

Samir Elhazzaz

Virranjakomoduulin suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

27.4.2017

Tekijä Otsikko	Samir Elhazzaz Virranjakomoduulin suunnittelu ja toteutus
Sivumäärä Aika	45 sivua 27.4.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	terveydenhuollon tekniikka
Ohjaaja	Lehtori Janne Mäntykoski
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin ja toteutettiin virranjakomoduuli autosähköjärjestelmään. Virranjakomoduuli toimii ajoneuvon sähköpääkeskuksena ja korvaa auton perinteiset releet ja sulakkeet puolijohdetekniikalla. Saavutettavat hyödyt ovat yksinkertaisempi sähköjärjestelmä, pieni koko, painonsäästö, helppo ja nopea asennus sekä älytekniikan hyödyt. Työhön liittyi myös laitteen käyttöön tarvittavan Windows-ohjelman tekeminen. Tämän insinööriyön tavoitteena on taloudellisesti kannattava, autosähköympäristöön soveltuva laite, joka on parempi kuin perinteisillä sulakkeilla ja releillä toteutettu sähköjärjestelmä.</p> <p>Työssä tutustutaan ensin lyhyesti autosähköhistoriaan ja tärkeimpiin autosähköjärjestelmän laitteisiin. Tämän jälkeen otetaan laajempi katsaus häiriöihin ja erilaisiin kuormiin. Selvitetään minkälaisia ongelmia erilaiset kuormat aiheuttavat elektroniselle laitteelle. Kuormien aiheuttamat häiriöt todennetaan mittaamalla. Tämän jälkeen käydään läpi virranjakomoduulin toimintaperiaate ja suunnitteluperusteet. Tätä seuraa virranjakomoduulin sähköisen toteutuksen läpikäyminen siihen liittyvien komponenttien kautta.</p> <p>Tämän insinööriyön päätteeksi virranjakomoduulia verrattiin perinteisillä releillä ja sulakkeilla toteutettuun sähköjärjestelmään. Virranjakomoduuli todettiin teknisesti ylivoimaiseksi kaikilla osa-alueilla. Kustannuslaskelmat osoittivat, että virranjakomoduulin valmistaminen on taloudellisesti kannattavaa. Tämä insinööriyö todettiin onnistuneeksi.</p> <p>Virranjakomoduuli otetaan testikäyttöön ja sen kehitystä jatketaan tulevaisuudessa. Suunnitelmissa on perustaa oma yritys ja myydä virranjakomoduulia pientuotantona. Laite hinnoitellaan kilpailukykyiseksi ja suunnataan autoharrastajille, joille markkinoilla olevat kilpailukäyttöön suunnatut virranjakomoduulit ovat liian kalliita.</p>	
Avainsanat	virranjakomoduuli, autosähköjärjestelmä, häiriöt

Author(s) Title	Samir Elhazzaz Design and Development of Power Distribution Module
Number of Pages Date	45 pages 27 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Medical Engineering
Instructor	Janne Mäntykoski, Senior Lecturer
<p>The goal of this study work was to design and fabricate power distribution module that is commercially viable and technically superior compared to traditional fuses and relays. The power distribution module is intended for 12 V automobile environment and it replaces traditional fuses and relays with semiconductor technology. Power distribution module brings benefits of weight reduction, small physical size, easy and fast installation and smart technology. Program code for the microcontroller and Windows-software is not included in this thesis work because of commercial reasons.</p> <p>This thesis will first introduce the reader briefly to automotive electrical history and basics of automotive electrical system. This is followed by a deeper look at automotive electrical disturbances and different loads in automotive environment. Problems with different loads will be analyzed with measurements. Basic functionality of power distribution module will be explained to the reader. Development and electrical design will be studied in detail along with all of the components and circuitry.</p> <p>Power distribution module was compared to automotive electric system with traditional relays and fuses. Through measurements and tests it was possible to prove that power distribution module is technically superior compared to old relay and fuse technology that dates from the 1940s.</p> <p>Based on material and labour costs this thesis work is commercially viable. I plan to start small business and start selling the power distribution module. Target customers are hobbyists who can't afford expensive commercial power distribution modules intended for automotive motorsport.</p>	
Keywords	power distribution module, automotive electrical system

