspuolan sisäisen sähköjärjestelmän suunnitteluun.

Kun vakiosuorasyytytyspuolan mittojen ja sähköjärjestelmä oli käännteissuunniteltu, suunniteltiin uusi vastaava suorasyytytyspuola, joka mallinnettiin ja valmistettiin korvaamaan vakiosuorasyytytyspuola.

Uuden vastaavan suorasyytytyspuolan ohjainlaite suunniteltiin *KiCad*-ohjelmalla ja simuloitiin *Multisim*-ohjelmalla. Uuden suorasyytytyspuolan koteloointi ja kokoonpanotekniikka suunniteltiin ja simuloitiin *Catia V5* -ohjelmalla.

Kun uusi koteloointi ja sisäinen sähköjärjestelmä oli suunniteltu ja mallinnettu, kotelolle ja sähköjärjestelmälle suunniteltiin valmistus- ja kokoonpanotekniikka sekä simuloitiin kokoonpanosimulaatio mainituilla CAD-ohjelmilla (kuva 1). Uuden suorasyytytyspuolan koteloointi tulostettiin 3D-metallitulostimella ja sisäisen sähköjärjestelmän piirilevy PCB-tulostimella. Tulostetuista ja valmistetuista osista koottiin uusi vastaava suorasyytytyspuola ja asennettiin Lamborghini

Gallardon moottoriin. Moottori käynnistettiin uusilla vastaavilla suorasytytyspuolilla ja moottorin käydessä suoritettiin uuden suorasytytyspuolan mittauksia.

Vakiosuorasytytyspuola



Suunniteltu vastaava suorasytytyspuola



Kuva 1. Vakiosuorasytytyspuola ja uusi suunniteltu vastaava suorasytytyspuola

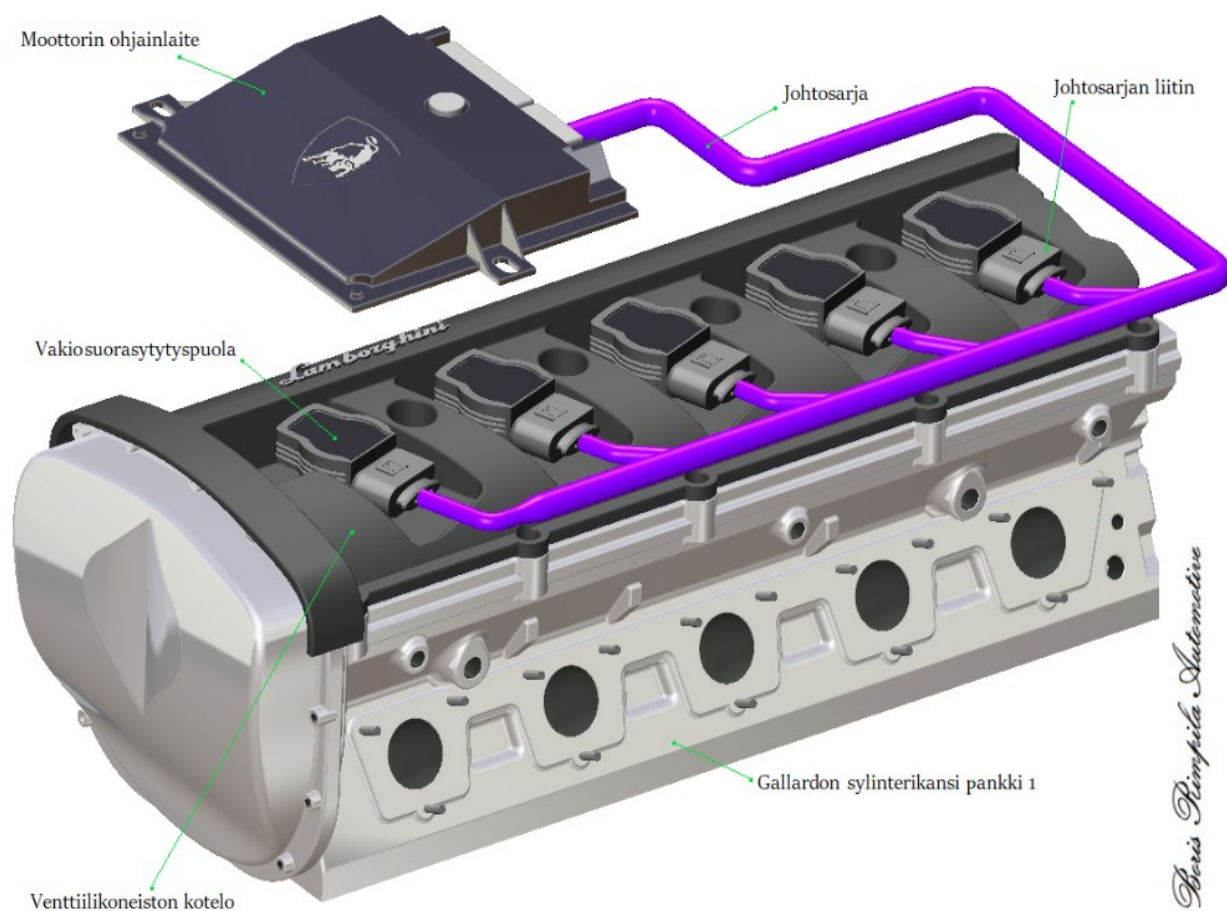
2 Gallardon suorasytytysjärjestelmän perusteet

2.1 Gallardon suorasytytysjärjestelmän toiminta

Moottoreissa, joissa käytetään suorasytytysjärjestelmää, on jokaisella sylinterillä oma suorasytytyspuola. Suorasytytyspuola tarkoittaa sytytystulpan päälle asennettavaa sytytyspuolaa. Gallardon moottorissa on 10 suorasytytyspuolaa, koska

moottori on V10-moottori (kuva 2). Suorasytytyspuola on sähköinen osa, joka asennetaan sytytystulpan päälle moottorin sylinterikannessa. Suorasytytyspuolaan liitetään liitin, jota syötetään moottorinohjainlaitteelta ja se tuo suorasytytyspuolalle käyttöjännitteen ja moottorinohjainlaitteen PWM-signaalin.

Kaikki erilliset suorasytytyspuolat sisältävät oman sähköjärjestelmän sisällään. Suorasytytyspuolan sisäinen sähköjärjestelmä koostuu ohjainlaitteesta sekä ensiö- ja toisiokelasta. Suorasytytyspuolaa ohjataan moottorinohjainlaitteella moottorista luettujen parametrien funktiona, joita lukee moottorinohjainlaite moottorin käydessä. Moottorinohjainlaite muodostaa PWM-signaalin, jolla ladataan ja katkaistaan suorasytytyspuolan ensiökelan virta ohjainlaitteen piirilevyllä olevalla mosfetilla kampiakselin kierrostaajuuden funktiona. Ensiökelaan ladattun virran katkaiseminen generoi sytytyskipinän sytytystulpan kärkiväliin. (Juhala ym. 2005: 399.)



Kuva 2. Gallardon V10-moottorin oikea lohko, pankki 1

2.2 Gallardon suorasytytyspuolan toiminta

Moottorin ohjainlaite kytkee suorasytytyspuolan ohjainlaitteessa olevan mosfetin päälle ladatakseen ensiökelaan virtaa. Suorasytytyspuolan sisällä oleva ohjainlaite ohjaa ensiökelaa, jonka ympärille muodostuu sähkömagneettikenttä virran kulkiessaan ensiökelassa. Tämä ensiökela on käämitetty toisiokelan päälle (kuva 3). Ensiökelassa kierroksia on vähemmän ja lanka on paksumpaa. Toisiokelassa kierroksia on enemmän ja lanka on ohuempaa. Näin syntyy *jännitettä nostava muuntaja*, jossa muutetaan ensiökelan korkea virta ja matala jännite toisiokelaan matalaksi virraksi ja korkeaksi jännitteeksi induktioilmiön avulla. Kelojen kierroslukujen suhde vaikuttaa jännitteiden suhteeseen.



Kuva 3. Suorasytytyspuolan sisäinen sähköjärjestelmä

Ensiökelan plus- ja miinusnapa ovat kytkettyinä suorasytytyspuolan ohjainlaitteen piirilevyn LGBT-komponenttiin ja toisiokelan langan päädyt ovat kytkettynä sytytystulpan plusnapaan ja piirilevyn miinuspotentiaaliin, jonka kautta toisiokelan miinusnapa maadoitetaan sylinterikanteen. Sytytystulpan ollessa asennettuna sylinterikanteen toisiokelan langan päädyt muodostavat piirin, jossa sytytystulppa on sarjassa toisiokelan kanssa. (Juhala ym. 2005: 351–352.)

Ensiökelan virran määrä ja käämien käämintäsuhde määrittää kipinäenergian ja sytytystulpan kärkivälin jännitteen. Virta latautuu ensiökelaan ja muodostaa magneettikentän ympärilleen. Kun virta katkaistaan tietyllä virran katkaisuaajalla, muodostaa ensiökelan EMF itseinduktanssin jännitepiikin sähkömagneettikentän kaatumisen funktiona. Tämä kaatuva sähkömagneettikenttä leikkaa kaatuessaan toisiokelan läpi ja generoi toisiokelassa kasvavaa jännitettä. Toisiokelan langan päätyjen ollessa kytkettyinä sytytystulpan kärkivälin plus- ja miinuselektrodeihin aiheutuu kärkivälissä nouseva jännite, kunnes kipinä lyö kärkivälin läpi (Suvanto & Laajalehto 2005: 179–180). Ensiövirran tarkoituksena on varata ensiökelaan tarpeeksi energiaa, jotta sähkömagneettikentän kaatumisen aikana sytytystulpan kärkivälin läpilyöntikestävyys ylittyy kaikilla moottorin kierroksilla ja sylinterin puristuspaineilla puristustahdissa. Tähän tarvitaan noin 4–20 millijoulea kipinäenergiaa. Sytytyskipinän syttyessä kärkiväliin se jää palamaan jäljelle jääneen sähkömagneettikentän kaatumisen ajaksi, jota kutsutaan kipinän palamisajaksi. Kun ensiökelan kipinäenergia on purkautunut sähkömagneettikentän kaatumisen tavalla, sammuu sytytystulpan kärkivälissä palava kipinä (kuva4). (Koivisto ym. 2005: 286.)



Kuva 4. Vakiosuorasyttytyspuolaan liitetty liitin ja sytytystulppa

2.3 Gallardon suorasytytyspuolan sisäinen ohjainlaite

Kuvan 5 mukainen sytytyspuolan sisään asennettu ohjainlaite koostuu komponenteista, jotka on juotettu piirilevyille. Levyllä on IGBT (eristyshilainen bipolaaritransistori) ohjauspiireineen. Ohjauspiiri koostuu häiriönsuodatuspiiristä, IGBT:n hilan ohjauspiiristä, suojaapiiristä ja itsetestauspiiristä. Tämä piirien kokoonpano mahdollistaa varman kytkennän ja katkaisun IGBT:lle virran lataamiseen ja katkaisemiseen ensiökelaan sekä itseinduktanssin aiheuttaman jännitepiikin kestävyden. (Rugged Automotive IGBTs for Reliable Electronic Ignition 2018: 60–62.)

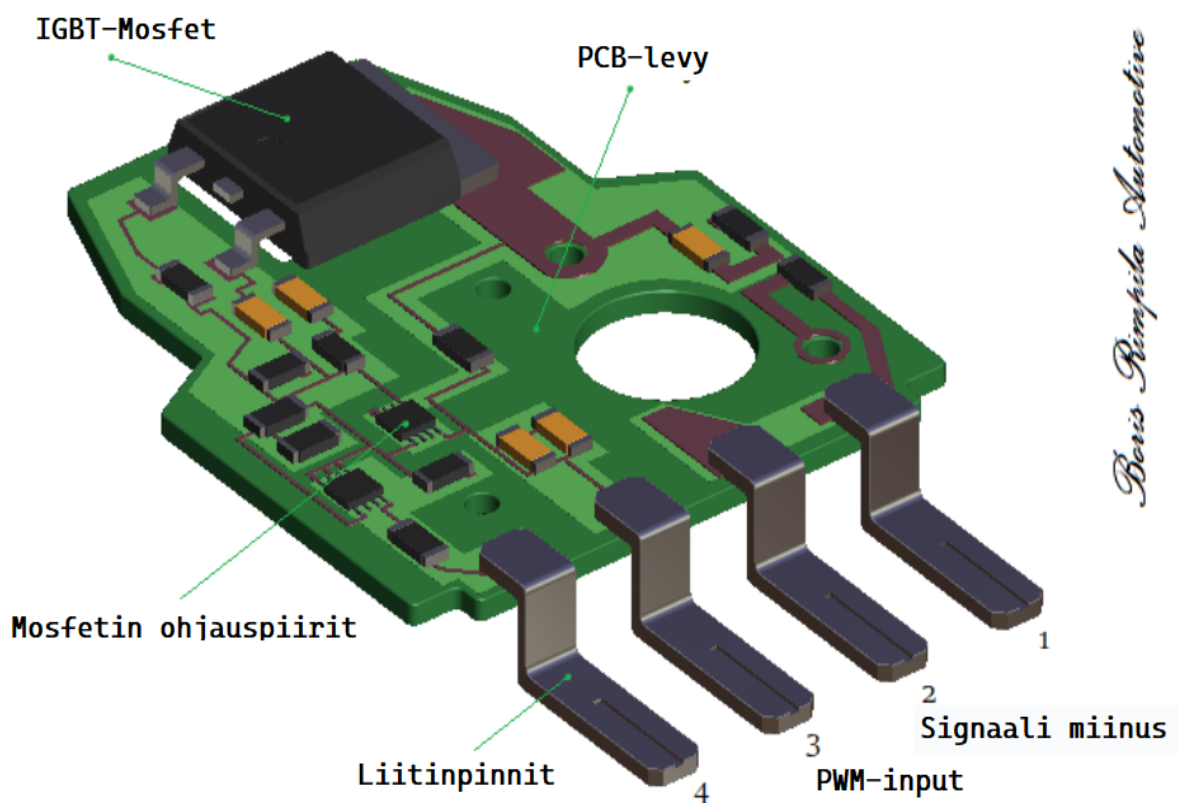
Häiriönsuodatuspiiri koostuu ohituskondensaattoreista, jotka ovat kytkettyinä piirilevyn käyttöjännitteeseen. Häiriönsuodatuspiiri minimoi piirilevylle tulevan kohinan, joka kantautuu käyttöjännitteen johtoa pitkin piirilevyyn moottorin generaattorista ja muista päälle kytketyistä auton sähkölaitteista.

Hilan ohjauspiiri koostuu operaatiovahvistimesta ja vahvistustransistoreista, joilla moottorin ohjainlaitteen PWM-signaali puskuroidaan ja vahvistetaan. Hilan ohjauspiiri puskuroidessaan signaalia minimoi itseinduktanssin ja itsekapasitanssin, joka muodostuu pitkän sähköjohton takia. Sähköjohto on tullessaan

moottorin ohjainlaitteelta suorasytytyspuolalle noin neljä metriä pitkä. Ohjauspiiri ohjaa IGBT:n hilan latausta ja purkamista IGBT:n hilan ollessa kapasitiivinen.

Suojapiiri koostuu zenerdiodeista ja vastuksista, jotka ovat kytkettyinä piirilevyn PWM-signaalin puskurointipiiriin ja transistorin hilaan. Suojapiiri estää korkeajännitteen kantautumisen moottorin ohjainlaitteeseen johtoja pitkin vikatilanteissa. Piirilevyltä mahdollisesti kantautunut korkeajännite voisi muuten rikkoa moottorinohjainlaitteen, jonka käyttöjännite on 3–15 voltia.

Itsetestauspiirin impedanssi muodostuu piirilevyllä olevan PWM-signaalin puskurointipiiriin ja signaalimaadoituksen välillä. Tämän impedanssin lukee moottorinohjainlaitteen OBD-järjestelmä moottorin virran päälle kytkeytyessä. Jos piirilevyltä irtoaa komponenttien jalkoja, sytytyspuolan liittimen johtoja katkeaa taikka liittinpinnit hapettuvat, OBD-järjestelmä lukee virheellisen impedanssin piirilevyltä ja ilmoittaa kyseisen sylintelin sytytyspuolan sytytyskatkoksia vikakoodilla.



Kuva 5. Suorasytytyspuolan ohjainlaite

2.4 Sytytystulpan toimintaperiaate

Sytytystulpan toimintaan kuuluu välittää sytytyspuolassa generoidun korkeajännitteen kärkivälille. Toisiojännitteen ollessa 20–40 kV sytytystulpan rakenteen on kestävä korkeajännitettä. Sytytystulppa koee ollessaan asennettuna palotilaan suuria lämmönvaihteluja -20 asteesta +1000 celsiusasteeseen. Sylinteripaineen ollessa palotilassa noin 100 baaria sytytystulpan on kestävä mekaaniselta rakenteeltaan ja tiivistettävä palotila ulkoilmasta. Sytytystulpan kärkivälin ominaisuudet on suunniteltu kestäväksi palotilan sylinteritapahtumia ja kulumista johtuen toisiojännitteen kipinästä. Ominaisuuksina kärkivälissä ovat materiaaliseokset ja pinnoitteet.

Sytytystulpan rakenne on suunniteltu moottorikohtaisesti. Rakenteisiin kuuluvat sytytystulpan sisäinen vastus, sytytystulpan mitat, kärkiväli, elektrodien määrä, keraamiset materiaaliominaisuudet ja metalliset materiaaliominaisuudet. (Automotive Handbook 2011: 15.)

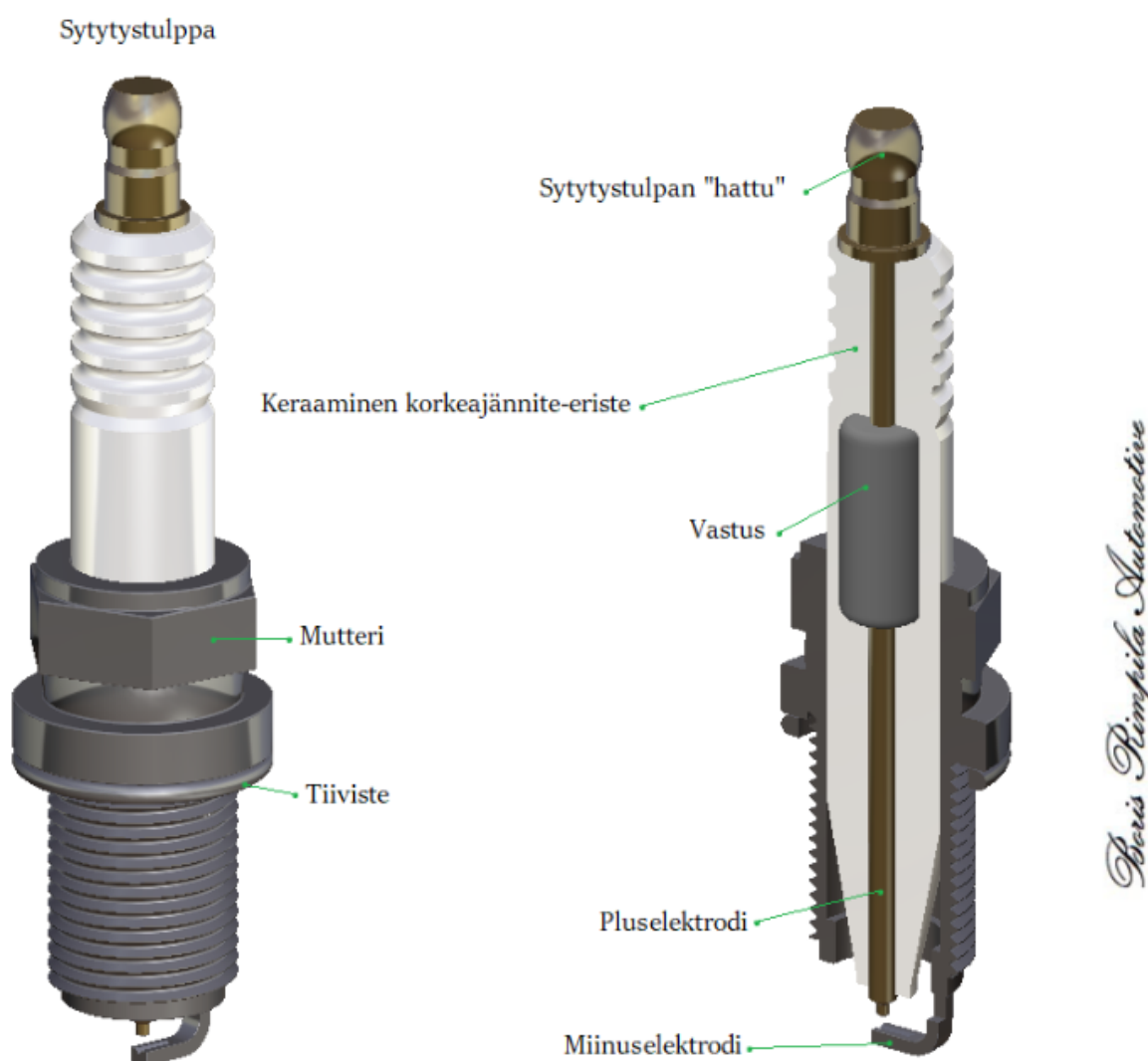
Sytytystulpan lämmitessä tulpan lämpöä johdetaan sylinterikanteen ja ulkoilmaan sytytystulpan kierteen, tiivistyksen ja tulpan hatun kautta. Sytytystulpan niin sanottua lämpöarvoa säädellään moottorikohtaisesti yllä mainituilla rakenteilla, jotta saadaan kylmä tai kuuma sytytystulppa. Sytytystulpan lämmöstä johdetaan pois noin 80 % kierteen kautta sylinterikanteen, noin 14 % tiivisteiden kautta mutteriin ja ulkoilmaan ja noin 6 % tulpan hatun kautta ulkoilmaan. Sytytystulppissa käytettäviä tiivistystekniikoita on kahta tyyppiä, joista yleisin on kierteen ja mutterin välissä oleva metallinen tiiviste taikka kierteen ja mutterin välissä oleva integroitu kartio sytytystulpan rakenteeseen. Täten sylinterikannen tiivistepinta on koneistettu sopimaan sytytystulppaan. (Koivisto ym. 2005: 318.)

2.5 Gallardon vakiosytytystulppa

Gallardon V10-moottorissa käytetään kuvan 6 mukaista PFR7G-9-sytytystulppaa, jossa P tarkoittaa platinasytytystulppaa, F osoittaa sytytystulpan kierteen halkaisijan ja pituuden, R tarkoittaa vastuksellista sytytystulppaa, 7 ilmoittaa lämpöarvon, G tarkoittaa kupariydintä ja 9 tarkoittaa 0,9 millimetrin kärkiväliä.

Sytytystulppa koostuu kolmesta osasta, jotka ovat metallirunko kierreosan kanssa, keraaminen korkeajännite-eriste ja sisällä kulkeva metalli, joka toimii sytytystulpan pluselektrodina. Sytytystulpan kärkivälin muodostaa kierreosaan juotettu miinuselektrodi ja posliiniosan sisällä kulkeva metalliosia.

Keraamisen osan sisällä olevan metalliosan kärkivälin pää on päällystetty platinapinnoitteella sytytystulpan kärkivälin käyttöiän pidentämiseksi.