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähköympäristö	2
2.1	Historia	2
2.2	Laitteet	2
2.3	Häiriöt	4
2.4	Kuormat	6
3	Virranjakomoduuli	8
3.1	Suunnittelu	9
3.2	Komponenttien valinta	11
3.3	Mikrokontrolleri	11
3.4	Jännitelähde	16
3.5	Ajuripiiri	18
3.6	Muisti	24
3.7	USB	26
3.8	CAN-väylä	28
3.9	JTAG	30
3.10	Kytkimet	31
3.11	Väyläliitäntä	32
3.12	Laitteen kokoaminen	33
3.13	Ohjelmisto	35
4	Lopputuloksen arviointi	37
4.1	Asennus	37
4.2	Fyysiset ominaisuudet	39
4.3	Kustannukset ja kannattavuus	40
4.4	Suorituskyky	41
4.5	Tulevaisuuden suunnitelmat	43
5	Yhteenveto	44
	Lähteet	45

Lyhenteet

ABS	Anti Lock Braking System; lukkiutumattomat jarrut
CAN	Control Area Network; väylätekniikka, jossa tieto liikkuu eri moduuleiden välillä sarjamuodossa
ESD	Electrostatic Discharge; sähköstaattinen purkaus
EEPROM	haihtumaton puolijohdemuisti
ECU	Electronic Control Unit; moottorin tai muun laitteen ohjausyksikkö
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor; suuria virtoja ohjaava bipolaaritransistori, jonka hila on eristetty
PWM	Pulse Width Modulation; jännitettä säädetään muuttamalla signaalin pulssisuhdetta
RTC	Real Time Clock; reaaliaikainen kello
SRAM	Static Random Acces Memory; haihtuva puolijohdemuisti
ROM	Read Only Memory; tehtaalla ohjelmoitu haihtumaton muisti, johon ei voi tehdä muutoksia
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter; piiri, jota käytetään asynkronisessa sarjamuotoisessa tietoliikenteessä
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter; piiri, jota käytetään synkronisessa sarjamuotoisessa tietoliikenteessä
USB	Universal Serial Bus; tiedonsiirtoprotokolla oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä suunnitellaan ja toteutetaan virranjakomoduuli 12 V:n autosähköjärjestelmään. Pääpaino on elektronisessa suunnittelussa ja toteutuksessa. Laitteen kotelo, liittimet ja käyttöön tarvittava Windows-ohjelma esitellään lukijalle pintapuolisesti. Kaupallisten syiden vuoksi Windows-ohjelman tai mikrokontrollerin ohjelmointia ei käsitellä tässä työssä. Työn päätteeksi saadaan prototyyppi, joka on valmis tuotantoon sellaisenaan tai pienillä muutoksilla.

Virranjakomoduulit ovat yleisiä kilpa-auto puolella, mutta korkeiden hintojen vuoksi laitteet ovat usein harrastajien ulottumattomissa. Tämä tarjoaa markkinaraon harrastajakäyttöön hinnoitellulle laitteelle. Virranjakomoduuli toimii ajoneuvon sähköpääkeskukseksi ja korvaa auton perinteiset releet ja sulakkeet puolijohdetekniikalla. Saavutettavat hyödyt ovat yksinkertaisempi sähköjärjestelmä, pieni koko, painonsäästö, helppo ja nopea asennus sekä älytekniikan hyödyt.

Olen tutustunut autosähköympäristöön pitkäaikaisen autoharrastuksen kautta. Olen suunnitellut ja toteuttanut katukäyttöön tarkoitetun kilpa-auton sähköjärjestelmän perinteisillä releillä ja sulakkeilla. Mikrokontrollerit, ohjelmointi ja piirilevynsuunnittelu ovat tuttuja harrastepohjalta. Elektroniikan perusteet ovat hallussa, mutta varsinaisesta elektroniikkasuunnittelusta ei ole kokemusta.

Tämän insinööriyön tavoitteena on taloudellisesti kannattava, autosähköympäristöön soveltuva laite, joka on parempi kuin perinteisillä sulakkeilla ja releillä toteutettu sähköjärjestelmä. Työn lopuksi verrataan virranjakomoduulia nykyiseen 1940-luvulta peräisin olevaan sulake- ja reletekniikkaan kustannusten, painon, koon sekä asennuksen osalta.

2 Sähköympäristö

2.1 Historia

Autojen sähköistyminen alkoi 1900-luvun alussa. Ensimmäiset autoihin ilmestyneet sähkölaitteet olivat äänimerkki, akku ja ajovalot. Näitä seurasivat pian sähköstartti ja dynamo. [1, s. 5.]

Sulakerasiat ja releet alkoivat yleistyä autoissa 1940-luvulla. Käytettiin metallilankaisia lasiputkisulakkeita sekä sähkömagneettisia releitä. [1, s. 6.]

Dynamo korvaantui laturilla 1960-luvulla ja nykymuotoiset suljetut akut otettiin käyttöön 1970-luvulla. Tämän jälkeen kehitystä on tapahtunut lähinnä elektroniikan saralla. Laturi, akku, sulake ja rele ovat vielä tänäkin päivänä käytössä. [1, s. 3.]

2.2 Laitteet

Auton sähköjärjestelmä muodostuu laturista, akusta, releestä, sulakkeesta ja järjestelmään liitettävistä laitteista.

Laturi lataa akkua ja tuottaa sähköä ajoneuvon tarpeisiin moottorin ollessa käynnissä. Tämä tapahtuu moottorista saadun liike-energian avulla hihnan välityksellä. Latausjännite on noin 14,5 V.

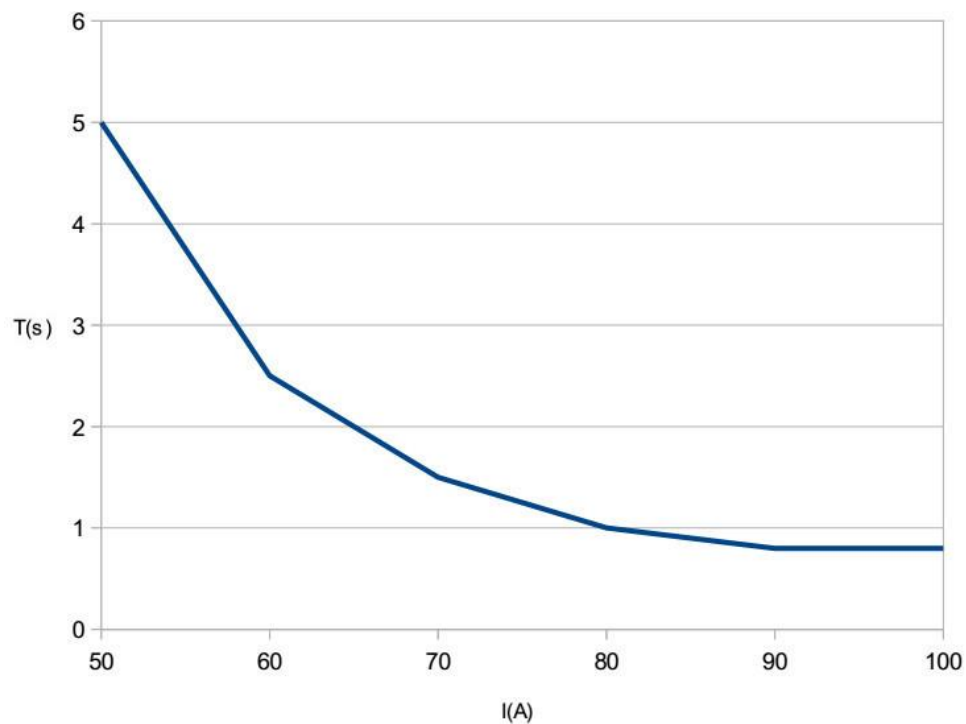
Akun tehtävä on tuottaa energia moottorin käynnistämiseen. Käynnistämisen jälkeen laturi tuottaa sähköä auton tarpeisiin. Käynnistämisen lisäksi akku toimii hetkellisesti varavoimana, mikäli sähköntarve ylittää laturin sähköntuoton. Akku tasoittaa myös vahingollisia jännitepiikkejä. Täyteen ladatun akun jännite on 12,6 V.