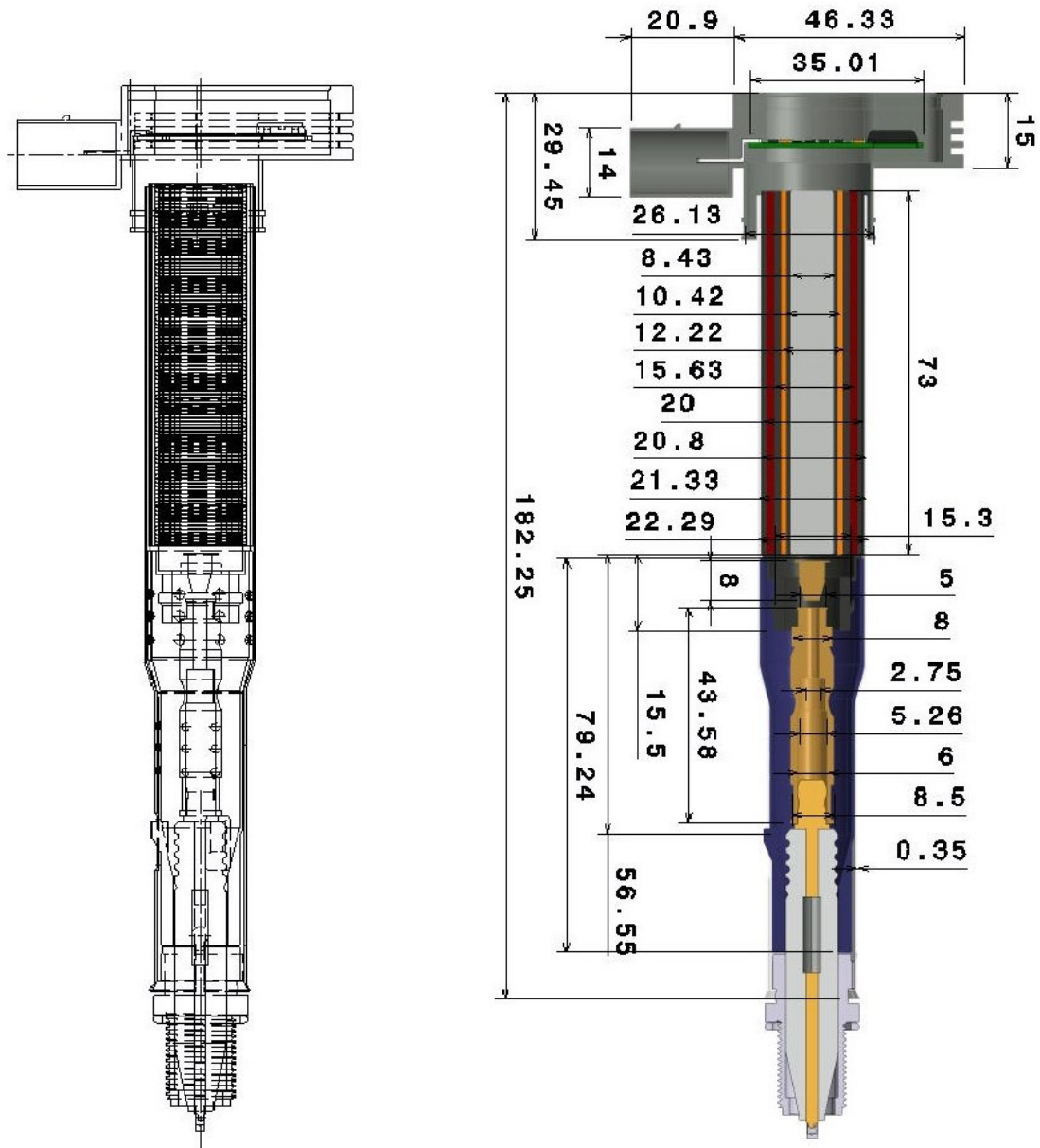
Kuva 6. Vakiosytytystulppa ja sytytystulpan poikkileikkaus

3 Gallardon suorasytytyspuolan käänteinen suunnittelu

3.1 Vakiosuorasytytyspuolan mittaaminen

Suorasytytyspuolalle suoritettiin käänteinen suunnittelu menetelmillä, joissa käytettiin suorasytytyspuolan mittaus- ja purkaustekniikoita. Mittauksina suoritettiin sähköisiä mittauksia oskilloskoopeilla ja muilla sähköisillä mittalaitteilla, jotta saataisiin suorasytytyspuolan sähköparametrejä ja kytkentäkaavioita suorasytytyspuolan sisäisen sähköjärjestelmän kytkennän piirtämiseksi.

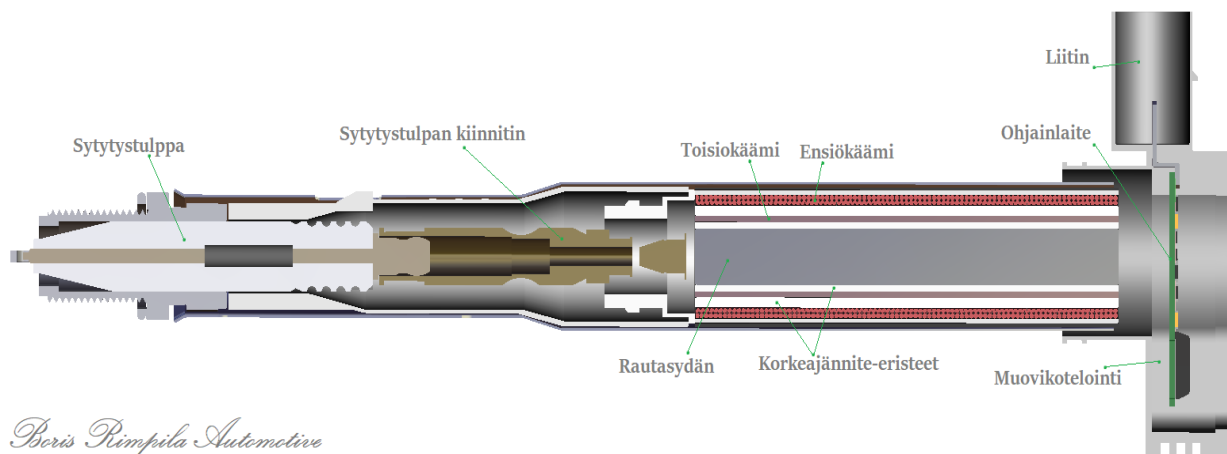
Sähkö- ja teknisistä mittauksista saaduilla parametreillä suorasytytyspuolasta oli mahdollista laskea kipinäenergian ja ensiö- ja toisiokelassa esiintyvät jännitteet moottorinohjainlaitteen ohjaussignaalin funktiona. Vakiosuorasytytyspuolan koteloinnin kaikki kriittiset referenssimitat mitattiin kuvan 7 mukaisesti 0,1 millimetrin tarkkuudella uuden tuotteen parhaan sopivuuden varmistamiseksi moottoriin. Ulkomitat mitattiin työntömitan tarkkuudella, kuten osan pituus, leveys, syvyys, halkaisijat, liittimen koko, liittimen syvyys ja liittimen pinnien mitat. Liitin käänteissuunniteltiin myös, sillä uuden osan tuli suoraan sopia Gallardon moottorinohjainlaitteen vakiojohtosarjan liittimeen.



Kuva 7. Vakiosuorasytytyspuolan sisä- ja ulkomitat

Sisämittojen mittaamiseksi vakiosuorasytytyspuola sahattiin pysty- ja poikkileikkauksella, jotta saatiin mitattua uuden mallinnettavan suorasytytyspuolan referenssimitat uuden suorasytytyspuolan asentamiseen vakiosytytystulpan päälle, ensiökelan ohjainlaitteen suunnitteluun, induktiokelojen suunnitteluun ja ohjainlaitteen kytkemiseen ensiö- ja toisiokelaan uuden tuotteen koteloinnin sisällä (kuva 8). Poikkileikkauksista tutkittiin mikroskoopilla ensiö- ja toisiokelan poikkileikkauksia ensiö- ja toisiokelan käämintäsuhteen laskemiseksi ja ensiö- ja toisiokelan lankojen halkaisijoiden mittaamiseksi. Poikkileikkauksista nähtiin

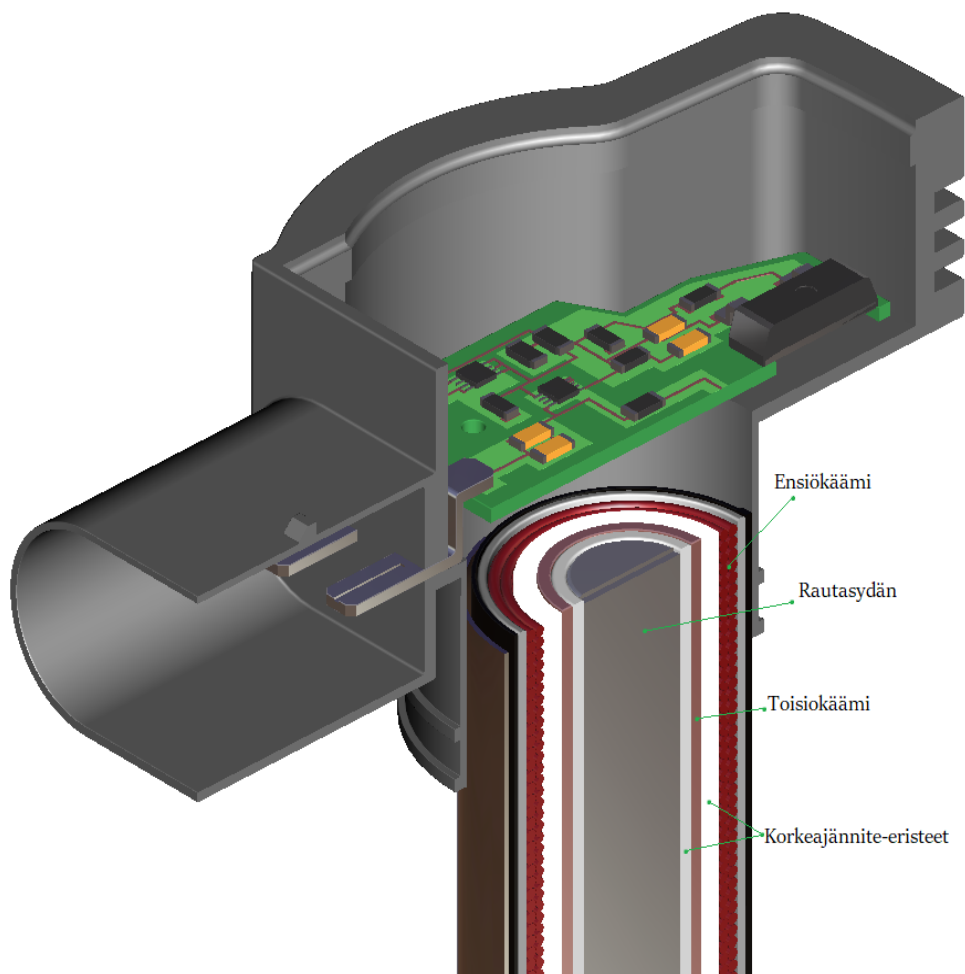
vakiosytytyspuolan materiaalit, kuten epoksivalut, metallit ja tekniset muovit, joista kotelointi ja suorasytytyspuolan kokoonpano koostui. Poikkileikkauksista paljastui tehtaan kokoonpanotekniikka ja menetit, joilla sisäinen sähköjärjestelmä tuotetaan ja kootaan yhteen kokonaisuuteen suorasytytyspuolaksi. (Ignition coil for internal combustion engine 2007: 1.)



Kuva 8. Vakiosuorasytytyspuolan poikkileikkaus

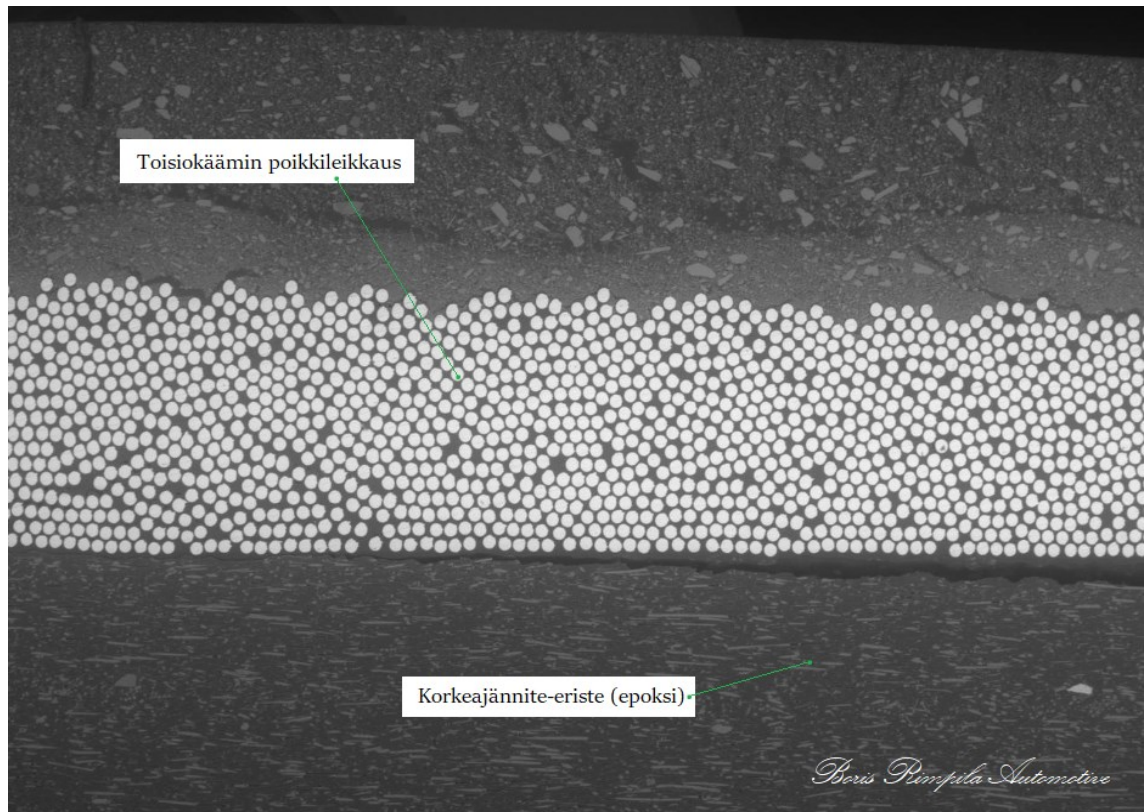
3.2 Vakiosuorasytytyspuolan ensiö- ja toisiokelan käänteinen suunnittelu

Sytytyspuolassa olevat induktiokelat ovat läpilyöntieristettyjä kuparilankoja. Toisiokela on emaloitua kuparilankaa, joka on käämitetty rautasydämen ympärille (kuva 9), ja ensiökela on emaloitua kuparilankaa, joka on käämitetty toisiokelan ympärille. Induktiokelojen emalointipinnoitteen lisäksi rautasydämen ja induktiokelojen välillä on korkeajännitettä eristävää läpilyöntieristettä. Ensiö- ja toisiokela käyttää samaa rautasydäntä permeabiliteetiksi niiden ollessa käämitettynä päällekkäin. Rautasydämellä tulee olla tarvittava permeabiliteetti induktiokeloille optimaaliseen muuntosuhteeseen, jossa ensiökelan virta ja jännite muunnetaan toisiokelan virraksi ja jännitteeksi.

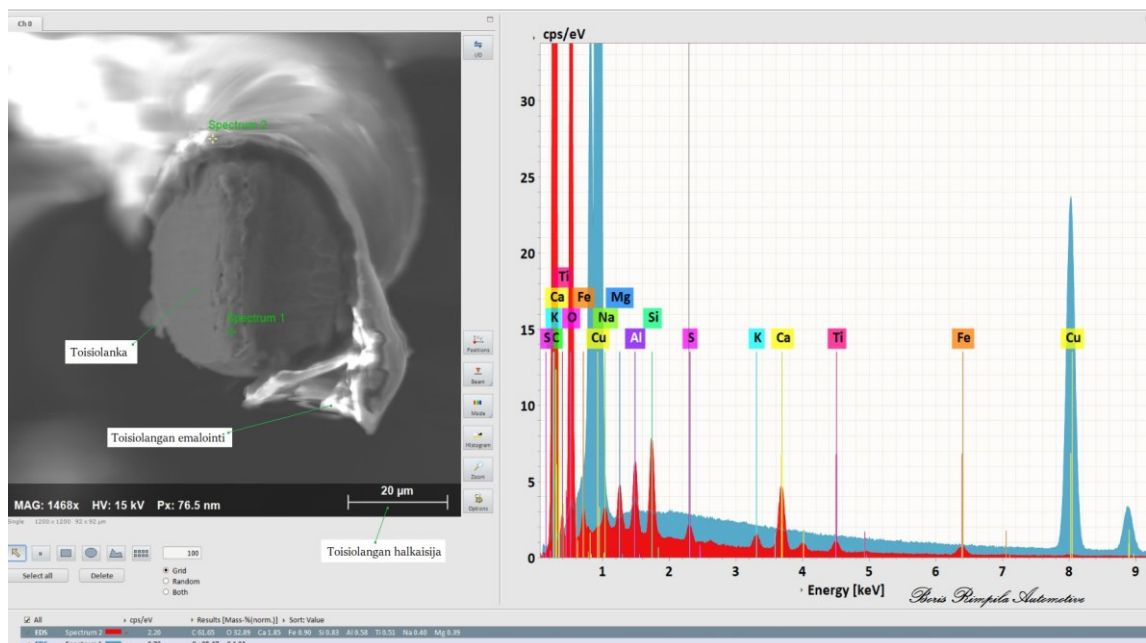


Kuva 9. Ensiö- ja toisiokela käämitettyinä rautasydämen ympärille

Käämien kierrosten lukumäärät, halkaisijat ja lankojen pituudet pystyttiin laskemaan vakiopuolan poikkileikkauksesta mittavälineillä ja mikroskoopeilla. Ensiökelan langan halkaisija saatiin mitattua tavallisella mikroskoopilla (kuva 12), ja se oli 0,93 millimetriä. Ensiökelan kierrosten lukumäärä saatiin laskettua samalla toimenpiteellä, ja niitä oli 170 kierrosta. Toisiokelan langan halkaisijan poikkileikkausta tutkittiin elektronimikroskoopilla (kuva 10 ja kuva 11), ja se oli 0,04 millimetriä. Toisiolangan kierrosten lukumäärä saatiin laskettua myös samalla menetelmällä, ja kierrosten lukumäärä oli 22 500 kierrosta. Täten käämintäsuhteeksi selvisi 132:1. Ensiö- ja toisiokelan metalliksi paljastui elektronimikroskooppimittauksissa kupari. Sen resistiivisyys on matalaa, joten syntyy induktiokeloissa vähäistä vastusta.



Kuva 10. Toisiokelan poikkileikkaus elektronimikroskoopilla

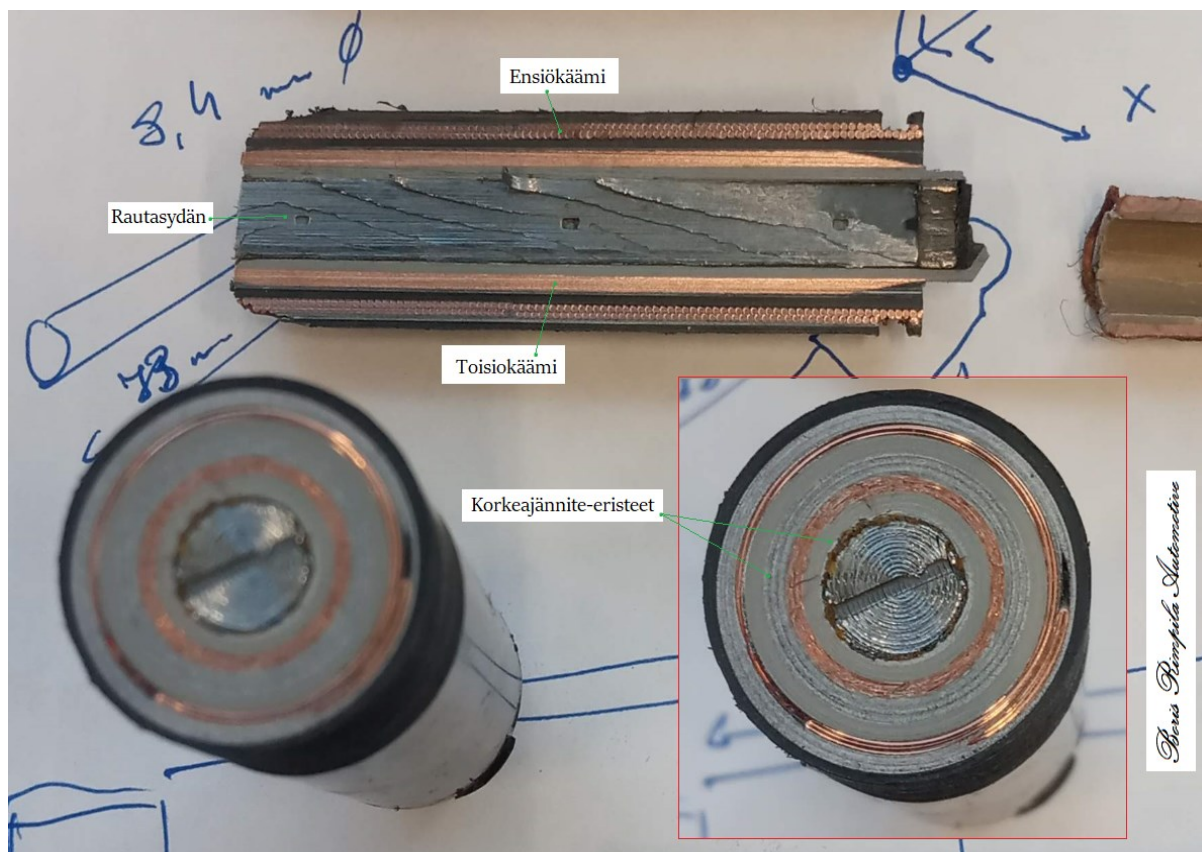


Kuva 11. Toisiolangan pään poikkileikkauksen materiaalispektri

Ensiö- ja toisiokelan induktanssi ja resistanssi mitattiin induktanssimittarilla ja vastusmittarilla. Ensiökelan induktanssiksi mitattiin 1,14 millihenryä ja

vastukseksi 0,6 ohmia. Toisiokelan induktanssiksi mitattiin 19,5 henryä ja 9,9 kilo-ohmia.

Ensiökelan oman 0,6 ohmin vastuksen lisäksi kokonaisvastus sarjassa ensiökelan transistorin ja johtojen piirissä oli 0,83 ohmia.

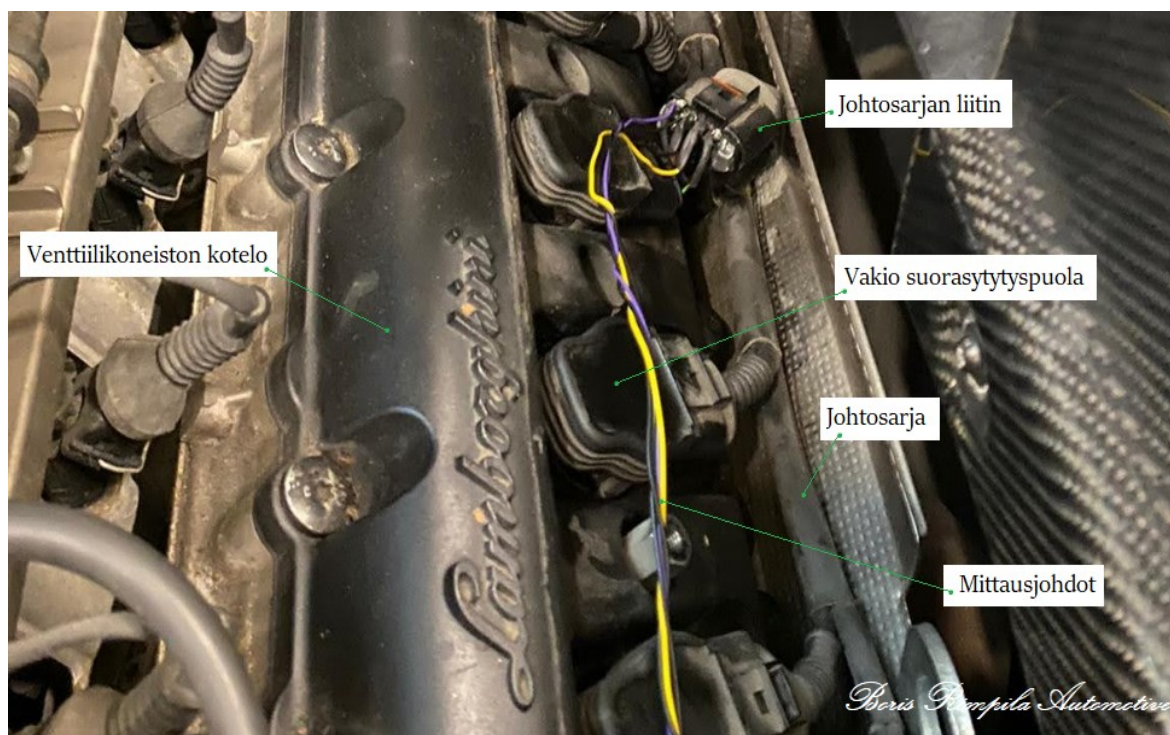


Kuva 12. Vakiosuorasyttytyspuolan käämintäosan poikkileikkaus z- ja y-akselilla

3.3 Vakiosuorasyttytyspuolan mittaaminen oskilloskoopilla

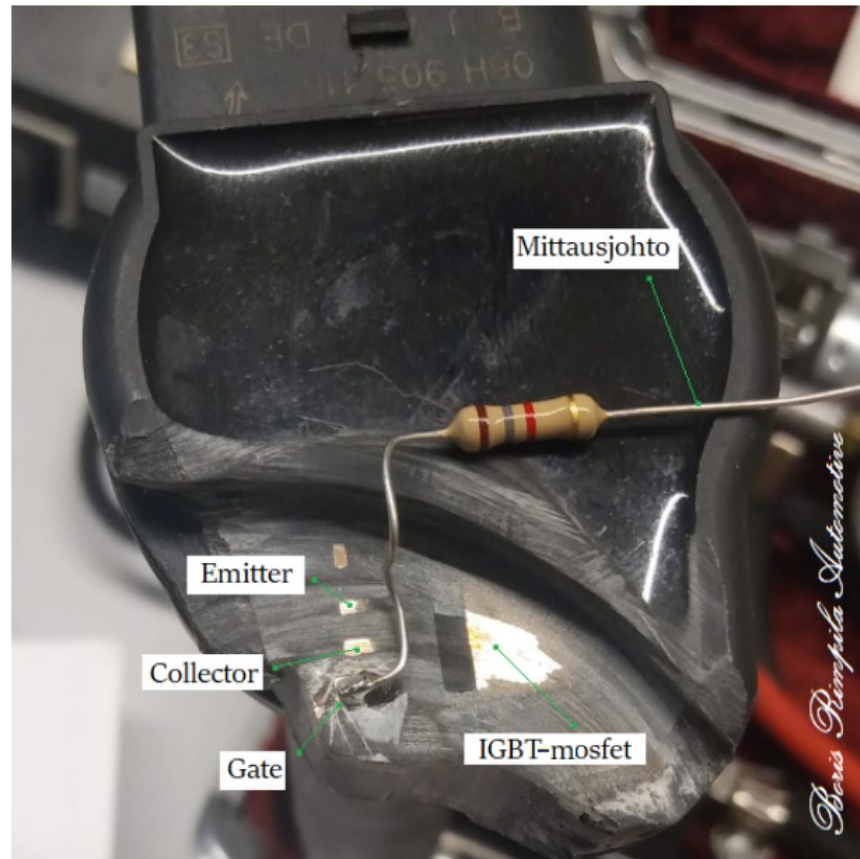
Vakiosuorasyttytyspuolan latausajan selvittämiseksi täytyi latausaika mitata Gallardon moottorin käydessä. Kuvan 13 mukaisesti suorasytityspuolan PWM-signaalin johtoon, joka tulee moottorin ohjainlaitteelta, kiinnityttiin moottorin käydessä oskilloskoopilla. Sytytyspuolan latausajaksi mitattiin 1,5 millisekuntia ajo-neuvon käydessä joutokäyntiä sekä korotettua joutokäyntiä. Mittauksessa selvisi, että kyseisen järjestelmän latausajan kesto ei muutu moottorin kierrosten funktiona. Moottorinohjainlaite lataa sytytyspuolaa vakiolatausajalla moottorin

kaikilla kierrosnopeuksilla. Moottorin käynnistäessä moottorinohjainlaite lataa sytytyspuolaa 2,0 millisekunnin latausajalla.

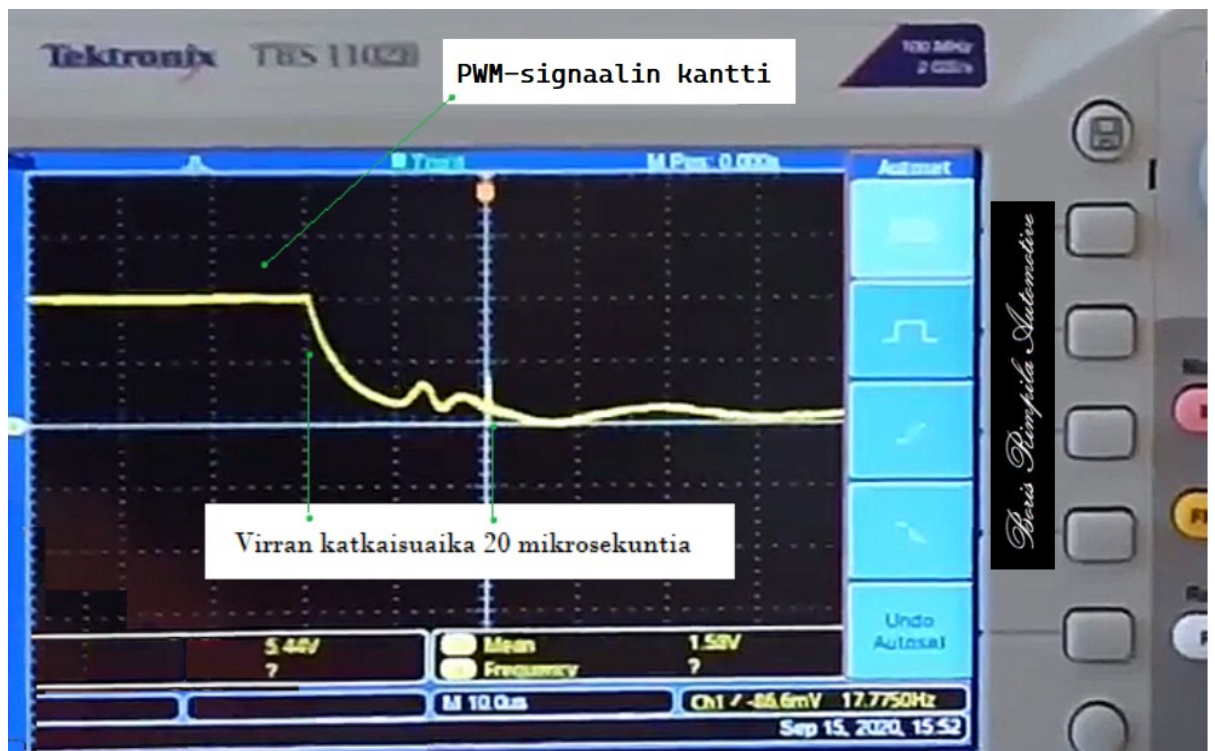


Kuva 13. Vakiosuorasytytyspuolan mittaus oskilloskoopilla

Suorasytytyspuolasta mitattiin ensiökelan EMF-jännitepiikki kiinnittämällä mittapää ensiökelan ohjaustransistorin kollektoriin kuvan 14 mukaisesti, josta saatiin maksimijännitteeksi 468 volttia ensiökelassa. Vakiosuorasytytyspuolan ohjainlaitteen ollessa valettu kovaan epoksiin täytyi epoksi poistaa jyrsimällä transistorin jalkojen kohdalta, jotta transistorin kollektorin pinniin voitiin juottaa mittausjohto. Ensiökelan virran katkaisuaajaksi saatiin 0,02 millisekuntia PWM-signaalin kuvaajasta (kuva 15) ja ensiökelan virran latauskuvaajasta ampeeripihdeillä.



Kuva 14. Kiinnittyminen vakiosuorasytytyspuolan IGBT:hen



Kuva 15. PWM-signaalin kantin loppu, skaala $10 \mu\text{s}$ per divisioona

Ensiökelan virta mitattiin ampeeripihdeillä käyttöjännitteen johdosta, josta saatiin virtaa 8,3 ampeeria (kuva 16). Ensiökelan virran latauksen kuvaajasta voidaan nähdä virran katkaisuaika myös pienentämällä aikaskaalaa virran vähene- misessä.



Kuva 16. Suorasytytyspuolan käyttöjännitejohdon mittaus virtapihdeillä

Tästä virrasta tulee vähentää ohjainlaitteen käyttöön menevä virta, jonka suuruus on noin 0,05 ampeeria. Suorasytytyspuolan PWM-kytkentätaajuus muuttui tavallisesti moottorin kierrosten funktiona.

Moottorin kiertäessä kyseisessä suorasytytysjärjestelmässä jokainen sylinteri sytytetään joka toisella moottorin kierroksella. Kun moottori kiertää 8250 kierrosta minuutissa, on yhden sylinterin sytytystaajuus 68,75 hertsiä. Moottorinohjainlaite sytyttää 8250 kierrostaajuudella yhden sylinterin 68,75 kertaa sekunnissa, josta saamme sytytyspuolan PWM-ohjaussignaalin. Tällä sytytystaajuudella yhden lataussyklin kestoajaksi saadaan 14,60 millisekuntia, josta 1,5 millisekuntia on ensiökelan latausaika. Tämä tarkoittaa, että kierrosnopeudella 8250 sytytyspuolan ensiökela on kytkettynä päälle 1,5 millisekuntia ja pois päältä 12,56 millisekuntia. Täten PWM-signaaliksi saadaan 10,27 prosentista PWM-signaalia.

Moottorinohjainlaitteen PWM-signaalin kantin korkeus nolasta on 5 volttia ja T1- aika 1,5 millisekuntia, ja taajuus määräytyy kampiakselin kierrostaajuuden funktiona.

Laboratoriomittauksissa mitattiin ensiökelan virraksi 8,3 ampeeria, ensiökelan EMF-itseinduktanssiksi 468 volttia, ensiökelan latausajaksi 1,5 millisekuntia, ensiökelan induktanssiksi 1,14 millihenryä, ensiökelan vastukseksi 0,83 ohmia, toisiokelan induktanssiksi 19,5 henryä, toisiokelan vastukseksi 9,9 kilo-ohmia, ensiövirran katkaisuaajaksi 0,02 millisekuntia, käyttöjännitteeksi 13,4 volttia, sytytyskipinän palamisajaksi 1,15 millisekuntia, PWM-signaalin taajuus ja PWM signaalin korkeudeksi 5 volttia nolasta (kuva 17).



Kuva 17. Lamborghini Gallardo laboratoriomittauksissa

3.4 Vakiosuorasyttytyspuolan kipinäenergian laskenta

Insinööriyössä keskitytään ensiökelan virrannousuun ja ohjainlaitteeseen, jolla ensiökela ohjataan, sillä ensiökelan energia on suoraan verrannollinen toisiokelan energiaan ja sytytyskipinän muodostumiseen. Kun tiedetään ensiökelan

induktanssi, ensiökelan resistanssi, ensiö- ja toisiokelojen käämintäsuhde, voimme laskea myös toisiökelan sähköiset parametrit.

Ensiökelaan latautunut energia on laskettavissa, kun tiedetään ensiökelan induktanssi ja virta ampeereina.

Syöttämällä laboratoriomittauksissa saadut arvot seuraaviin yhtälöihin, voimme laskea ensiökelaan varautuneen kipinäenergian, ensiökelan aikavakion, ensiökelan virran- ja jännitteenousun, ensiökelan tehon, sytytystulpan kärkivälin jännitteen ja ensiökelan EMF-itseinduktanssin seuraavasti:

Ensiökelan kipinäenergia

$$w = \frac{LI^2}{2}$$

jossa w on kipinäenergia jouleina, L on induktanssi 1,14 millihenryä ja I^2 on 8,3 ampeerin virran neliö. Lopputulokseksi saadaan kipinäenergia $w = 39,26$ millijoulea.

Ensiökelaan varautunut energia voidaan laskea myös matemaattisesti mittamatta ensiövirtaa käytännössä. Laskeakseen ensiökelaan varautunut energia matemaattisesti, tulee laskea ensiökelan aikavakio ja tietää ensiökelan käyttöjännite. Tästä voimme laskea ensiökelan virrannousu ensiökelassa latausajan funktiona seuraavilla yhtälöillä.

Ensiökelan aikavakio:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

jossa τ on aikavakio sekunteina, L on induktanssi 1,14 millihenryinä ja R on resistanssi 0,83 ohmia. Lopputuloksena saadaan aikavakio sekunteina, joka on $\tau = 1,38$ millisekuntia.

Aikavakion ollessaan 1,38 millisekuntia voimme laskea ensiökelan virrannousu, kun tiedetään ensiökelan maksimivirta seuraavilla yhtälöillä.

Ensiökelan maksimivirta:

$$I_m = \frac{U}{R}$$

jossa I_m on maksimivirta ampeereina, U on ensiökelan käyttöjännite 13,4 voltia ja R on ensiökelan piirin kokonaisvastus 0,83 ohmia. Lopputuloksena saadaan maksimivirraksi ensiökelassa $I_m = 16,14$ ampeeria.

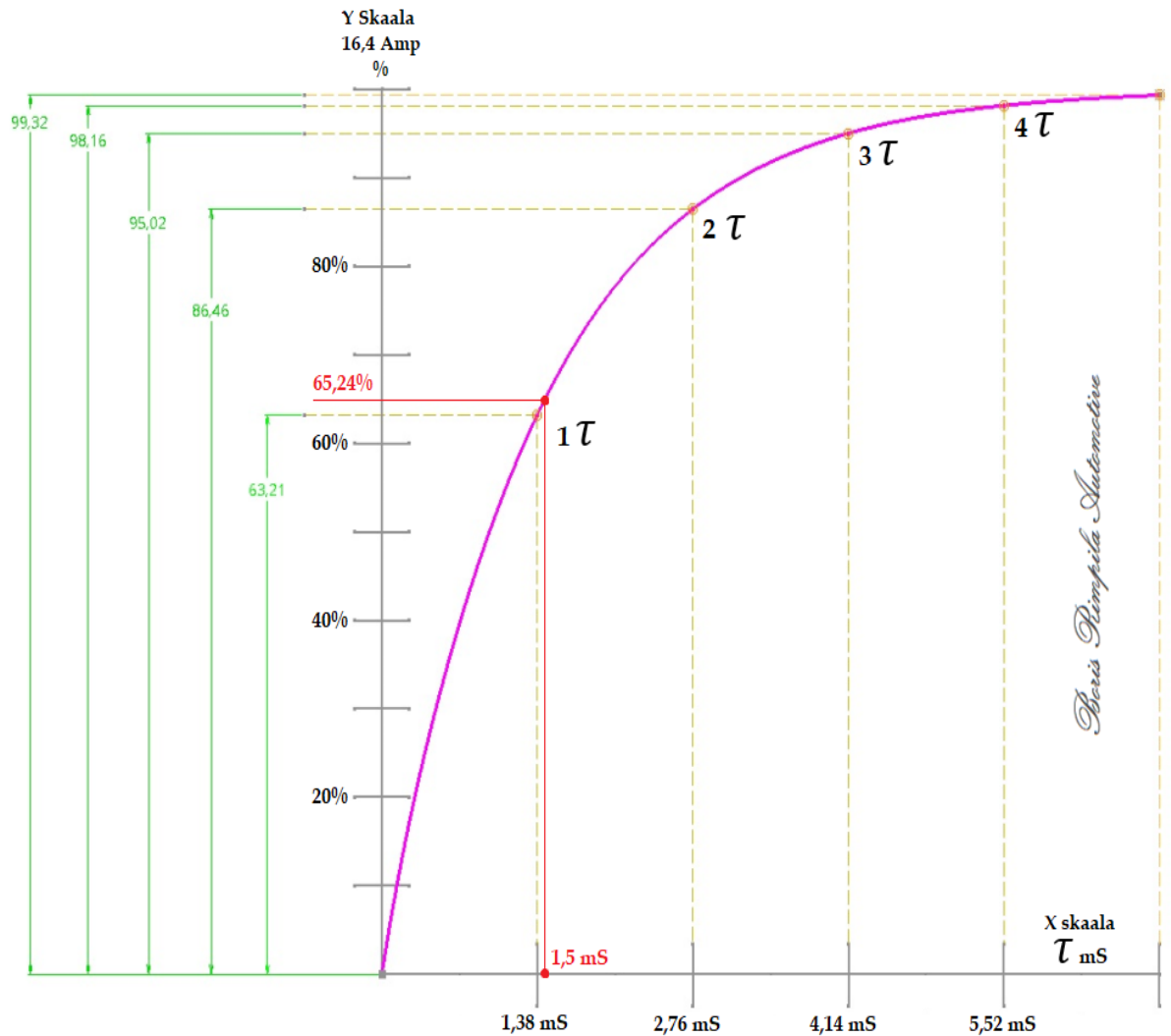
Virran nousu ensiökelassa:

$$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

jossa I on virta lopussa, I_m on virta alussa 16,14 ampeeria, e on 2,71828182..., t on latausaika sekunteina 1,5 millisekuntia ja τ on aikavakio 1,38 millisekuntia. Lopputulokseksi saadaan 10,7 ampeeria virtaa ensiökelan 1,5 millisekunnin latausajan aikana.

Laboratoriomittauksessa ja matemaattisesti lasketussa ensiökelan virran määrässä huomaamme 22,5 prosentin eron, joka syntyy mittauksessa tapahtuvasta muuttuvasta tekijästä. Muuttuvaksi tekijäksi voidaan laskea ajoneuvon akun kunto, sähköjohtojen pituudesta johtuva itseinduktanssi ja impedanssi ja mitalaitteista johtuva mittausvirhe. Ensiökelan virran nousu voidaan osoittaa logaritmisella käyrällä kuvassa 18, jossa Y-akselilla on ensiökelan maksimivirta ja X-akselilla aikavakiot. Ensiökelaan varautuu 65,24 prosenttia virtaa

maksimivirrasta 1,5 millisekunnin aikana, kun aikavakio τ on 1,38 millisekuntia. Logaritmisesta funktiosta huomaamme, että ensiökelaan varautuu neljän aikavakion aikana 98,16 prosenttia maksimivirrasta. Ladatessa ensiökelaa enemmän kuin neljällä aikavakiolla virran määrä ei suurene maksimivirrasta Ohmin lain mukaisesti, täten jatkolataamisen virta muuttuu lämmöksi.



Kuva 18. Ensiökelan virran nousu

Ensiökelan tehon voimme laskea, kun tiedämme ensiökelan yli olevan jännitteen latausajan funktiona. Ensiökelan jännitteen kuvaaja seuraa samaa logaritmisesta ilmiötä.

Jännitteen nousu ensiökelassa:

$$U = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

jossa U on jännite lopussa voltteina, U_0 on jännite alussa 13,4 voltia, 1 on vakio, e on 2,71828182..., t on aika latausaika sekunteina 1,5 millisekuntia ja τ on aikavakio sekunteina 1,38 millisekuntia. Lopputulokseksi saadaan 8,88 voltia jännitettä ensiökelan 1,5 millisekunnin latausajan aikana.

Ensiökelan teho:

$$P = UI$$

jossa P on teho watteina, U on jännite 8,88 voltteina ensiökelan yli ja I on virta 8,3 ampeeria. Lopputulokseksi saadaan ensiökelan tehoksi 73,70 wattia.

Sytytystulpan kärkivälin jännitteen voimme laskea käännteissuunnittelussa saaduilla ensiö- ja toisiokelan parametreilla.

Kärkivälin jännite:

$$U_s = N_s \frac{A_p \mu N_p}{L_s} \frac{dI_p}{dt}$$

jossa U_s on toisiokelan jännite voltteina, N_s on toisiokelan kierrosten lukumäärä 22500 kierrosta, A_p on sydämen poikkipinta-ala $4,2 * 10^{-5}$, μ on permeabiliteetti $6,3 * 10^{-3}$, L_s on toisiokelan induktanssi 19,5 henryä, N_p on ensiökelan kierrosten lukumäärä 170 kierrosta, dI_p on ensiökelan virta 8,3 ampeeria, ja dt on ensiövirran katkaisuaika 0,02 millisekuntia. Lopputuloksena saadaan 31 424 voltia jännitettä sytytystulpan kärkivälille.

Käänteisessä suunnittelussa yllä mainittuun kärkivälin jännitteen yhtälöön oli ratkaistu tai siitä oli mitattu:

N_S on toisiokelan kierrosten lukumäärä elektronimikroskoopilla, A_p on sydämen poikkipinta-ala työntömitalla, L_S on toisiokelan induktanssi induktiomittarilla, N_P on ensiökelan kierrosten lukumäärä mikroskoopilla, dI_P on ensiökelan virran muutos oskilloskoopilla, dt on virran katkaisuaika oskilloskoopilla, ja μ on permeabiliteetti ratkaistu matemaattisesti induktanssin yhtälöstä sijoittamalla mitatut parametrit induktanssin yhtälöön.

Ensiökelassa generoituva itseinduktanssin EMF-jännitepiikki voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä, kun tiedetään ensiökelaan varautunut virta, virran katkaisuaika ja ensiökelan itseinduktanssi.

Ensiökelan EMF-jännitepiikki:

$$\varepsilon = -L \frac{dI_P}{dt}$$

jossa ε on itseinduktiojännite voltteina, L on ensiökelan induktanssi 1,14 millihenryä, dI on ensiökelan virran muutos 8,3 ampeeria ja dt on ensiökelan virran katkaisuaika 0,02 millisekuntia. Lopputuloksena saadaan 630,8 voltia jännitettä EMF-jännitepiikissä.

Laboratoriomittauksessa ja matemaattisesti lasketussa ensiökelan EMF-jännitepiikissä saadaan 25 prosentin ero muuttuvan tekijän vuoksi. Muuttuvaksi tekijäksi voidaan laskea ajoneuvon akun kunto, sähköjohtojen pituudesta johtuva itseinduktanssi ja impedanssi ja mittalaitteista johtuva mittausvirhe.

3.5 Gallardon kampiakselin geometria sytytyksen funktiona

Laboratoriomittauksissa selvisivät moottorin kampiakselin asennot kierrostaajuudella 8250 suorasytytyspuolan toiminnan aikana. Mittauksissa selvinneestä 1,5 millisekunnin latausajasta voimme laskea kampiakselin asennot, joiden kohdalla moottorin ohjainlaite lataa ensiökela, ensiökelan latausaika katkaistaan ja missä kampiakselin asennossa sytytyskipinän palaminen loppuu, kun tiedetään sytytysennakko.