Kuvassa 1 näkyy erilaisia autolattasulakkeita. Sulakkeen tarkoitus on suojata sähköjohtoa ja siihen kytkettyä laitetta. Laitteen vikaantuessa tai oikosulun sattuessa piirissä alkaa kulkea suurempi virta, kuin mihin sähköjohto tai laite on mitoitettu. Sulakkeen lanka kuumentuu virran vaikutuksesta ja palaa lopulta poikki katkaisten piirin. Ilman sulaketta kuumentunut sähköjohto tai laite voi aiheuttaa tulipalon.



Kuva 1. Erilaisia autolattasulakkeita.

Palavaan lankaan perustuva sulaketekniikka on epätarkka. Sulakkeen laukeaminen riippuu virran suuruudesta ja ajasta. Mitä isompi virta sitä nopeammin sulake reagoi. Kuvassa 2 näkyy 20 A maxi-sulakkeen laukaisukäyrä. [2, s. 60.]



Kuva 2. 20 A maxi-sulakkeen laukaisukäyrä.

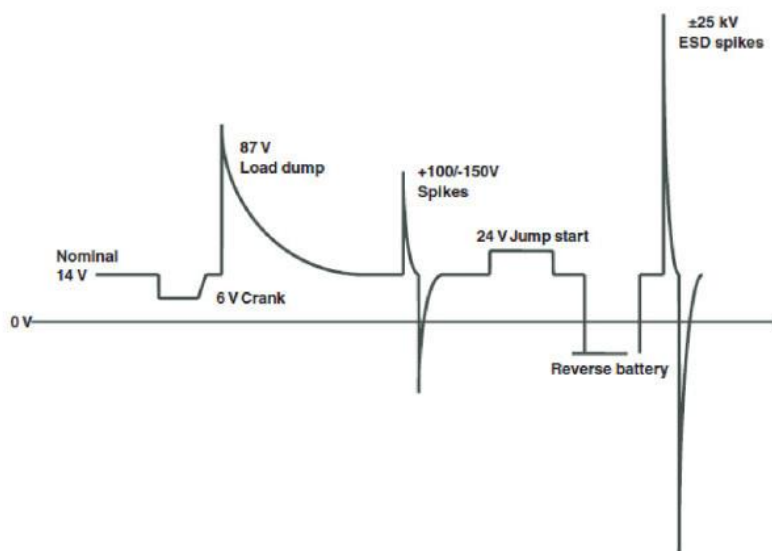
Rele on sähkömekaaninen kytkin, jolla ohjataan suurta virtaa pienellä ohjausvirralla. Releet ovat toimintavarmoja ja kestävät usein auton eliniän. Kuvassa 3 on yleismallinen autorele purettuna.



Kuva 3. Yleismallinen 30 A yksinapainen autorele purettuna.

2.3 Häiriöt

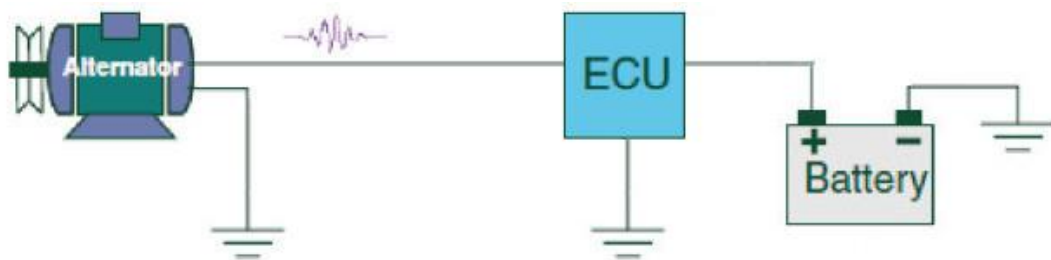
Auto on sähkölaitteelle haastava ympäristö. Laitteen toimintaa häiritsee sähkömagneettiset-, elektrostaattiset- sekä johtuvat häiriöt. Häiriöt syntyvät sähkölaitteiden toiminnasta sekä poikkeavista tilanteista. Tämä pitää ottaa huomioon suunnittelussa ja komponenttien mitoituksissa. Kuvassa 4 näkyy autosähköympäristön suuri jännitevaihtelu. [3, s. 34.]