Gallardon kampiakselin geometrian laskeminen kierrostaajuudella 8250:

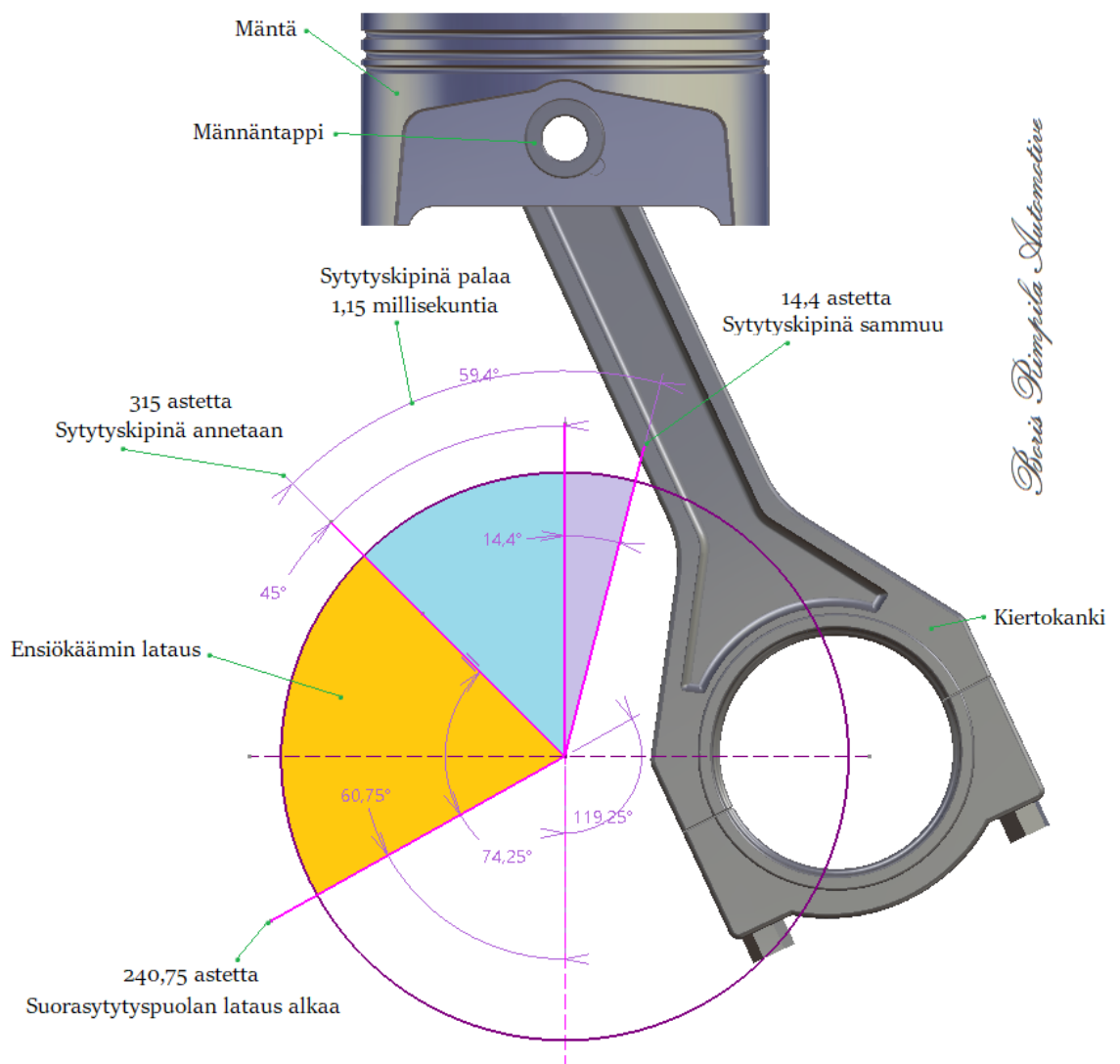
Kun moottori kiertää 8250 kierrosta minuutissa, kampiakseli tekee 137,5 kokonaista kierrosta sekunnissa eli yksi kokonainen kampiakselin kierros kestää 7,27 millisekuntia. Kun jaamme yhden kokonaisen kampiakselin kierroksen ajan keston 360 asteella, yhden asteen kiertymään kuluu 0,02 millisekuntia eli yhden millisekunnin aikana kampiakseli kääntyy 49,5 astetta moottorin kiertäessä 8250 kierrosta minuutissa.

Kun moottorin kampiakseli kiertää 8250 kierrosta minuutissa, on sytytyksen ennakko 45 astetta ennen yläkuoloa puristustahdin aikana. Tästä tiedämme, että sytytyskipinä annetaan kampiakselin 315 asteen kohdalla puristustahdissa. Kipinän antamiseen tietyllä kipinäenergialla tuli ladata ensiökela 1,5 millisekunnin latausajalla. Laskettiin, että moottorin kampiakseli kääntyi kierrosnopeuden 8250 aikana 49,5 astetta millisekunnissa. Tästä tiedetään, että kampiakseli kääntyy 74,25 astetta 1,5 millisekunnin aikana moottorin kiertäessä kierrosnopeudella 8250. Paljastuu, että moottorin ohjainlaite alkoi ladata ensiökela 240,75 asteen kohdalla, jotta kipinä tulee oikeaan aikaan 45 astetta ennen yläkuoloa (kuva 19). Vastaavasti ensiökelan lataamisen aloittaminen myöhästyy moottorin kierrosnopeuden laskiessa. (Automotive Handbook 2011: 393.)

Kun sytytyskipinä on syttynyt kärkiväliin 315 asteen kohdalla voimme laskea, kuinka monta astetta kampiakseli kääntyy kierrostaajuuden 8250 aikana kipinän palaessa 1,15 millisekunnin ajan. Moottorin kampiakseli on kääntynyt 56,92

astetta kipinän palamisen aikana, ja kampiakseli on 14,4 asteen kohdalla yläkuolokohdan jälkeen työtahdissa. Nollan ja 14,4 asteen välillä sytytyskipinä palaa vielä 0,29 millisekuntia työtahdin aikana. (Automotive Handbook 2011: 576.)

Kuvassa 19 on esitetty keltainen alue, joka on ensiökelan lataus, sininen ja lila alue puolestaan kipinän palamisaika kierrosnopeudella 8250. Kuvassa moottorin kampiakseli kääntyy myötäpäivään.



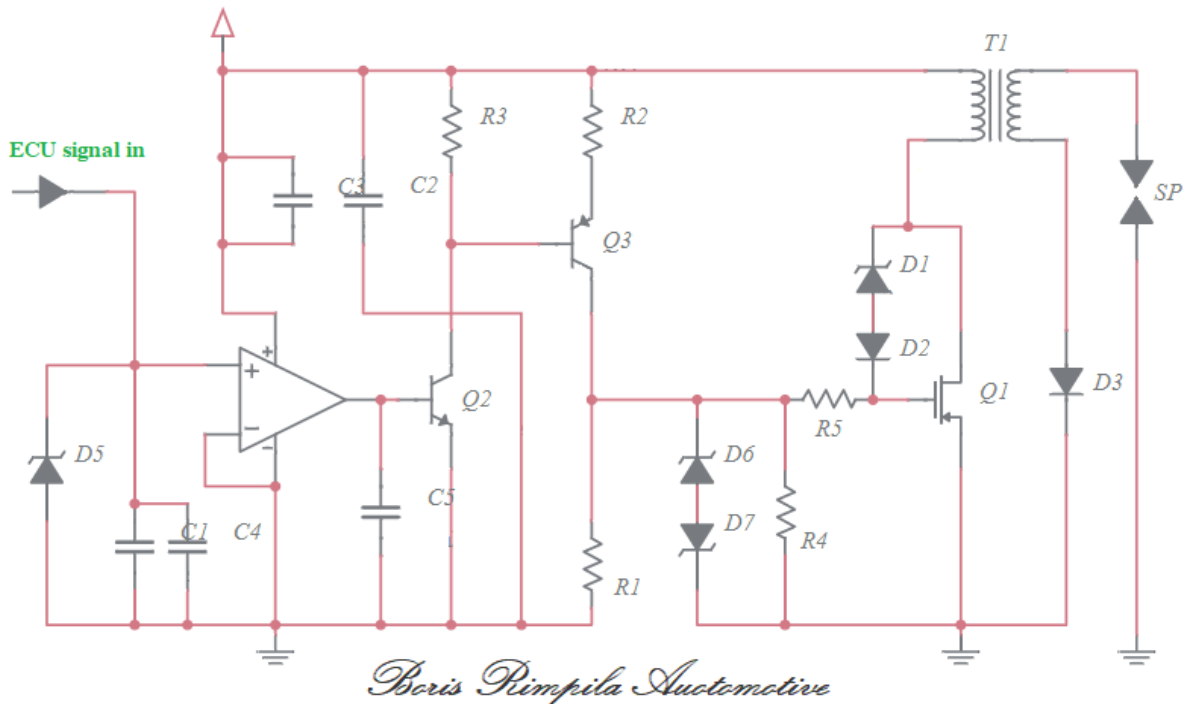
Kuva 19. Gallardon kampiakselin asennot moottorin kierrosnopeudella 8250

3.6 Vakiosuorasytytyspuolan ohjainlaite ja kytkentäkaavio

Vakiopuolan piirilevyltä käänteissuunniteltiin tehtaalla kytkentäkaavio ja piirilevyn komponenttien kytkentä. Ohjainlaite oli tehtaalla valettu kovalla epoksilla umppeen; se saatiin esille tasojuysimellä jysimällä ohjainlaittaan piirilevyn sivujen äärirajat esille ja madaltamalla epoksivalua päältä, kunnes piirilevy tuli näkyviin.

Levyllä olevassa transistorissa oleva numero jäi käänteissuunnittelussa ehjäksi, josta etsittiin datalehti. Transistorin datalehdessä paljastui, että vakio suorasytytyspuolan ohjainlaitteen transistori on IGBT-transistori, joka tarkoittaa korkeajännitteille suunniteltuja transistoria. Piirilevyltä sai tutkittua transistorin ohjauspiirit, jotka koostuvat suojapiiristä, suodatinpiiristä, hilan ohjauspiiristä ja itsetestauspiiristä. Piirejä yhdistäviä piirilevyn ratoja PCB-komponenttien välillä katsottiin mikroskoopilla käänteissuunnittelemiseksi ja levyn piirien keskinäisten kytkentöjen piirtämiseksi. Vakiosuorasytytyspuolan ohjainlaitteen kytkentäkaaviosta piirrettiin käänteissuunniteltu kytkentäkaavio, josta sai referenssiksi ensiökelan kytkentätyyli IGBT-transistoriin uuden ohjainlaitteen suunnitteluun ja PCB-komponenttien valintaan. (v5036s IGBT Datasheet 2009: 1.)

Käänteissuunnittelusta vakiosuorasytytyspuolan kytkentäkaaviosta paljastui, että suorasytytyspuolan ohjaus tapahtuu tavallisesti kuvan 20 mukaisesti kuten kaikissa transistorilla ohjatuissa sytytysjärjestelmissä, joissa sytytyspuolaa ohjataan ohjainlaitteen transistorilla. Sytytyspuolan ohjaamiseksi transistorilla ohjainlaitteen piirilevyllä täytyy olla transistorin ohjauspiiri.



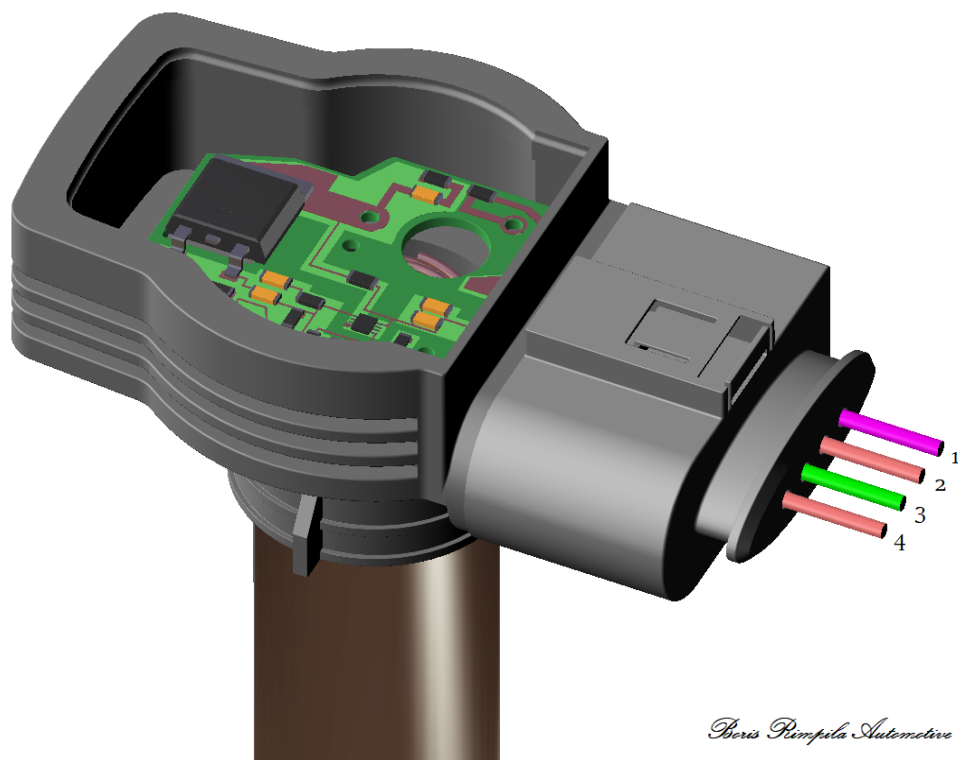
Kuva 20. Vakiosuorasytytyspuolan ohjainlaitteen kytkentäkaavio Q1 = IGBT

Ajoneuvon akun plusnavalta syötetään käyttöjännite piirilevylle, jolla aktivoidaan piirit odotustilaan ja jaetaan sama käyttöjännite myös rinnakkain ensiökelalle. Tämä johto on riittävän paksu johtaakseen ensiökelalle 8,3 ampeeria virtaa piirilevyä pitkin. Ensiökelan miinus on kytkettynä transistorin kollektorille ja odottaa pääsyä maihin. Transistorin emitteriltä menevän radan piirilevyllä, joka maadoitetaan, tulee myös kestää 8,3 ampeerin virtaa. Piirilevyn käyttöjännitteen miinus maadoitetaan omalla johdolla moottorin sylinterikanteen. Moottorin ohjainlaitteen PWM-signaalin johto on ohutta, sillä PWM-signaalin taajuus puskuroidaan ja vahvistetaan, joten johdon ei tarvitse johtaa virtaa. Piirilevyllä olevaa hilaan ohjauspiiriä kutsutaan tästä syystä korkeaimpedanssiseksi sisääntuloksi, koska operaatiovahvistimen inputpinneistä ei virtaa virta ulos eikä sisään. Moottorin ohjainlaitteen PWM-signaalin signaalimiinus maadoitetaan myös sylinterikanteen erillisenä johtona.

Piirilevyllä olevan IGBT-transistorin hilaan kytketään jännite transistorin avaamiseen. Transistorin sulkemiseksi ja ensiökelan virran katkaisemiseksi kytketään hila maihin hilalle varatun sähkövarauksen purkamiseksi. Hila on kapasitiivinen, joten se täytyy varata ja purkaa erikseen. Hilalla on oma ohjauspiiri, joka

koostuu operaatiovahvistimesta ja transistoreista. Operaatiovahvistin ohjaa transistoreita ja transistorit ohjaavat IGBT-transistorin hilaa.

Gallardon suorasytytyspuolan liittimeen (kuva 21) tulee ajoneuvon akulta plusjohto käyttöjännitteeksi, moottorinohjainlaitteen ohjaus PWM-signaali ohjaussignaaliiksi, käyttöjännitteen miinus maihin ja ohjaussignaalin miinus maihin. Tästä muodostuu neljänapainen liitin. Pinni 1 käyttöjännite, pinni 2 signaalimaa, pinni 3 moottorinohjainlaitteen signaali ja pinni 4 käyttöjännitteen maa. Liittimen pinnien 2 ja 3 väliltä on mitattavissa ohjainlaitteen itsetestauspiirin vastusarvo.

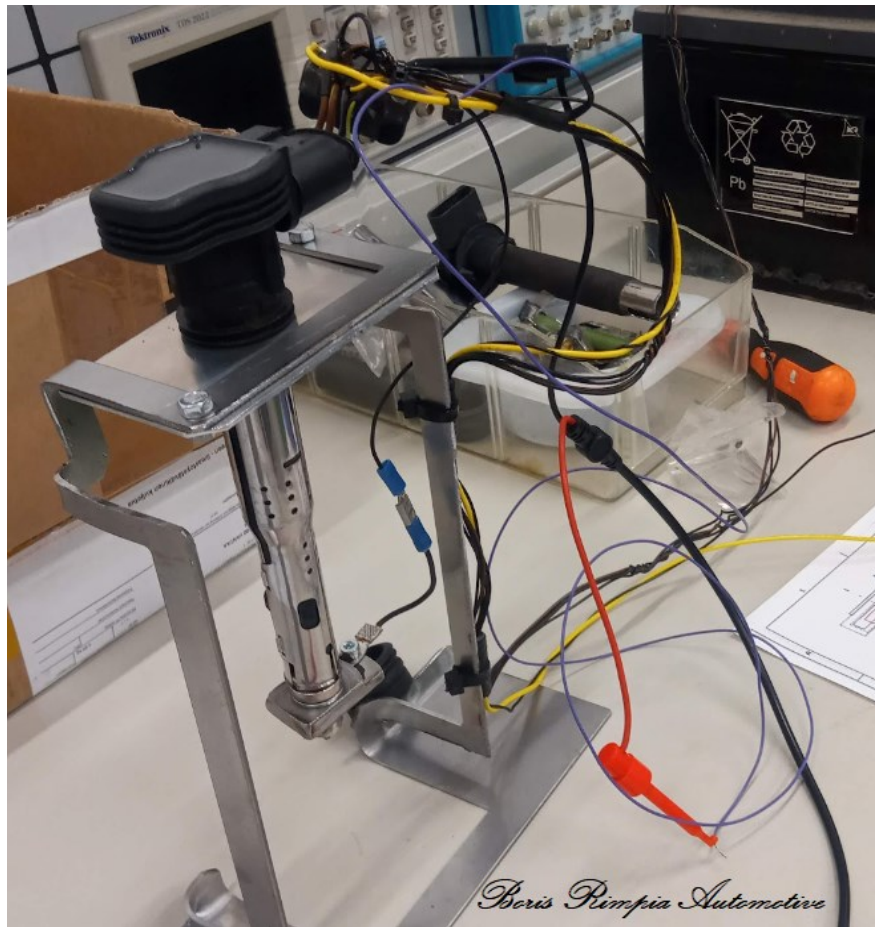


Kuva 21. Gallardon johtosarjan vakioliittimen pinout

3.7 Vakiosuorasytytyspuolan simulaatio ja kipinän tuottaminen

Kun vakiopuolan kaikki parametrit ja kytkentäkaaviot oli selvitetty, ja jotta vakiosuorasytytyspuolaa voitiin simuloida ja manipuloida laboratoriossa, kuvassa 22 kytkettiin funktiogeneraattorilla suorasytytyspuolan liittimen PWM-signaalin pinniin 3 1,5 millisekunnin latausaika ja 5 voltin kantin jännite nolasta, joka saatiin mitattua Gallardosta moottorin käydessä laboratoriomittauksissa. Tuloksena

saatiin ensiökelan virraksi 8,3 ampeeria, joka mitattiin ampeeripihdeillä ja oskilloskoopilla liittimen johdosta 1.



Kuva 22. Vakiosuorasytytyspuolan simulaatio funktiogeneraattorilla

Moottorin kierrosten funktiona suorasytytyspuolan kytkentätaajuus muuttuu noin viidestä hertsistä 68,75 hertsiin. Tämä tarkoittaa, että suorasytytyspuola generoi joutokäynnillä 5 kipinää sekunnissa ja 68,75 kipinää maksimikierroksilla, jotka ovat kaikki 39,26 millijoulen kipinäenergialla. Vakiosuorasytytyspuolaa simuloitiin kaikilla moottorin käyntitaajuuksilla funktiogeneraattorilla ajamalla joutokäynnin ja maksimikierrosten PWM-kytkentäsignaali suorasytytyspuolaan. Vakiosuorasytytyspuola tuotti joutokäynnillä ja maksimikierroksilla hallittua sytytyskipinää, jonka aikana vakiosuorasytytyspuola oli kytkettynä Gallardon vakiosytytystulpaan. Simuloimalla suorasytytyspuolaa vakiosytytystulpalla varmistettiin tulosten tarkkuus. Kun laboratoriomittauksissa funktiogeneraattorilla ja virtalähteellä saatiin tarvittavat mittaukset, parametrit ja tulokset vakiosuorasytytyspuolasta,

oli mahdollista suunnitella uusi vastaava parannettu suorasytytyspuola Gallardon moottoriin.

4 Uuden suorasytytyspuolan suunnittelu

4.1 Suorasytytyspuolan prototyypin suunnittelu

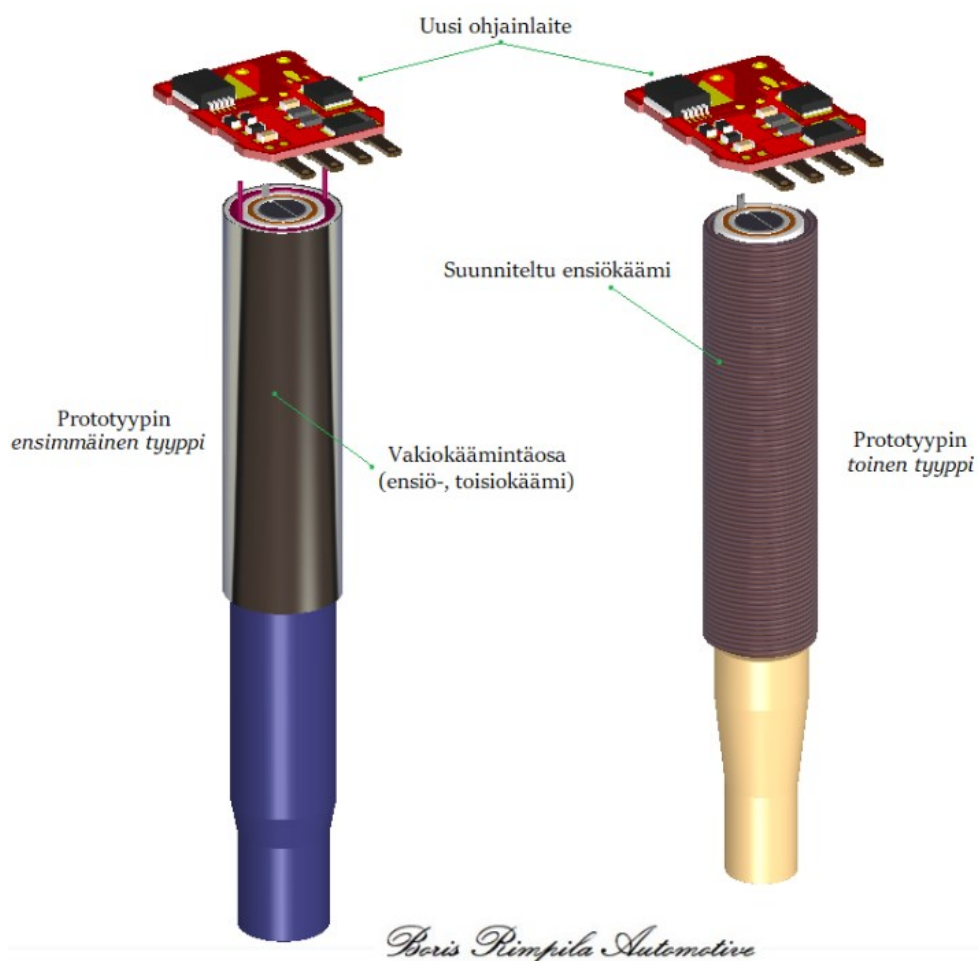
Vastaavan suorasytytyspuolan suunnittelussa ja tuottamisessa otetaan huomioon kriittiset parametrit, jotka takaavat uuden tuotteen asennuksen ja toimivuuden kyseisessä moottorissa sähköisesti ja mekaanisesti. Suorasytytyspuolan koteloinnin mitat suunniteltiin moottorin sylinterikanteen, venttiilikoneiston koteloon, vakiojohtosarjan liittimeen ja vakiosytytystulppaan sopiviksi (kuva 23). Sisäinen sähköinen järjestelmä suunniteltiin sopimaan Gallardon moottoriohjainlaitteen ohjaussignaaliin ja OBD-järjestelmän itsediagnostiikkaan.



Kuva 23. Uusi vastaava suorasytytyspuola

Uuden suorasytytyspuolan tarkoituksena oli olla parannettu tai tehokkaampi vakiosuorasytytyspuolaan verrattuna. Suorasytytyspuolan tehon lisäämiseksi suunnittelussa valmistettiin kahta prototyyppiä, joiden toiminnan perusteella valittiin uuden suorasytytyspuolan lopulliset ominaisuudet.

Prototyypeiksi valittiin suunnitella kaksi sytytyspuolatyyppiä (kuva 24). Prototyypin ensimmäisessä tyypissä valittiin käytettäväksi Gallardon vakiosuorasytytyspuolan käämintäosaa, joka sisältää ensiö- ja toisiokelan, joihin suunniteltiin uusi ensiökelan ohjainlaite. Toisessa tyypissä suunniteltiin uusi ensiökelan ohjainlaite sekä uusi ensiökela, joka käämitettiin Gallardon vakio-toisiokelan päälle.



Kuva 24. Prototyypin ensimmäinen tyyppi vasemmalla, toinen tyyppi oikealla

Ensiökelan suunnitteluvaiheen laskelmissa paljastui, että uuden toisiokelan käämittäminen tuottaa vähäistä kipinäenergian lisäämistä. Ensiökelan virran

suuruus ja käämintäsuhde toisiokelan suhteen määrittää toisiojännitteen. Sytytystulpan kärkiväliin syttyvän kipinän energiaa käytetään polttoaineseoksen sytyttämiseen ja kärkivälin korkeaa jännitettä sylinterin puristuspaineen läpilyömiseen.

Tästä päädyttiin suunnittelemaan prototyypin toiseen tyyppiin pelkkä ensiökela muuttamatta toisiokelaa.

Tehokkaamman suorasytytyspuola valmistamiseksi kyseisessä projektissa ei voida muuttaa Gallardon moottorin ohjainlaitteen vakiolatausaikaa. Latausajan on pysyttävä vakiona 1,5 millisekuntia tehdasasetuksilla.

Jotta ensimmäisen tyyppin ensiökelaan voidaan ladata enemmän virtaa moottorinohjainlaitteen vakiolatausajalla muuttamatta ensiökelan aikavakiota τ , tulee Gallardon moottorin ohjainlaitteen vakiolatausaikana ladata enemmän energiaa ensiökelaan uuden ohjainlaitteen kautta. Täten vakioensiökelassa kerkeää nousta virta korkeammalle 1,5 millisekunnin aikana.

Jotta toisen tyyppin ensiökelaan voidaan ladata enemmän virtaa moottorin ohjainlaitteen vakiolatausajalla, tulee toisen tyyppin ensiökelan aikavakioksi τ saada matalampi arvo kuin Gallardon vakioensiökelassa muuttamalla induktanssin ja resistanssin yhtälön tekijöitä. Täten toisen tyyppin ensiökelassa kerkeää nousta virta korkeammalle 1,5 millisekunnin aikana. (Ahoranta 2016: 227; Juhala ym. 2005: 354.)

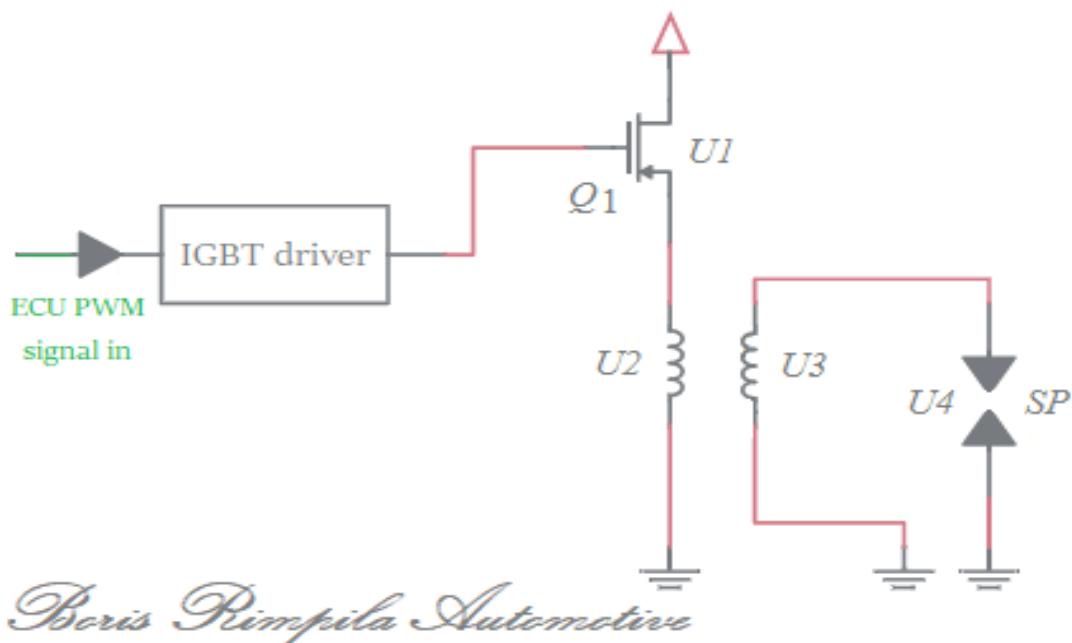
Molemmissa prototyypin malleissa suunniteltiin ensiökelaan varautuva virta korkeammaksi ohjainlaitteella tai ensiökelalla Gallardon 1,5 millisekunnin vakiolatausajalla. Tämän projektin tapauksessa ei ollut tarkoitus muuttaa Gallardon tehdasasetuksia.

Prototyypin ensimmäisen tyyppin suunnittelu:

Jotta oli mahdollista ladata enemmän virtaa pelkällä suorasytytyspuolan ohjainlaitteella, Gallardon valmiiseen käämintäosaan tuli selvittää mahdollisuus, jossa

ohjainlaitteen transistorin yli muodostuu vähemmän jännitehäviötä U_1 transistorin ja ensiökelan ollessaan sarjaan kytkettyinä. Kun ensiökelan miinuspotentialiaali on kytkettynä transistorin kollektoriin ja transistorin emitteri on maadoitettu, syntyy ensiökelan yli suurempi jännitehäviö U_2 ja transistorin yli pienempi jännitehäviö, kun ensiövirta kulkee ensiökelan ja transistorin läpi kuvan 25 mukaisesti. Mitä suurempi transistorin ylimenevä jännitehäviö on, sitä enemmän transistori lämpenee ja kuluttaa ensiöpiirissä kulkevaa energiaa. Kun transistorin yli oleva jännitehäviö U_1 saadaan pienemmäksi, suurenee ensiökelan yli oleva jännitehäviö U_2 ; täten aiemmin hukkaan mennyt energia siirtyy ensiökelaan ja ensiökelaan varautuu enemmän virtaa, josta nousee kipinäenergia.

Tähän prototyypin ensimmäiseen tyyppiin tuli suunnitella ohjainlaite ja sen PCB-komponenttien kokoonpano, niin että saavutetaan vähemmän jännitehäviötä transistorin yli.



Kuva 25. Ensiökela sarjaan kytkettyä transistorin Q1 kanssa

Prototyypin toisen tyyppin suunnittelu:

Jotta voidaan ladata enemmän virtaa ensiökelaan käämittämällä uusi ensiökela valmiin toisiokelan päälle, tulee laskea ensiökelalle matalampi aikavakio τ .

Uuden ensiökelan aikavakion suunnitteluun kaavalla $\tau = \frac{L}{R}$ sijoitetaan induktanssin L tilalle induktanssin yhtälö induktiokelalle ja resistanssin R tilalle resistanssin yhtälö kuparilangalle. Suorasytytyspuolan ulko- ja sisämitoissa ollessa noin 3 millimetriä käytettävää tilaa paksuus- ja pituussuunnassa muutoksia varten, voidaan suunnitella sytytyspuolan induktanssi ja resistanssi, josta syntyy mahdollisuus suunnitella tarvittava aikavakio kyseisen moottorin ohjainlaitteen 1,5 millisekunnin ohjaussignaaliin.

Ensiökelan induktanssi:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

jossa μ on sydämen permeabiliteetti, N^2 on langan käämien määrä, A on sydämen poikkipinta-ala ja l on sydämen pituus, jolle käämit on käämitetty. Lopputuloksena saadaan induktanssi henryinä.

Ensiökelan langan resistanssi:

$$R = \frac{\rho_c l}{A}$$

jossa ρ_c on langan kuparin resistiivisyys, l on kuparilangan pituus ja A on kuparilangan poikkipinta-ala. Lopputuloksena saadaan resistanssi ohmeina.

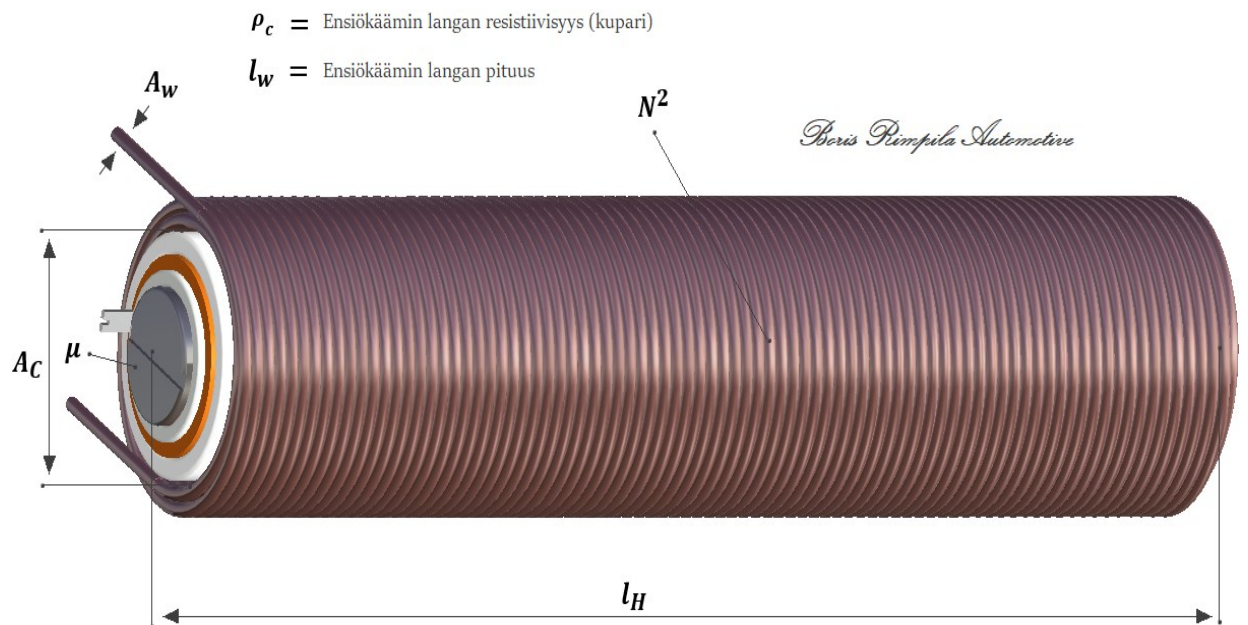
Sijoittamalla aikavakion τ yhtälöön yllä mainitut yhtälöt, muodostuu yhtälö, jonka tekijöillä voidaan suunnitella prototyyppiin sopiva aikavakio millisekunneina.

Aikavakion suunnittelyhtälö:

$$\tau = \frac{\left(\frac{\mu N^2 A_C}{l_H} \right)}{\left(\frac{\rho_C l_W}{A_W} \right)}$$

jossa μ on sydämen permeabiliteetti, N^2 on ensiökelan langan käämien määrä, A_C on ensiökelan poikkipinta-ala ja l_H on sydämen pituus, jolle käämit on käämitetty, jossa ρ_C on langan kuparin resistiivisyys, l_W on kuparilangan pituus ja A_W on kuparilangan poikkipinta-ala.

Yhtälöstä huomataan, että aikavakiota τ voi säädellä induktanssin yhtälön, permeabiliteetillä, ensiökelan kierrosten lukumäärällä, ensiökelan poikkipinta-alalla ja rautasydämen pituudella, joille ensiökelan kierrokset on käämitetty, sekä resistanssin yhtälön ensiökelan langan metallin resistiivisyydellä, langan pituudella ja kuparilangan halkaisijalla (kuva 26).

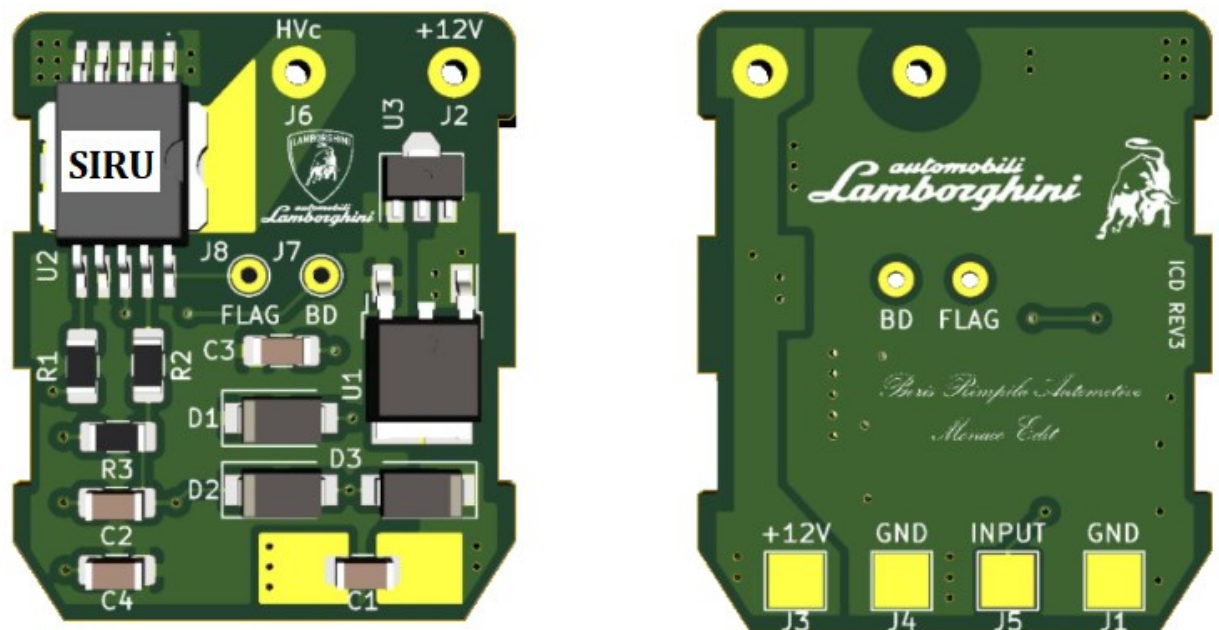


Kuva 26. Toisen tyypin uuden ensiökelan suunnittelu

4.2 Uuden suorasytytyspuolan ohjainlaitteen suunnittelu

Uuteen kotelointiin sopiva ohjainlaite ja piirilevy tuli mallintaa valmiin koteloinnin sisälle. Piirilevyn syvyyden ja leveyden koteloinnissa määrittää jäljelle oleva tila, joka syntyi koteloinnin mallinuksessa moottoriin sopivaksi. Ohjainlaitteen piirilevylle tuli suunnitella KiCad-ohjelmalla kaikki vastaavat piirit, kuten gaten ohjauspiiri, suojapiiri, suodatinpiiri ja itsetestauspiiri.

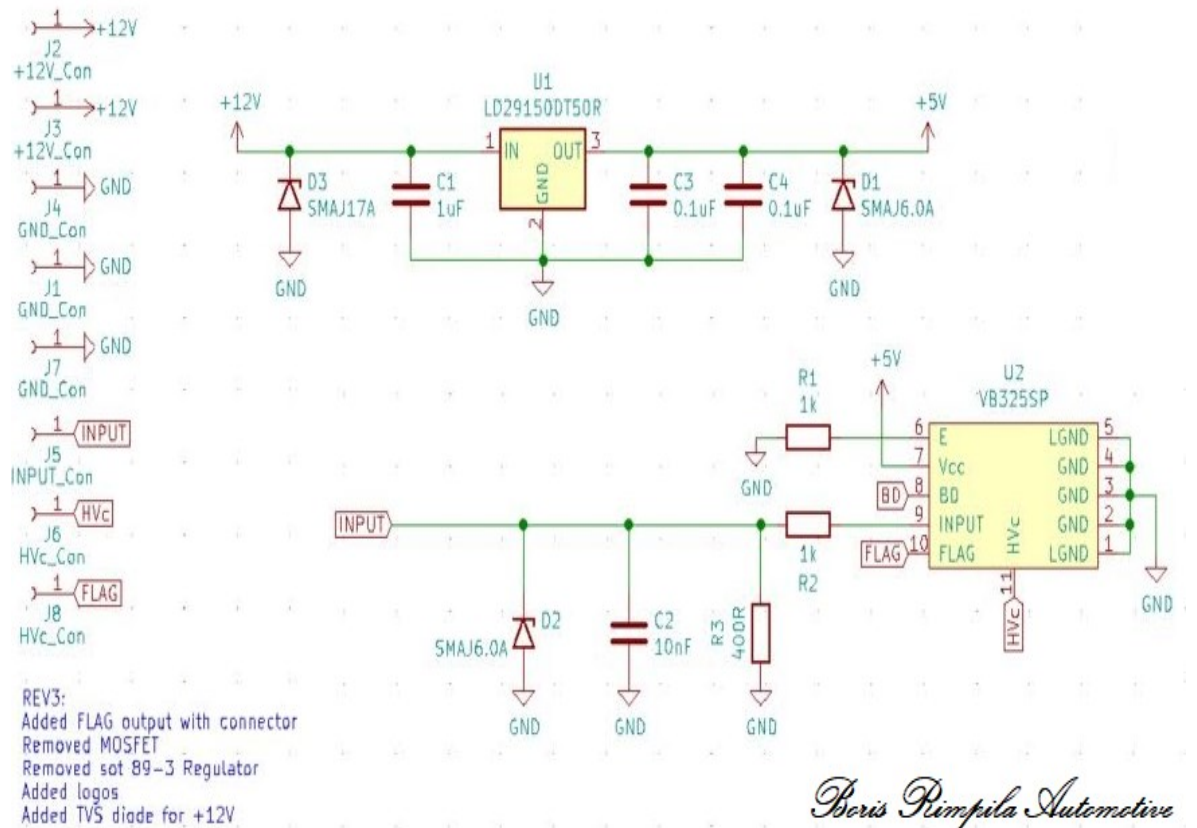
Piirilevylle ensiökelan ohjaukseen valittiin kuvan 27 mukainen siru, joka on suunniteltu ohjaamaan induktiokeloja sytytysjärjestelmissä. Kyseisen sirun datalehdessä ilmoitettu $R_{ds(on)}$ vastus ohmeina, joka on matalampi kuin vakiosuorasytytyspuolan IGBT:llä. Tästä on hyötynä matalampi jännitehäviö sirun yli (U2), minkä ansiosta jännite ensiökelan yli suurenee ladatessa enemmän virtaa ensiökelaan 1,5 millisekunnin latausajalla. Täten voimme ohjata kyseisellä sirulla Gallardon suorasytytyspuolan valmista käämintäosaa.



Boris Pimpila Automotive

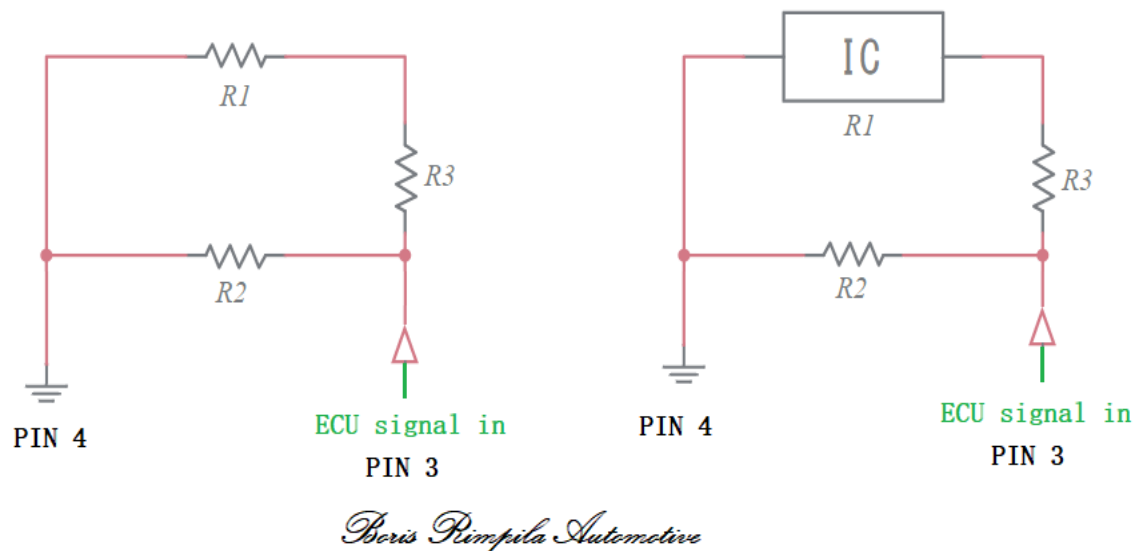
Kuva 27. Uusi suorasytytyspuolan ohjainlaite

Kuvan 28 mukainen uuden suorasytytyspuolan ohjainlaitteen sirun ominaisuuksina on rajata ensiökelan virta 10 ampeeriin. Sirun sisäisessä piirijärjestelmässä



Kuva 29. Uuden ohjainlaitteen kytkentäkaavio

Piirilevylle suunniteltiin itsetestauspiiri moottorin OBD-järjestelmän tarkistettavaksi, jotta moottorinohjainlaite ei tallenna vikakoodia taikka sytytä moottorin vikavaloa lukiessa piirilevyltä impedanssin, jota se vertaa kalibroituun impedanssiin. Tämä impedanssi saatiin käännteissuunnittelussa vakiosuorasyytytyspuolan piirilevyltä ja suunniteltiin kuvan 30 mukainen vastaava itsetestauspiiri tuottamaan saman impedanssin uuden suorasytytyspuolan piirilevylle. Moottorinohjainlaitteelta tuleva PWM-signaali sirun hilaan ohjataan ensimmäisenä itsetestauspiiriin, josta moottorinohjainlaite lukee oikean impedanssin välttämällä vikakoodia väärästä impedanssista, kun moottorin virta kytketään päälle.