Kuva 4. Auton sähköjärjestelmän jännitevaihtelut. [3, s. 36.]

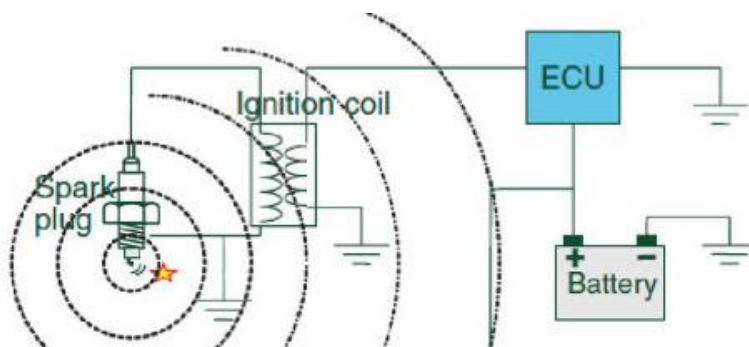
Akun kytkeminen väärinpäin laitteen napoihin on yleinen käyttäjän virhe. Tämä aiheuttaa virran kulkemisen väärään suuntaan ja mahdollisesti tuhoaa sähkölaitteen. Paras tapa estää tämä on tekemällä laitteen väärin kytkeminen fyysisesti mahdottomaksi tai elektronisella kytkennällä.

Johtuvat häiriöt ilmenevät sähkökaapeleissa (kuva 5.). Ne syntyvät induktiivisista kuormista kuten solenoidit, sähkömekaaniset venttiilit tai laturi. Myös vikaantuneet tai huonosti suunnitellut sähkölaitteet voivat aiheuttaa johtuvia häiriöitä. [3, s. 34.]



Kuva 5. Johtuvat häiriöt. [3, s. 34.]

Säteilevät häiriöt syntyvät suurien virtojen kytkeytyessä releissä, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) kytkimissä ja sytytysjärjestelmässä. Näiden synnyttämä elektromagneettinen kenttä aiheuttaa häiriöitä lähellä olevissa laitteissa sekä johtimissa (kuva 6.). [3, s. 35.]



Kuva 6. Säteilevät häiriöt. [3, s. 35.]

Yksi vaarallisimmista transienteista syntyy, kun akku kytkeytyy irti piiristä kesken latauksen. Tämä voi aiheutua huonosta akun tai liittimen kiinnityksestä. Pahimmillaan tämä aiheuttaa jopa 100 V:n ylijännitteen, joka voi kestää 400 ms. [3, s. 35.]