Kuva 30. Itsetestauspiirin kytkentäkaavio

Itsetestauspiirin laskenta:

$$R_T = \left(\frac{1}{R_1 + R_3} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$$

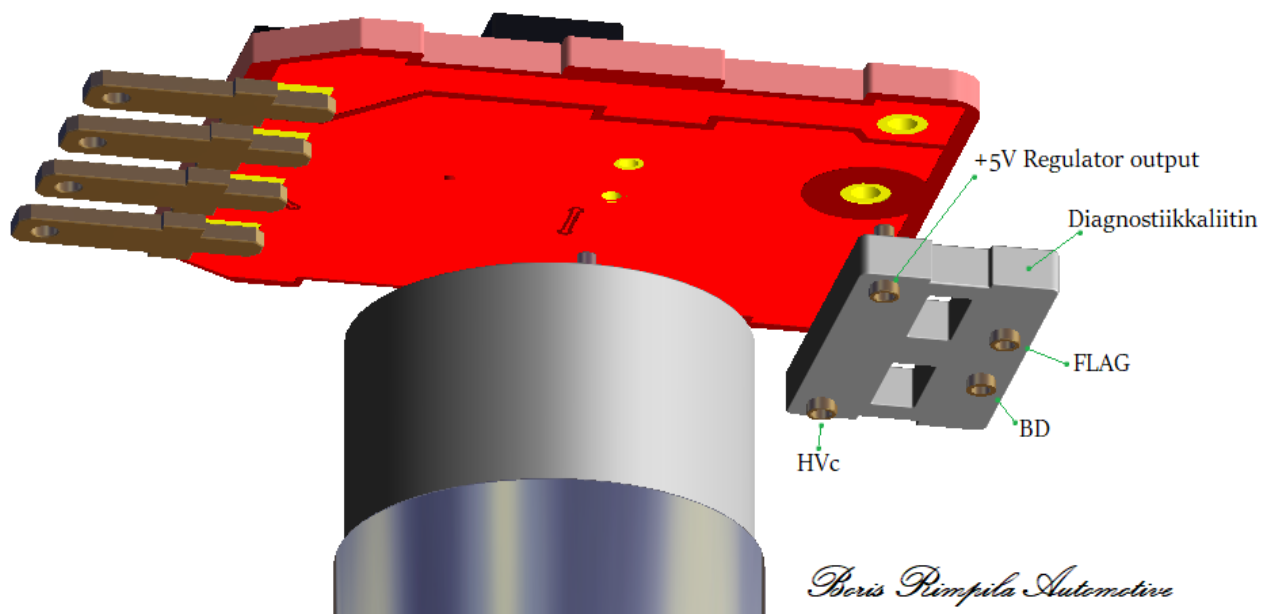
Koska sirun Vin-pinnin (Pin 3) ja maadoituspinnin (Pin 4) välillä on $R_1 = 1450$ ohmia vastusta ja sarjassa sisääntulon vastus $R_3 = 1000$ ohmia, täytyy lisätä rinnakkain vastus $R_2 = X$ ohmia. Yhtälökaavasta ratkaistaan R_2 vastus, jotta itsetestauspiirin vastukseksi R_T saadaan 389 ohmia. Täten moottorin ohjainlaite lukee uudesta ohjainlaitteesta oikean impedanssin kytkiessä moottorin sytytysvirta päälle eikä tallenna vikakoodeja. (Juhala ym. 2005: 33.)

Gallardon akulta tuleva käyttöjännitejohto ohjainlaitteelle jakautuu regulaattorille, piirille ja ensiökelalle rinnakkain, jota pitkin kantautuu kohinaa ajoneuvon käytössä olevista sähköjärjestelmistä. Akun käyttöjännite kytkeytyy PBC-levyllä ensimmäisenä suodatinpiiriin, joka koostuu ohituskondensaattoreista.

Sirun sisäisessä lohkoakaaviossa esitetään, kuinka Vin-pinniin syötetty PWM-signaali menee ensimmäisenä Schmitt-liipaisimeen puskuroitavaksi. Schmitt-liipaisimen käyttöjännitteen miinusnapa maadoitetaan E-nastan kautta

aktivoidakseen puskuroinnin. Schmitt-liipaisimen ulostulo signaali menee Drive-riin, joka ohjaa transistorin hilaa. Kun ensiökelan virta kulkeutuu R sense -vastuksen läpi, sen yli olevaa jännitettä mitataan jännitteenjakopiirillä ja syötetään Limiteriin ja Quasi prop Base current -piiriin, jossa säädetään virta 10 ampeeriin virran ylittäessään 10 ampeeria. Transistorin emitterin jännite syötetään toiseen Schmitt-liipaisimeen, josta se viedään diagnostiikka ulostulona FLAG-pinnistä, joka vahvistetaan transistorilla. Tästä pinnistä voimme lukea ensiökelan latautumisen varmistuksen. Thermal protection -piirin toiminnan tarkoitus on sammuttaa transistorin hila ylikuumentumistilanteessa. Reference-piiri on säädetty tuottamaan vertailujännitteet yllä mainittujen toimintojen mahdollistamiseksi.

Uuden suorasytytyspuolan ohjainlaitteeseen suunniteltiin diagnostiikkamahdollisuus (kuva 31), jolla mahdollistetaan ohjainlaitteen lukeminen moottorin käydessä. Koska vakiosuorasytytyspuolan ohjainlaite on valettu kovaan epoksiin, ohjainlaitteen lukeminen ei ole mahdollista.

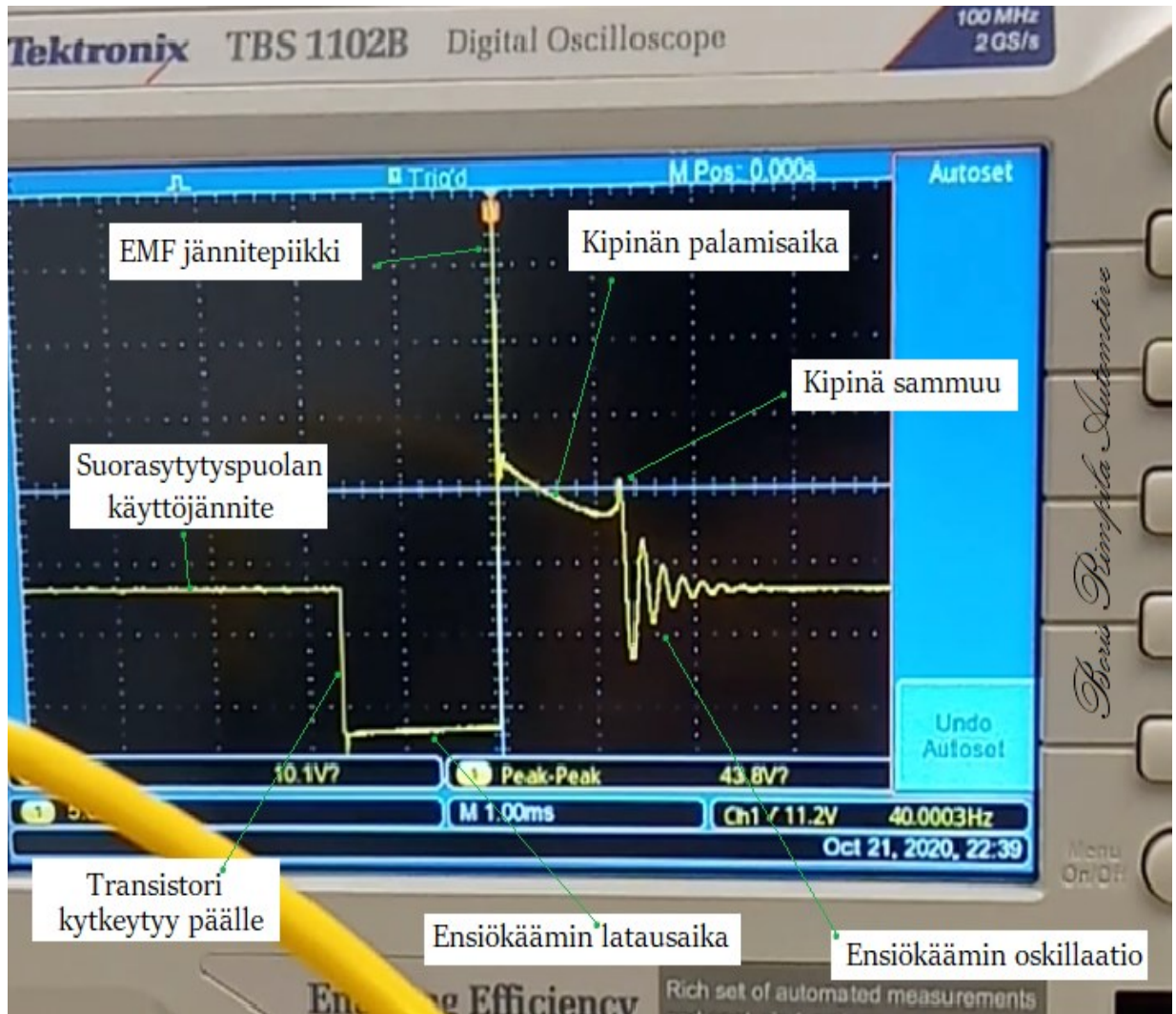


Kuva 31. Uuden ohjainlaitteen diagnostiikkaliitin

Uuden ohjainlaitteen piirilevyiltä luettavat parametrit viedään koteloinnin ulkopuolelle diagnostiikkaliittimeen. Lukumahdollisuuden etuina moottorin käydessä

on tutkia suorasytytyspuolaa, moottoria tai ohjausjärjestelmää vikaantumisen tilanteessa. Diagnostiikkaliittimeen voidaan kiinnittyä oskilloskoopilla tai muulla lukulaitteella ja lukea ohjainlaitteelta ensiökelan kuvaaja, piirin FLAG- output, regulaattorin käyttöjännite ja ulostulosignaali. Diagnostiikkaliittimen kautta voidaan myös lukea ensiö- ja toisiokelan induktanssi ja resistanssi ja myös testata sirun sisäisen transistorin toimintaa kytkemällä BD-pinniin jännite. Ensiökelan kuvaajasta näkyy moottorin käydessä ensiökelan latausaika, EMF-maksimijännite, sytytyskipinän palamisaika ja jälkioskillaatio. Ensiökelan latausajasta nähdään virran lataamisen toimivuus, EMF-maksimijännite määräytyy puristuspuheen funktiona, kipinän palamisajasta nähdään palotapahtuman puhtaus ja mahdollinen nakutus, ja jälkioskillaatiosta näkyy ensiökelan oskillaatio, jonka oskillaatioiden määrä osoittaa ensiökelan kuntoa.

Kuvan 32 oskilloskoopin ruudusta näkee uuden suorasytytyspuolan ensiökelan kuvaajan. Kuvan ruutu on asteikolla 1 millisekunti per divisioona. Kuvasta 32 käy ilmi, että suorasytytyspuolaa ladataan 1,6 millisekunnin ajan, EMF-jännitepiikin korkeus on 438 voltia ja kipinän palamisaika on 1,2 millisekuntia. Kipinän palamisen käyrässä ei näy häiriöitä, kuten kohinaa tai piikittelyä. Kipinän sammumisen jälkeen näemme ensiökelan oskillaatiota, joita normaalisti esiintyy 4–5 kertaa.



Kuva 32. Uuden suorasytytyspuolan ensiökelan jännitekuvaaja

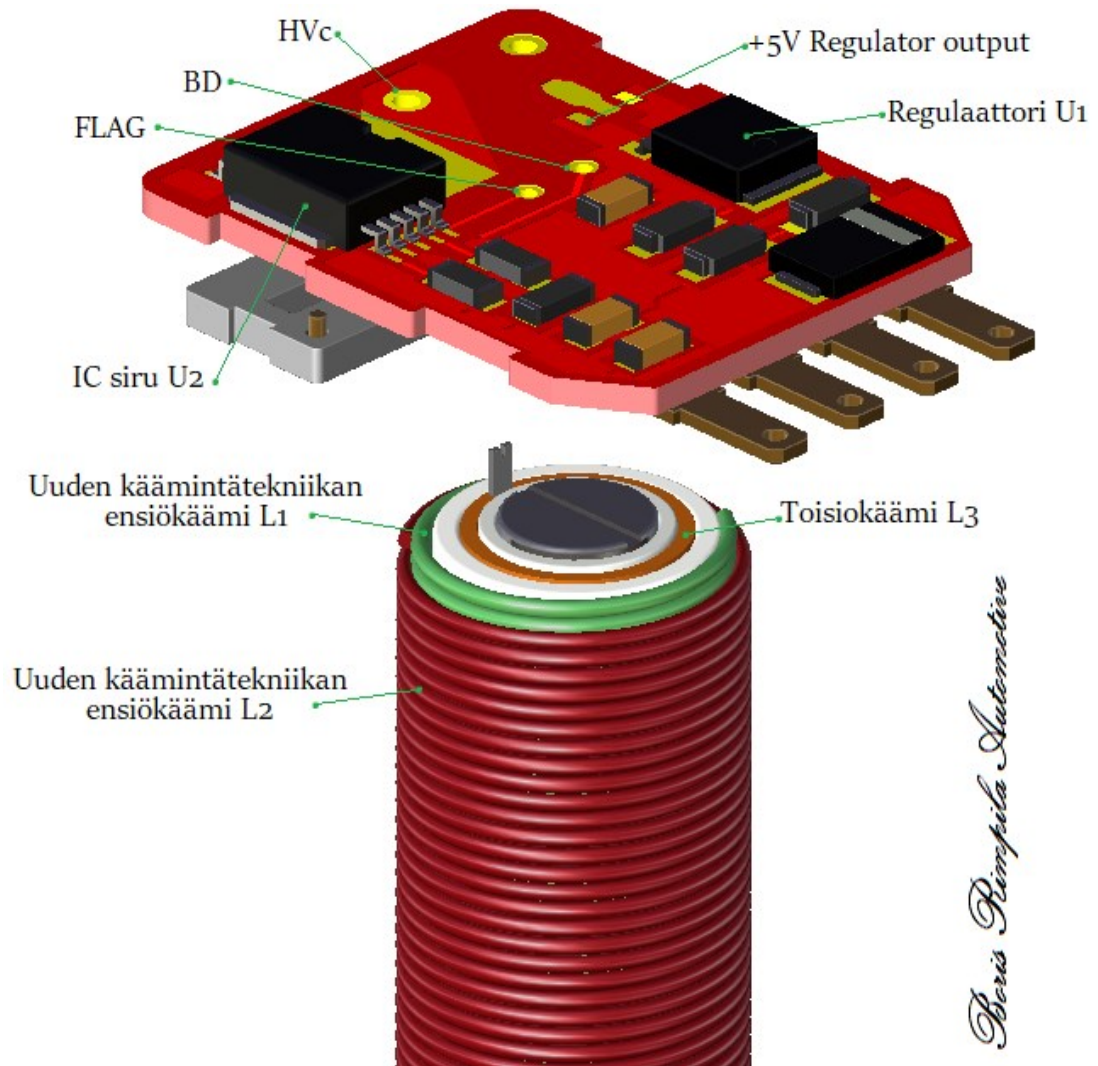
Kuvan 33 diagnostiikkaliitännästä on mahdollista lukea regulaattorin +5 V:n ulostulo regulaattorin toimivuuden varmistamiseksi, +12 V:n käyttöjännite komponenttien käyttöjännitteen varmistamiseksi FLAG-ulostulo, testata BD-pinniä sirun sisäisen transistorin toimivuudesta, lukea HVc-ulostulo (ensiökelan miinus) ensiökelan kuvaajan saamiseksi sekä mitata ensiö- ja toisiokelojen resistanssit ja induktanssit.



Kuva 33. Uuden suorasytytyspuolan lukumahdollisuus diagnostiikkaliittimestä

4.3 Uusi ensiökelan käämintäteknikka

Kipinäenergian lisäämiseksi insinööriyössä kehitetty kuvan 34 mukainen uusi käämintäteknikka perustuu kahteen rinnakkain käämitettyyn induktiokelaan. Käämintäteknikassa sovelletaan samaa vakiosuorasytytyspuolan toisiokäämiä, jonka päälle käämitetään sama määrä ensiökelan kierroksia kaksi kertaa päällekkäin erillisistä kuparilangoista. Ensiökelan ensimmäinen käämi (L1) koostuu 85 kierroksesta, joka käämitetään vakiotoisiokelan päälle. Ensimmäisen käämin 85 kierroksen päälle käämitetään toinen ensiökela (L2), joka koostuu 85 kierroksesta. Toisiokela L3 pysyy vakiona.

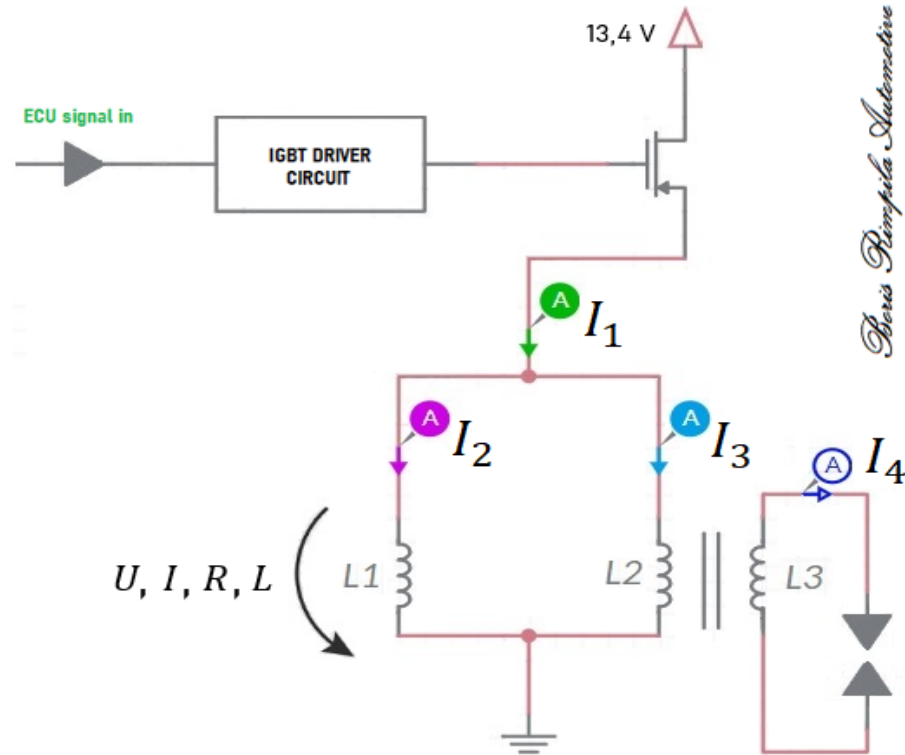


Kuva 34. Uusi käämintätekniikka. Vihreä käämi = L1, punainen käämi = L2

Tällä käämintäkonfiguraatiolla kuvassa 35 induktiokelan vastus pienenee huomattavasti rinnakkaisessa kytkennässä. Ensiökelojen plus- ja miinuspotentialit kytketään ohjainlaitteeseen samalla kytkentätekniikalla kuin ensimmäisessä ja toisessa prototyypin tyypissä. Alkuperäisen ensiökelan kierrosten lukumäärän ollessa 170 ja vastuksen 0,83 ohmia tekee 85 kierrosta 0,415 ohmia. Uuden käämintätekniikan vastus on laskettavissa seuraavalla yhtälöllä:

Induktiokelan resistanssi rinnakkaisessa kytkennässä:

$$R_{TL} = \left(\frac{1}{R_{L_1}} + \frac{1}{R_{L_2}} \right)^{-1} = 0,2075 \Omega$$



Kuva 35. Uuden käämintätekniikan kytkentäkaavio

Kun laskemme induktiokelan L_1 yli menevän induktanssin, saamme tämän induktiokelan aikavakioksi 0.68 millisekuntia. Tällä aikavakiolla induktiokelan L_1 yli nousee jännite 9,04 volttiin 1,5 millisekunnin aikana. Tästä laskemme maksimivirran, josta tulee 21,78 ampeeria. Induktiokelan L_1 virrasta laskemme virta 1,5 millisekunnin latausaikana, josta tulee 14,7 ampeeria. L_1 induktiokelan kipiinäenergiaksi saadaan 30,78 millijoulea.

Induktiokelan induktanssi L_1 , aikavakio τ , jännite latausajan funktiona U_{L_1} , virta I_2 latausajan funktiona ja kipiinäenergian w_{L_1} laskenta:

$$L_1 = \frac{\mu N^2 A_C}{l} = 0,2849 \text{ mH}$$

$$\tau = \frac{L_1}{R_{L_1}} = 0,6865 \text{ mS}$$

$$U_{L_1} = 13,4 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 9,04 \text{ V}$$

$$I_2 = 21,78 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 14,7 \text{ A}$$

$$w_{L_1} = \frac{I_2^2 L_1}{2} = 30,78 \text{ mJ}$$

Uuden käämintätekniiikan induktiokelojen ollessa identtisiä voimme kuvan 35 kytkentäkaavio mukaisesti summata induktiokelojen L_1 ja L_2 kipiäenergia ja saamme kipiäenergian summaksi 61,56 millijoulea. Gallardon vakiosuorasyytyspuolien kipiäenergia on 39,26 millijoulea.

Rinnakkaisten induktiokelojen L1 ja L2 kipiäenergian summan laskenta:

$$\Sigma w = w_{L_1} + w_{L_2} = 61,56 \text{ mJ}$$

Uuden käämintätekniiikan tehoa voidaan myös tarkastella magneettivuon tiheyden yhtälöllä. Uuden käämintätekniiikan magneettivuon tiheyden summaksi saadaan 117 milliteslaa.

Rinnakkaisten induktiokelojen L1 ja L2 magneettivuon tiheyden summan laskenta:

$$\phi_{L_1} = \frac{L_1 I_2}{NA} = 58,51 \text{ mT}$$

$$\Sigma \phi = \phi_{L_1} + \phi_{L_2} = 117 \text{ mT}$$

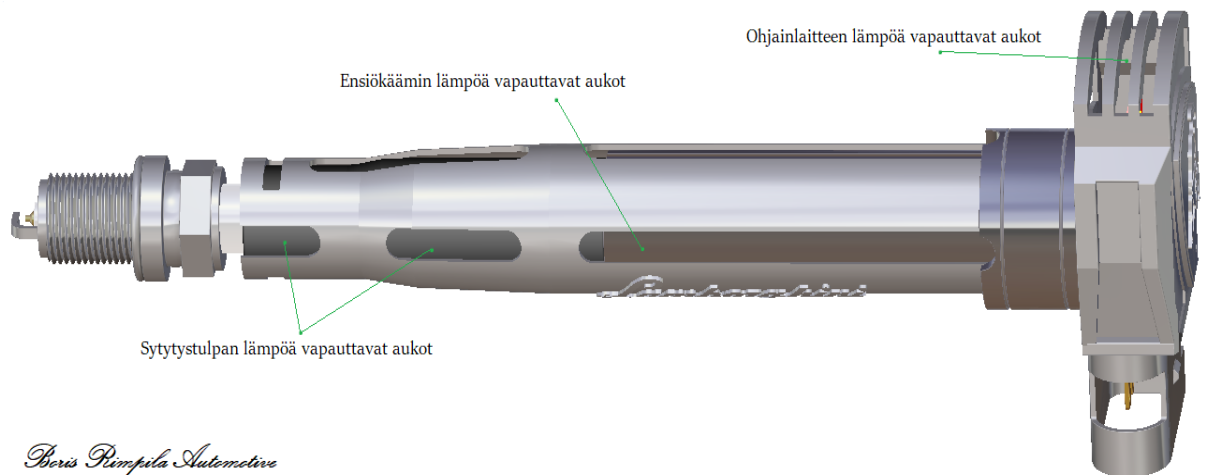
Gallardon vakiosuorasyytyspuolan ensiökelan magneettivuon tiheys on 66,1 milliteslaa. Huomaamme, että uuden käämintätekniiikan kipiäenergia nousee noin 30 prosenttia samalla ensiökelan kierrosten lukumäärällä käämitettynä erillisiin induktiokeloihin rinnakkain.

Gallardon vakiosuorasyytyspuolan magneettivuon tiheyden laskenta:

$$\phi_{Ga} = \frac{L_{Ga} I_{Ga}}{N_{Ga} A} = 66,1 \text{ mT}$$

4.4 Uuden suorasytytyspuolan 3D-mallintaminen

Uuden suorasytytyspuolan kotelointi ja sisäiset komponentit suunniteltiin Catia V5 -ohjelmalla. Kotelointiin suunniteltiin termodynaamisia ominaisuuksia, kuten koteloinnin käämintäosan lämpöä vapauttavat aukiot, ohjainlaitteen päädyn lämpöä vapauttavat aukiot ja sytytystulpan lämpöä vapauttavat aukot (kuva 36). Käämintäosan ollessa 86,13-wattinen tulee tästä tehosta muodostuva lämpö vapauttaa koteloinnin lämpöä vapauttavia aukkoja pitkin.



Kuva 36. Koteloinnin termodynaamiset ominaisuudet

Lämpöenergian laskenta ensiökelassa:

$$J = Ws$$

jossa J on lämpöenergia jouleina, W on ensiökelan teho watteina ja S on aika sekunteina. Tuloksena saadaan 0,13 joulea lämpöenergiaa.

Uuden suorasytytyspuolan ensiökelan ladataessa 9,72 ampeeria 8,88 voltin jännitteellä, tulee 86,13 wattia tehoa. Tästä voimme laskea lämpöenergian, joka on 0,13 joulea ensiökelan latausajan ollessa 1,5 millisekuntia.

8250 kierrosnopeudella PWM-ohjaussignaalin ollessa 68,75 hertsiä sytytyspuolan ensiökela on kytkettynä päälle 1,5 millisekuntia ja pois päältä 12,56 millisekuntia. Tämä tarkoittaa, että suorasytytyspuolan on vapautettava 0,13 joulea lämpöenergiaa ympäristöön 12,56 millisekunnin aikana ennen uutta sytytyskytkintä. Kierrosten ollessa korkeat vapautuu kyseisen lämpöenergian määrä tiheästi ja pakkautuu, mistä seuraa sytytyspuolan lämpeneminen.

Kotelointiin mallinnettiin kuvan 37 moottoritilaan ja brändiin sopiva estetiikka, jolla uusi tuote kilpailee vakio-osan rinnalla. Uuden tuotteen koteloinnin sivuun mallinnettiin Lamborghinin brändin kaunoteksti ja koteloinnin päälle Lamborghinin taisteluhärkä. Jokaiseen erillisen sylinterin suorasytytyspuolan kotelointiin mallinnettiin kyseisen sylinterin numerointi, joka edistää suorasytytyspuolien asentamista omaan sylinteriin numeroinnin perusteella. Tämä numerointi auttaa tunnistamaan, mihin suorasytytyspuolat ovat olleet asennettuina irrottamisen yhteydessä.



Kuva 37. Alumiinikoteloinnin suunnittelu Catia V5 -ohjelmalla

Käänteissuunnittelussa saaduista mitoista piirrettiin dimensiot millimetripaperille teknisinä piirustuksina, joista kaikki saadut mitat syötettiin koteloinnin mallinnuksessa Catian *Part Design*- ja *Surface Design* -moduuleissa Sketcheiksi 3D-

avaruuteen. Catia tunnistaa suunnittelijan asettamat vaatimukset ja lait, joista syntyy kotelointi yksi alue kerrallaan erillisinä pintoina. Nämä pinnat mallinnettiin koteloinnin lopulliseen kokoon ja muotoon.

Koska kotelointi on mallinnettu käännteissuunnittelussa saatuihin mittoihin, kotelo täytyi mallintaa ensimmäisenä moottoriin sopivaksi, minkä jälkeen pystyi mallintamaan sisäisen sähköjärjestelmän osia, kuten ohjainlaitteen, piirilevyn ja käämintäosan koteloinnin sisään.

Koteloinnin sisään mallinnettiin Gallardon vakiokäämintäosa, josta pystyi mittaamaan mitat, joihin vakiosuorasytytyspuolan käämintäosa täytyy tasoajrsiä ja sorvata sopiakseen uuden koteloinnin sisämittoihin.

Koteloinnin, ohjainlaitteen ja käämintäosan ollessa mallinnettuina uuden suorasytytyspuolan kokoonpanoa ja valmistusta suunniteltiin ja simuloitiin Catia V5 -ohjelmalla.

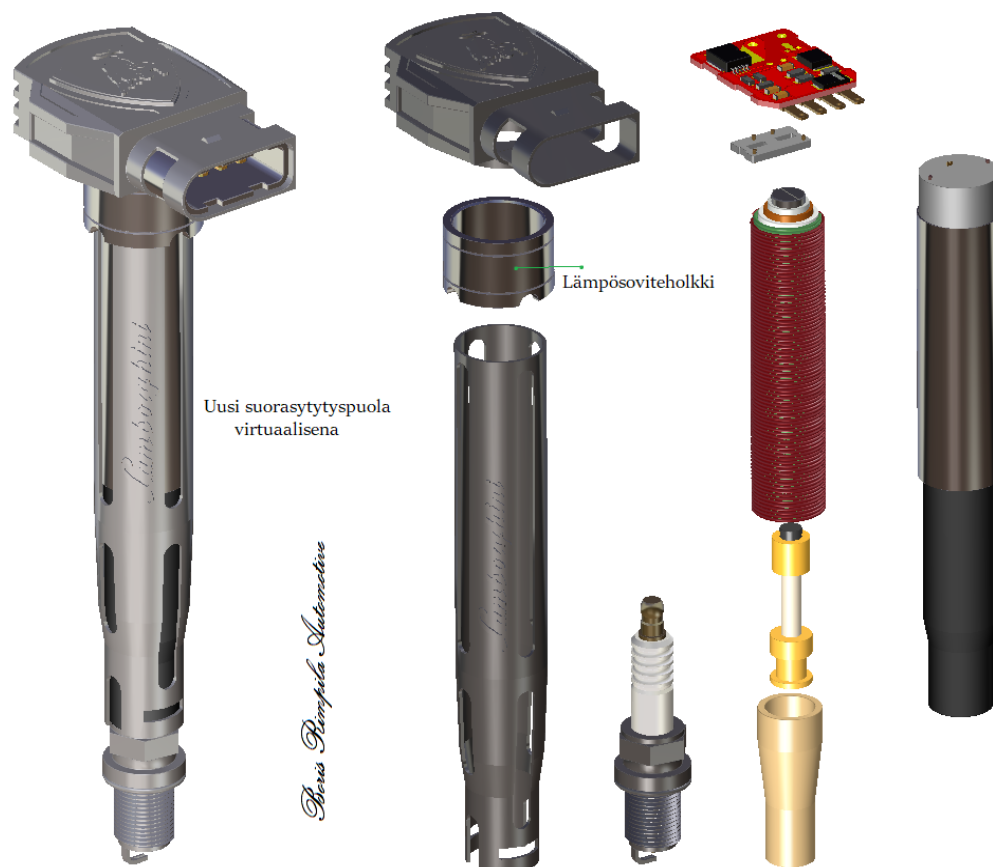
4.5 Uuden suorasytytyspuolan kokoonpanon 3D-simulointi

Kuvassa 38 Catialla tuotettu kotelointi, ohjainlaite ja käämintäosa koottiin 3D avaruudessa yhdeksi kokonaisuudeksi *Assembly*-moduulissa valmiiseen muotoon. Tästä saatiin ensimmäistä kertaa uusi suorasytytyspuola virtuaalisessa muodossa, josta voitiin tarkastella estetiikkaa ja ulkonäköä tulevasta tuotteesta. Kokoonpanosimulaatiossa on mahdollista tarkastella osien sovitus ja sopivuus toisiinsa.

Catiassa kokoonpanosimulaatiossa suunniteltiin kokoonpano- ja valmistustekniikka uuden suorasytytyspuolan kokoamiseen käytännössä. Ohjelmassa asennettiin valmis käämintäosa ja ohjainlaite koteloinnin sisään sahaamalla kotelointi kahteen osaan kyseisessä CAD-ohjelmassa. Simulaatiossa koteloinnin yläosaan asennetaan ohjainlaite Lamborghiniin vakioliittimellä. Asennusprosessin aikana ohjainlaitteen sähköjohdot, jotka kiinnittyvät valmiiseen käämintäosaan jäävät auki koteloinnin yläpään huoltoaukosta. Koteloinnin alaosaan

asennetaan valmis käämintäosa työstettynä oikeaan kokoon, johon on juotettu johdot, jotka kiinnittyvät ohjainlaitteeseen.

Asennusprosessin aikana johdot viedään koteloinnin yläosan sisäkautta huoltoaukosta. Kun ylä- ja alaosat ovat asennettuina, huoltoaukole jäävät johdot juotetaan diagnostiikkaliittimeen, joka asennetaan huoltoaukkoon. Kotelointiin täytetään korkeajännitettä eristävää epoksia, joka kovettuu koteloinnin sisälle. Kokoonpanosimulaatiossa voidaan tarkastella mahdollinen johtojen pituus, joka riittää käytännön kokoonpanossa juottamiseen asennuksen jälkeen. Simulaatiossa voidaan viedä oikean pituiset johdot huoltoaukosta ja mitata johtojen pituus.



Kuva 38. Uuden suorasytytyspuolan kokoonpanosimulaatio

Koteloinnin ylä- ja alaosan yhteen kiinnittämiseen suunniteltiin lämpösovitteholkki, joka sorvataan alumiinista laskettuun kokoon lämpösovitteeksi. Lämpösovite lämmitetään laskettuun lämpötilaan, josta sovite laajenee ja sopii

koteloinnin kaulan ulkohalkaisijaan. Lämpösoviteholkkiin asennetaan samanlaisesti koteloinnin ylä- ja alaosa sauhuksen kohdalta. Lämpösoviteholkki jäähtyessään puristaa koteloinnin osia kiinnittäen ne yhteen. Lämpösoviteholkki suunniteltiin Catialla projektissa käytettävän hitsaamisen ja liimaamisen estämiseksi.

Lämpösoviteholkin lämpölaajenemisen laskenta:

$$\frac{\Delta L_L}{L_L} = \alpha_{AL} \Delta T$$

jossa ΔL_L on pituuden muutos lämpötilan funktiona, L_L on alkuperäinen pituus, α_{AL} on alumiinin lämpölaajenemiskerroin ja ΔT on lämpötilamuutos. Lopputuloksena saadaan pituuden muutos metreinä.

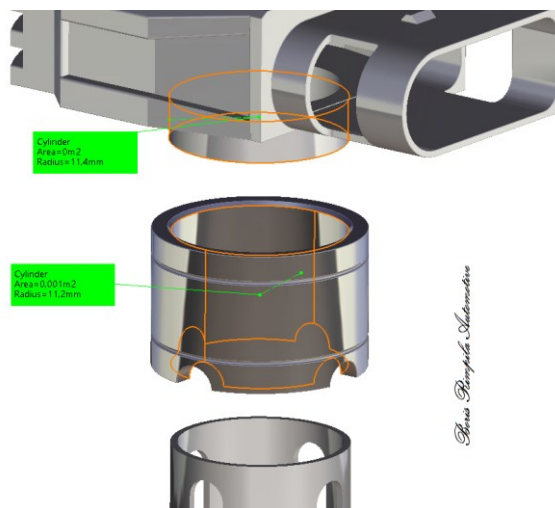
Lämpösoviteholkin loppupituus:

$$\Delta L_L + L_L = L_F$$

jossa L_F on lämpölaajenemisen pituuden muutoksen ja alkupituuden summa.

Koteloinnin kaulan ulkohalkaisijan ollessa 23,05 millimetriä (kuva 39) tulee alumiinisen lämpösoviteholkin loppupituuden L_F olla halkaisijaltaan 23,1 millimetriä. Lämpösoviteholkki tulee lämmittää 172 celsiusasteeseen

huoneenlämpötilassa, jotta lämpösovite saavuttaa tarvittavan loppupituuden.



Kuva 39. Alumiininen lämpösoviteholkki

Kuvassa 40 lämpösoviteholkki valmistettiin perinteisellä sorvaustyylillä sisäpinnan sileyden ja sisähalkaisijan tarkkuuden varmistamiseksi. 3D-tulostetun alumiinin pinnan ominaiskarheus estää lämpösoviteholkin tulostamisen kyseiseen kokoonpanoon.



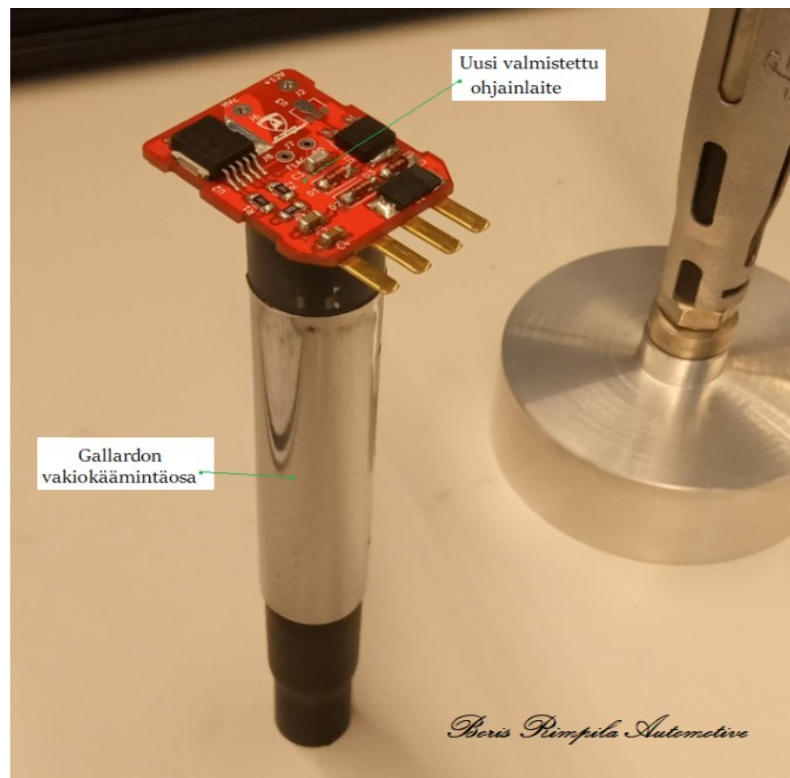
Kuva 40. Lämpösoviteholkin valmistus sorvissa

4.6 Prototyypin ensimmäisen ja toisen tyytin valmistaminen

Laboratoriossa tuotettiin prototyypiksi molemmat prototyypin mallit testeihin, jossa ensimmäisessä prototyypissä käytetään Gallardon vakiokäämintäosaa (kuva 41), johon kytketään uusi ohjainlaite ja toisessa prototyypissä suunniteltiin ja käämitettiin uusi ensiökela Gallardon vakiosuorasyytytyspuolan toisiokelan päälle, joihin kytketään uusi ohjainlaite.

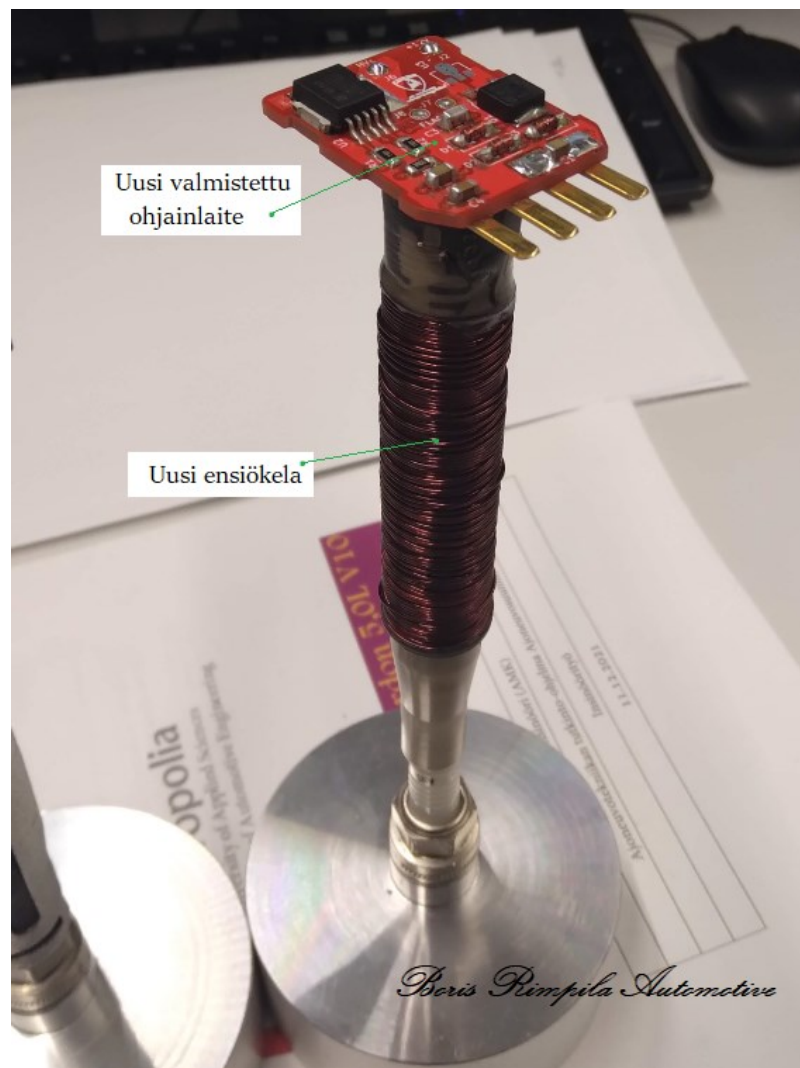
Ensimmäisen tyytin tuottamisessa vakiokäämintäosan ensiö- ja toisiokelan potentiaalit kytketään uuteen valmistettuun ohjainlaitteeseen. Ensiökelan potentiaalit kytketään sirun induktiokelan ohjauspinneihin. Toisiokelan miinuspotentiaali maadoitetaan piirilevyn maadoituskiskoon, josta toisiokela maadoittuu suoraan sylinterikannen maahan.

Laboratoriomittauksissa prototyypin ensimmäisen tyytin ensiökelaan saatiin virtaa 9,7 ampeeria 1,5 millisekunnin latausajalla, joka tekee 61 millijoulea kipi-näenergiaa.



Kuva 41. Prototyypin ensimmäinen tyyppi

Toiseen tyyppiin käämitettiin uusi ensiökela vakiokäämintäosan toisiokelan päälle (kuva 42). Vakiokäämintäosasta ensiökela on poistettavissa rikkomatta valmista toisiokelaa. Ensiö- ja toisiokelan välillä on epoksivalettua korkeajännite-eristettä. Vakioensiökela käämitettiin pois epoksivalun päältä ja tilalle käämitettiin uusi ensiökela matalammalla aikavakiolla τ . Tämä käämintäosa uudella ensiökelalla kytketään uuteen ohjainlaitteeseen samalla tavalla kuin ensimmäisessä tyypissä.



Kuva 42. Prototyypin toinen tyyppi

Prototyypin toisen tyypin uuteen ensiökelaan saatiin 9,8 ampeeria virtaa, joka tekee 62 millijoulea kipinäenergiaa. Tämän toisen prototyypin ensiökela laskettiin aikavakion suunnittelukaavalla, jossa muutettiin ensiökelan kierrosten

lukumäärää 170 kierroksesta 155 kierrokseen. Tästä aikavakio τ ja ensiökelan resistanssi pienenee, jonka syystä saamme ladattua 1,5 millisekunnin aikana 0,1 ampeeria enemmän virtaa kuin prototyypin ensimmäisessä tyypissä.

Laboratoriotesteissä kahden prototyypin välillä päädyttiin suunnittelemaan ja tuottamaan lopullinen uusi suorasytytyspuola prototyypin ensimmäisestä tyypistä, sillä uuden ensiökelan käämittäminen Gallardon vakio-ohjainlaitteelle tuotti vähäistä virran lisäystä. Uuden ohjainlaitteen sirun $R_{ds(on)}$ arvon vuoksi Gallardon vakio-ohjainlaitteen IGBT:llä sen $R_{ds(on)}$ arvon ollessa korkeampi.

Ennen lopullisen tuotteen tuottamista ja valmistamista uudesta suorasytytyspuolasta valmistettiin prototyyppi muovista. Muovisen prototyypin sisään koottiin suunniteltu ohjainlaite ja valmis käämintäosa Catiassa suunnitellun kokoonpanotekniikan mukaisesti. Prototyyppiä valmistaessa korjattiin alueita, joissa koteloinnin sisämittojen geometriassa tuli tehdä muutoksia muuttuvien tekijöiden vuoksi. Nämä muutokset päivitettiin Catiaan alumiiniseen kotelointiin ennen kotelon tulostamista alumiinista.

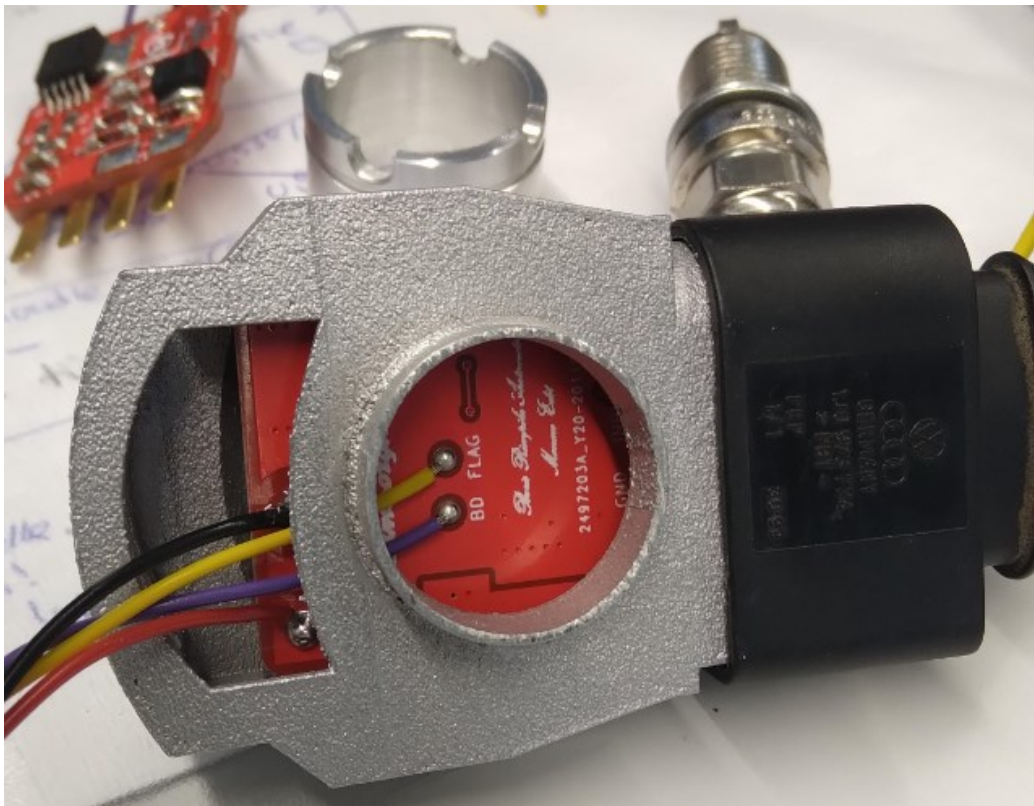
Muovista prototyyppiä simuloitiin virtalähteellä ja funktiogeneraattorilla syöttäen prototyyppiin oikea ohjainlaitteen käyttöjännite, virta ja PWM-signaali. Tuloksena saatiin 9,7 ampeeria virtaa ensiökäämissä ja 61 millijoulea kipinäenergiaa. Simuloinnissa testattiin tuotteen lämpenemistä matalalla ja korkealla PWM-signaalilla, jotta nähtiin tuotteen toimivuus lämmetessä. Prototyyppi lämpeni vakio-suorasytytyspuolan kanssa saman verran.