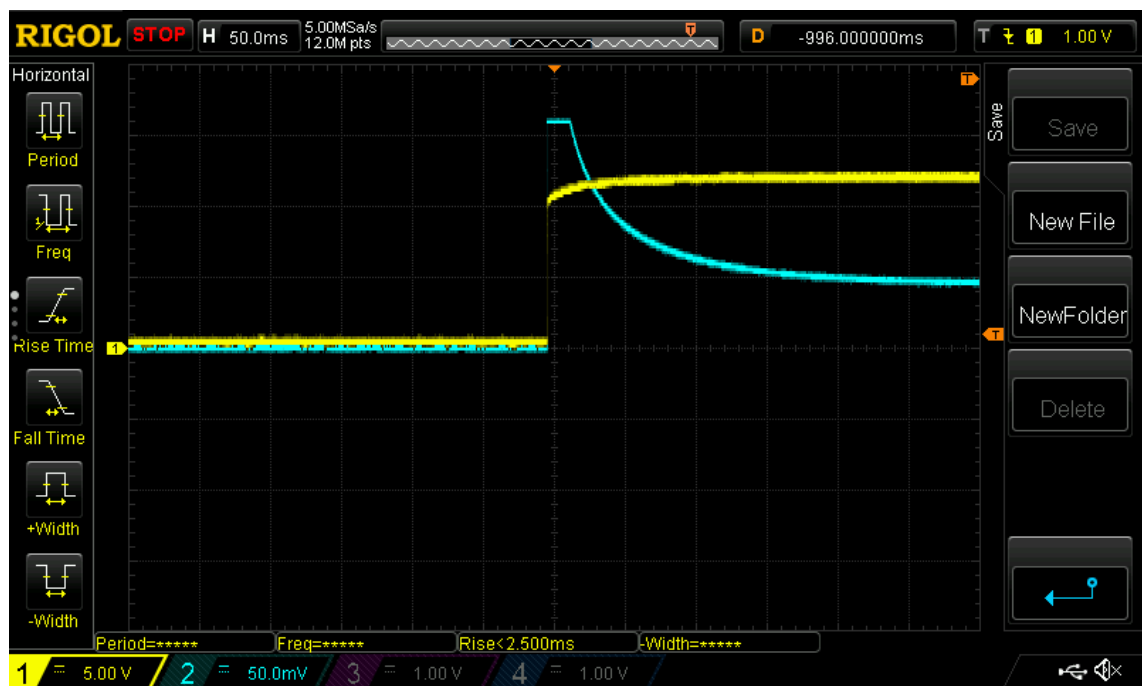
2.4 Kuormat

Autoympäristössä on resistiivisiä, kapasitiivisia ja induktiivisia kuormia. Kapasitiiviset ja induktiiviset kuormat ovat ongelmallisia virranjakomodulin toiminnalle ja niitä pitää tarkastella tarkemmin.

Kapasitiivisia kuormia ovat elektroniset moduulit, kuten ABS (Anti Lock Braking System) ja ECU (Electronic Control Unit). Nämä laitteet pitävät sisällään suodatuskondensaattoreita. Näille kuormille ominaista on suuri käynnistysvirta nimellisvirtaan nähden.

Tutkin kapasitiivisen kuorman käynnistysvirtaa mittamaalla auton valaisimen 55 W:n polttimon käynnistysvirtaa. Valaisimen polttimoa voidaan käsitellä kapasitiivisena kuormana, koska se käyttäytyy kuin kapasitiivinen kuorma syttyessään. Polttimon resistanssi on lämpötilariippuvainen. [3, s. 65.]

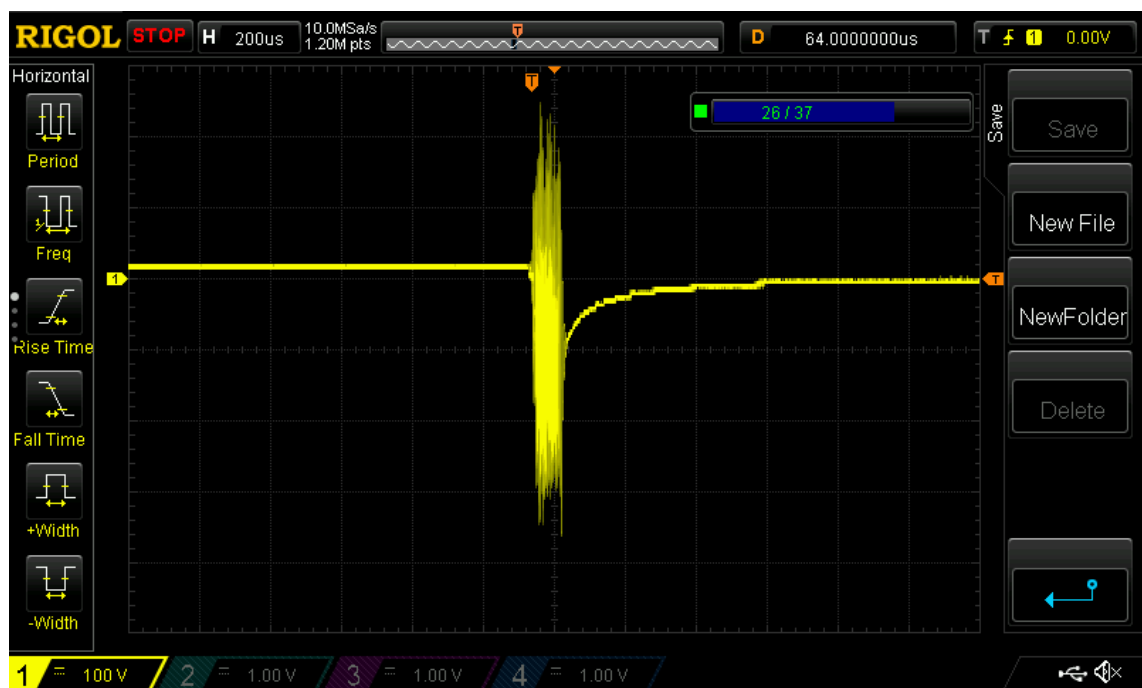
Mittauksessa polttimo oli ollut pakastimessa -18 °C:ssa 30 min. Kuvassa 7 näkyy polttimon käynnistysvirta. Käynnistyessään polttimo vei virtaa 16 A, saavuttaen nimellisvirtansa 5 A 150 ms jälkeen. Polttimon lämmentyessä käynnistysvirta asettui 9 A:n tuntumaan. Käynnistysaikaan ei tullut muutosta.