4.7 Uuden suorasytytyspuolan osien 3D-tulostaminen ja kokoaminen

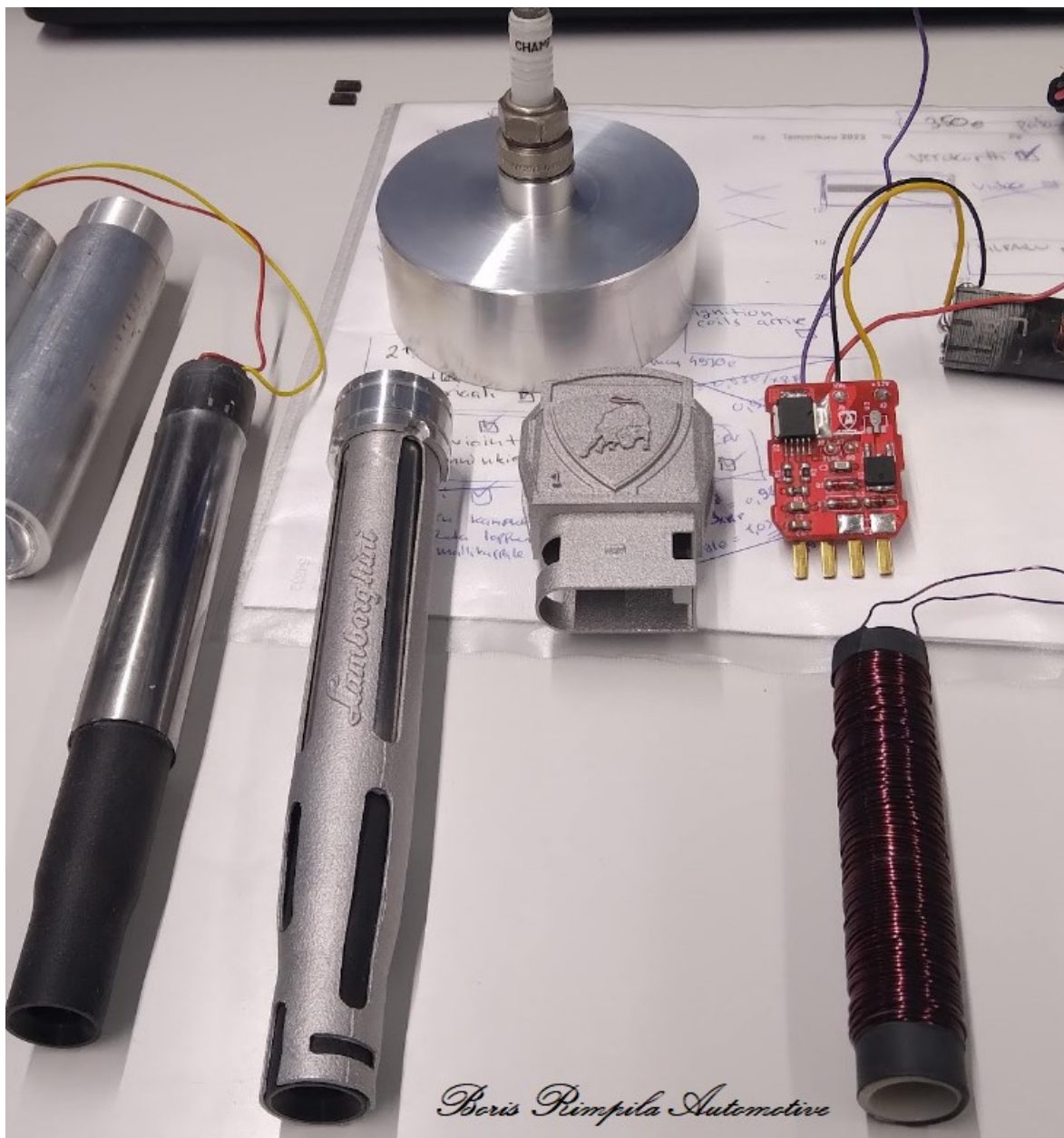
3D-suunnitteluohjelmissa käännetään suunniteltu virtuaalikappale 3D-tulostimen tuntevaan tiedoston muotoon tai koodiin, josta 3D-tulostin tulostaa kappaleen suunnittelijan valitsemasta materiaalista. Ohjainlaitteen piirilevy tulostettiin PCB-tulostimella ja alumiininen kotelointi 3D-alumiinipulveritulostimella (kuva

43). 3D-tulostimiin syötetään tiedostot USB-tikulla, jotka generoidaan mainituissa CAD-ohjelmissa.

Koteloinnin materiaaliksi valittiin alumiini, koska se on kestävä ja hyvin lämpöä johtavaa materiaalia kyseiseen applikaatioon. Koska suorasytytyspuola on asennettuna moottoriin kuumaan ja tärisevään paikkaan, tulee uuden suorasytytyspuolan koteloinnin olla sään ja mekaanisen kulutuksen kestävä materiaalia. Kotelointi on tulostimesta tullessaan valmis sen sisään asennettaville kappaleille. Piirilevy on PCB-tulostimella tulostettua valmis siihen juotettavien komponenttien juottamiseen. Piirilevyllä juotettiin suunnittelussa valitut piirilevyn komponentit. Tulostettu alumiinikotelo sahataan kahteen osaan. Alaosaan sisään asennetaan valmis käämintäkappale, johon juotetaan johdot ensiö- ja toisiokelelan napoihin (kuva 44). Koteloinnin yläosaan asennetaan ohjainlaite liittämällä ohjainlaite Gallardon moottorihjainlaitteen johtosarjan vakoliittimeen, joka liitetään kotelon yläosaan kiinnittämällä liitin. Koteloinnin yläosan huoltoaukon kautta viedään ohjainlaitteen ja käämintäkappaleen johdot.

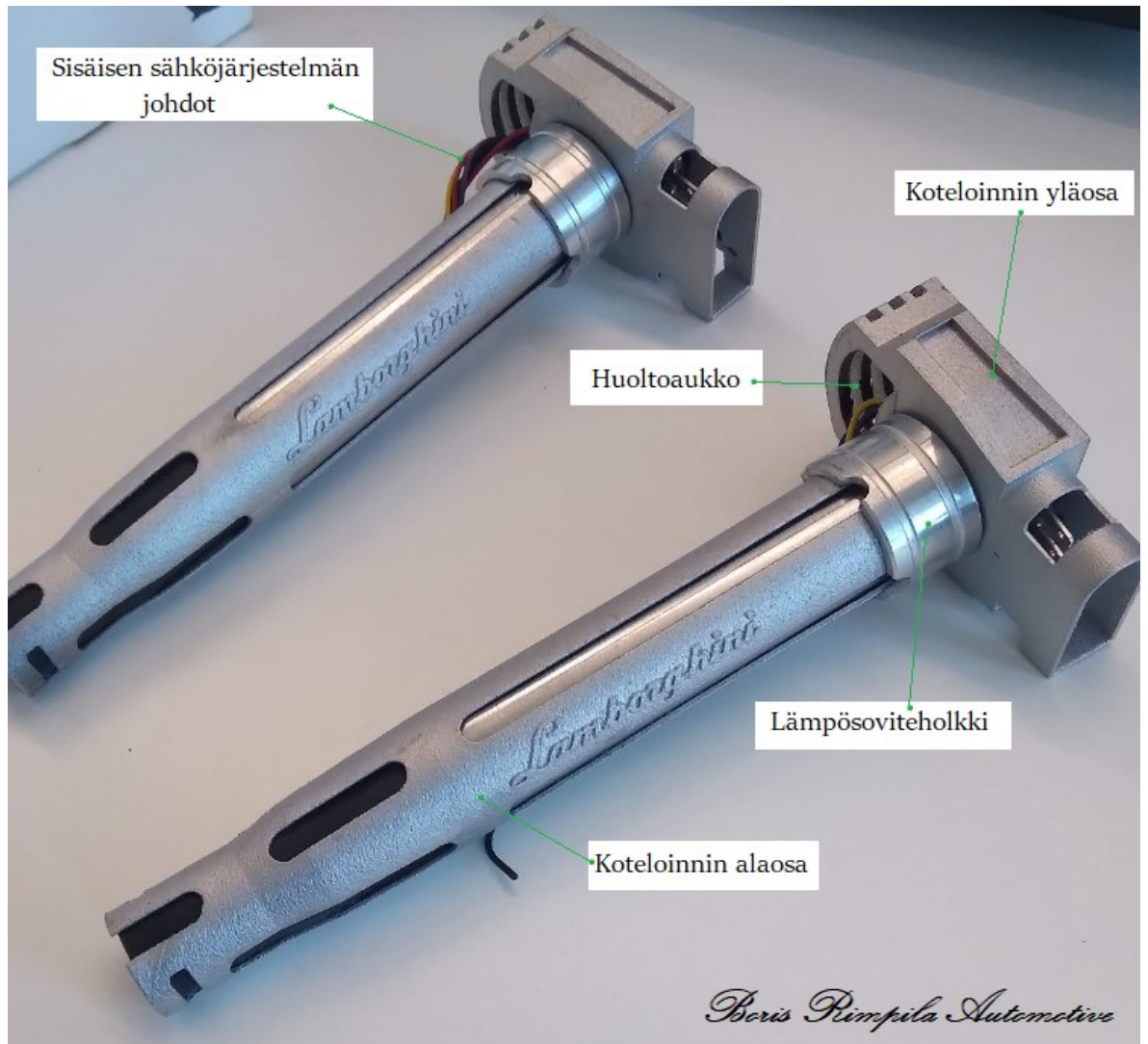


Kuva 43. Koteloinnin yläosa



Kuva 44. Suorasytytyspuolan kokoonpanon prosessi

Lämpösovitte lämmitetään laskettuun arvoon ja asennetaan koteloinnin yläosan kaulaan. Tämän jälkeen koteloinnin alaosa asennetaan lämpösovitteeseen, jonka aikana käämintäosaan juotetut johdot viedään koteloinnin sisäkautta huoltoaukole kuvan 45 mukaisesti. Koteloinnin sahattu sauma kohdistuu paikalleen lämpösovitteessa suunniteltujen ja laskettujen mittojen mukaisesti.



Kuva 45. Sisäisen sähköjärjestelmän johdot vedetty huoltoaukosta

Lämpösovitteen jäähtymisen jälkeen koteloinnin sisään valetaan korkeajännitettä ja korkeaa lämpötilaa kestävää epoksia, joka täyttää jäljelle jäävän ilman koteloinnin sisällä ja sinetöi sisäisen sähköjärjestelmän. Huoltoaukulle jäävät johdot ohjainlaitteelta ja käämintäosalta liitetään huoltoliittimeen, joka kiinnittyy koteloinnin huoltoaukkoon.

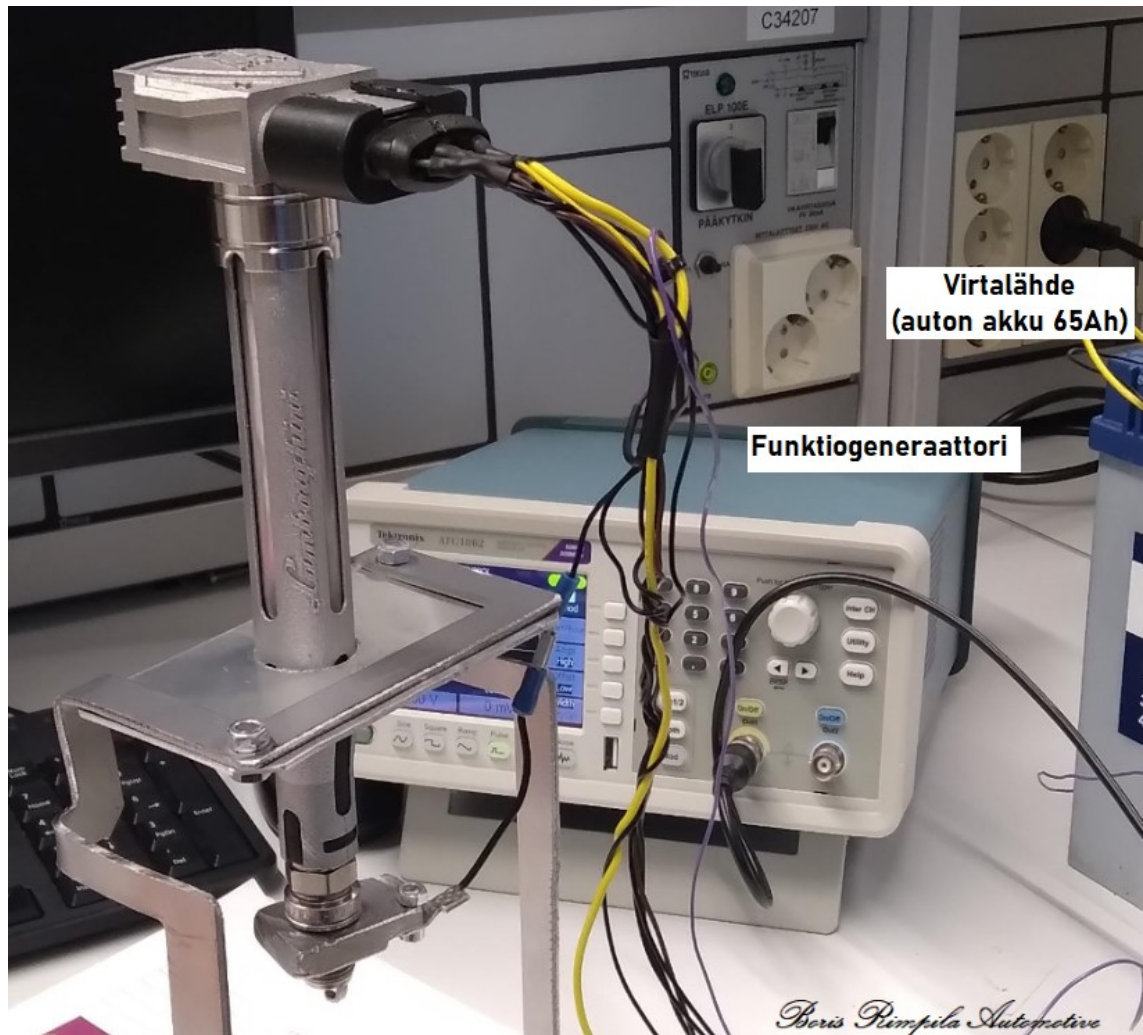
Epoksivalun kovettumisen jälkeen vakioliitin poistetaan, jonka ansiosta ohjainlaite ja sen pinnit ovat jääneet oikeaan syvyyteen ja asentoon.

Kuvassa 46 uusi suorasytytyspuolasarja on valmis generoimaan sytytyskipinää. Suorasytytyspuolaan asennetaan Gallardon vakiosytytystulppa ja

suorasytytyspuolaan syötetään mittauksissa saadut sähköiset parametrit funktiogeneraattorilla ja virtalähteellä (kuva 47). Virtalähteen tulee syöttää 13,4 voltin käyttöjännite ja olla kykeneväinen tuottamaan 20 ampeerin virtaan. Funktiogeneraattorilla syötetään PWM-ohjaussignaali, jonka kantin korkeus on 5 voltin nollasta voltista ja T1-aika on 1,5 millisekuntia operaattorin valitsemalla sytytystaajuudella.



Kuva 46. Uusi suorasytytyspuolasarja on valmis



Kuva 47. Uusi valmis suorasytytyspuola simulaatiomittauksessa

Uuden suorasytytyspuolan valmistamisen jälkeen laboratoriomittauksissa suorasytytyspuola tuotti 61 millijoulen kipinäenergian 1,5 millisekunnin latausajalla. Suorasytytyspuola tuotti 68,75 hertsin PWM-signaalilla 68,75 kipinää sekunnissa. Suorasytytyspuolalle tehtiin kestävyysmittaus, jossa suorasytytyspuola jätettiin tuottamaan sytytyskipinää 70 hertsin PWM-taajuudella riittäväksi ajaksi, jotta oli mahdollista nähdä suorasytytyspuolassa tuotetun lämpöenergian luovuttaminen ympäristöön kotelointiin suunnitelluista aukoista.

4.8 Uuden suorasytytyspuolan asentaminen Gallardon moottoriin

Insinööriyöprojektissa kehittynyt uusi suorasytytyspuola asennettiin Gallardon moottoriin. Uuden suorasytytyspuolan ulkoiset mitat ja standardoidun liittimen

mitat sopivat venttiilikoneistokoteloon ja vakiojohtosarjan liittimeen. Suorasytytyspuolan asentuminen sytytystulpan päälle onnistui vaivattomasti ja sytytyspuolat mahtuivat kaikilla mitoilla asennettavaan tilaan (kuvat 48 ja 49).



Kuva 48. Uusi suorasytytyspuola Lamborghini Gallardon moottorin kanssa

Moottorin käynnistyksessä havaittiin, että Lamborghiniin moottorin ohjainlaite tunnisti uuden suorasytytyspuolat vakioiksi suorasytytyspuolien sisään rakennetun itsetestauspiirin ansiosta. Moottorin vikavalo syttyi sytytysvirran kytkeytyessä ja sammui itsetestauksen jälkeen. Moottorin ohjainlaite ei tallentanut sytytyspuolien vikakoodeja. Moottori käynnistettiin uusilla suorasytytyspuolilla ja moottoria käytettiin 2000–4000 käyntikierröksellä useita minuutteja.



Kuva 49. Uudet suorasytytyspuolat asennettuina Gallardon moottoriin

5 Yhteenveto

Insinööriyössä pyrittiin parantamaan ja jatkokehittämään olemassa olevaa autosähkötekniikkaa. Työssä tehtiin laajasti käänteissuunnittelua ja mittauksia laboratoriossa, jotta löydettäisiin tekniikoita vakio-osien parantamiseen. Työssä havaittiin moottorin vakio-osista useita parannettavia seikkoja, joita käytännössä kehitettiin laboratoriossa rakentamalla prototyyppiä. Parannukset saatiin toteutettua onnistuneesti ja todistetusti käyttämällä sähkölaboratorion mittalaitteita ja mittaustekniikoita. Moottorin osien parantamiseen ja jatkokehittämiseen käytettiin laajasti matematiikkaa ja simulaatioihin CAD-ohjelmia tulosten selvittämiseksi.

Työstä opittiin laajasti nykyautos sähkötekniikan toimintaa ja ohjaustekniikkaa. Tämä mahdollisti olemassa olevien moottorin osien manipuloinnin. Käänteissuunnittelu mahdollisti useiden oskilloskooppien, funktiogeneraattorien ja sähköisten mittalaitteiden käytön oppimisen. Mittalaitteista saatujen mittausten arvot mahdollistivat matemaattisia simulointeja osien kehittämiseen ennen käytännön toteutusta. Osien parantamiseen käytettiin laajasti Catia V5 -3D-mallin-
nusohjelmaa, mikä mahdollisti parannettujen osien mittauksen ja osien sisäisten komponenttien sopivuuden.

Opinnäytetyön tavoite saavutettiin täysin moottorin vakio-osien parantamisen, suunnittelun ja valmistamisen osalta. Lopputuloksena saatiin uudet parannetut suorasytytyspuolat asennettaviksi Gallardon moottoriin käyttämällä saatavissa olevia resursseja, ohjelmia ja mittalaitteita. Tätä työtä voidaan käyttää selvittäessä suorasytytysjärjestelmän toimintaa ja ohjausta.

Työtä pystyy jatkokehittämään integroimalla työssä kehittynyt suorasytytysjärjestelmän piirilevyn diagnostiikka olemassa olevaan OBD-järjestelmään, niin että voidaan sytytyskatkoksen syyt tarkentaa moottorinohjainlaitteelle, jotta saataisiin selkeämmät vikakoodit moottorin pätkimisestä. Nykyinen OBD-järjestelmä ei osaa erottaa todellisia sytytyskatkoksia liittimen katkenneista johdoista. Nykyinen OBD-järjestelmä ilmoittaa vikakoodeilla "sytytyskatkoksia" molemmissa tapauksissa, joissa joko sytytyspuolan liitin on auki ja moottori ei ole

käynnissä tai sylinterissä tapahtuu sytytyskatkoksia todellisuudessa. Työssä kehitetty piirilevyn diagnostiikkatekniikka kytkettäisiin moottorinohjainlaitteeseen johdoilla. Moottorinohjainlaite ohjelmoidaan tunnistamaan johtojen signaaleista tietyt parametrit ja raja-arvot sytytyspuolan sytytysykleistä ja ilmoittamaan sytytyskatkoksista tai vikaantuneesta liittimestä erillisillä vikakoodeilla. Insinööriyön jatkokehittämiseksi uusi käämintäteknikka olisi saatava käytännön mittaukseen, jotta toisiokelan L3 kipinäenergia saataisiin selvitettyä matemaattisen mallinnuksen lisäksi.

Lähteet

Ahoranta, Jukka. 2016. Sähkötekniikka. 15.–17. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Automotive Handbook: 2011. Automotive Handbook. 8th ed. Plochingen: Robert Bosch.

Fairchild Semiconductor Corporation. V5036S IGBT Datasheet 2009. Komponentin datalehti. <<https://www.alldatasheet.com/>>. 9.2009. Luettu 25.7.2022.

IGNITION COIL FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE 2007. Patentti JP2007173835A. China. 5.7.2007. Luettu 23.7.2022.

Juhala, Matti; Lehtinen, Arto; Suominen, Matti & Tammi, Kari. 2005 Moottorialan sähköoppi. 8. painos. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus.

Koivisto, Juha-Pekka; Mikkolainen, Pekka & Rantala, Jouko. 2005. Auto- ja kuljetustekniikan erikoistumisoppi. Helsinki: Otava.

Rugged Automotive IGBTs for Reliable Electronic Ignition: 2018. Verkkoaineisto. Shanghai, China. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8470511/metrics#metrics>>. 26-28.6.2018. Luettu 23.11.2022.

Suvanto, Kari; Laajalehto, Kari. 2005. Tekniikan fysiikka 2. Helsinki: Edita.

ST Microelectronics. VB325SP POWER I.C. Datasheet 2013. Komponentin datalehti. <<https://www.alldatasheet.com/>>. 9. 2013. Luettu 16.8.2022.

Ulrich, Adler (toim.). 1997. Sytytysjärjestelmät. 2. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus.