Kuva 7. -18 °C 12 V 55 W polttimon mittaus.

Induktiivisia kuormia ovat sähkömoottorit, releet ja solenoidit. Sähkömoottorit voivat viedä käynnistyessään huomattavasti nimellisvirtaa suuremman virran. Lisäksi induktiivisille kuormille ominaista ovat suuret transientit laitteen kytkeytyessä pois päältä. Tämä on otettava huomioon suunnittelussa, jotta laitteen kestävyys voidaan taata. [3, s. 95.]

Suoritin mittauksen, jossa autorele on kytkettynä 12 V:n akkuun ja rele ohjataan pois päältä. Kuvassa 8 näkyy linjassa ilmenevät +200 V:n ja -300 V:n jännitepiikit, jonka jälkeen jännite jää negatiiviseksi ja kestää 600 μ s, kunnes jännite saavuttaa 0 V.

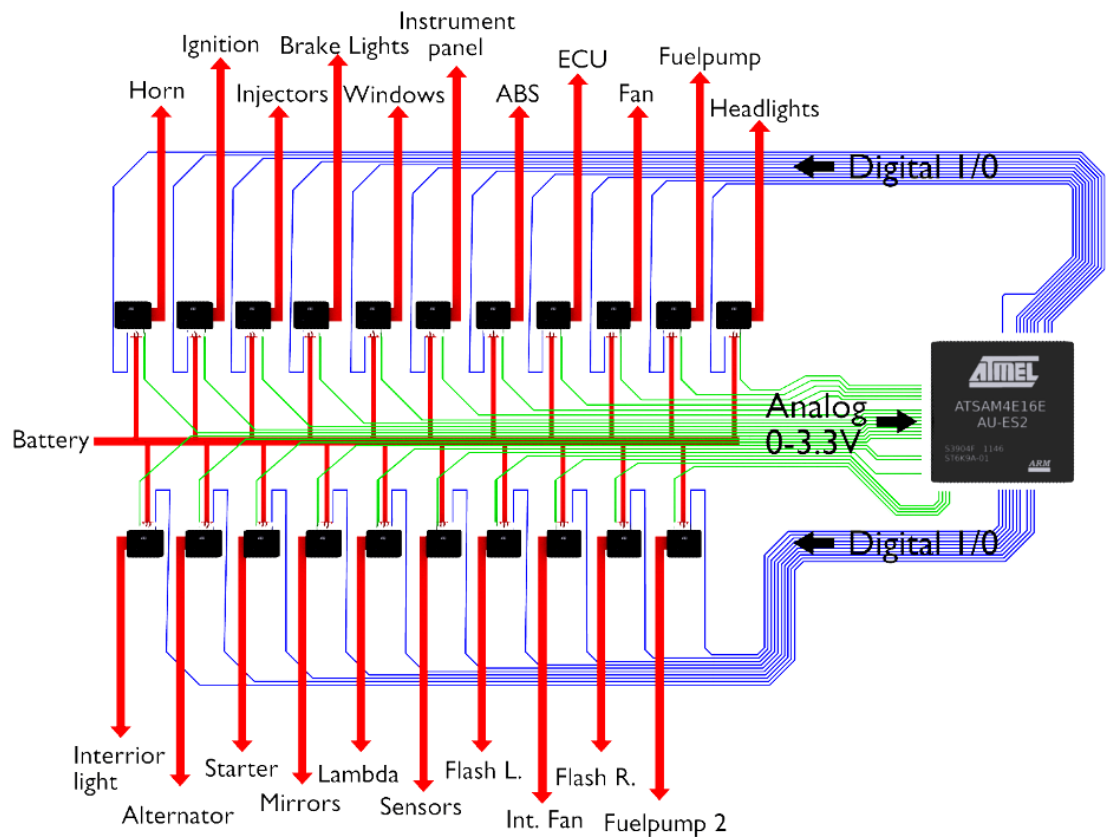


Kuva 8. Releen mittaus.

Resistiivisiä kuormia ovat esimerkiksi takalasi- ja istuinlämmitin. Lämmityslangan läpi kulkee virta ja vastuslanka lämpenee virran vaikutuksesta. Resistiiviset kuormat eivät aiheuta ongelmia tai häiriöitä virranjakomodulille.

3 Virranjakomoduuli

Virranjakomoduulin avulla ohjataan sähkölaitteiden kytkeytymistä, sekä valvotaan sulakearvoja. Virranjakomoduulissa on 21 kanavaa, joihin voidaan kytkeä erilaisia sähkölaitteita. Kanavien kytkeytyminen, sulakearvot ja toimintakuntoon palautuminen määritellään Windows-ohjelmalla. Kanavat kytkeytyvät ohjelmallisesti tai virranjakomoduuliin liitettävillä kytkimillä. Kuvassa 9 näkyy mikrokontrolleri, 21 ajuripiiriä sekä virranjakomoduulin toimintaperiaate.



Kuva 9. Yleiskaavio järjestelmän toiminnasta.

Ajuritipiiri on kytkin, joka releen tavoin ohjaa suurempaa virtaa pienellä ohjausvirralla. Ajuritipiirin sisällä on suuren virran kestävä mosfet-transistori ja muuta elektroniikkaa. Piiri antaa ulos analogisen jännitteen (kuva 9. Analog 0—3,3 V), joka kertoo ajuritipiirissä kulkevan virran suuruuden. Mikrokontrolleri valvoo jännitteen avulla ajuritipiirin kautta kulkevaa virtaa ja ohjaa kanavan digitaalisen tulon (kuva 9. Digital 1/0) nollassi, kun sulakearvo ylitetään.

Virranjakomoduulin sulakkeen laukeamistarkkuus on 1 A, kun se perinteisellä sulakkeella on virrasta ja ajasta riippuvainen. Sähköjohtojen turvaamisen kannalta asialla ei ole merkitystä, mutta vikaantunut laite saattaa pelastua tai säilyä korjaukelpoisena virranjakomoduulin tarkan sulakevalvonnan avulla. Laitteessa on otettu huomioon induktiivisten ja kapasitiivisten kuormien virtasyöksy ohjelmoimalla 50 ms:n viive sulakevalvontaan. Viive tapahtuu aina, kun kanava kytetään päälle ja sen aikana kanavan sulakearvoa ei valvota.

3.1 Suunnittelu

Tämän insinööriyön pohjalta on tarkoitus perustaa oma yritys ja sen vuoksi pyrin käyttämään ilmaisia ohjelmia tämän työn tekemiseen. Tällä on suuri merkitys aloittavan yrityksen kannattavuuteen. Erityisesti kaupalliset piirilevynsuunnitteluun tarkoitetut ohjelmistot voivat maksaa useita tuhansia euroja kertaostoksena tai olla kausiveloitteisia. Tähän työhön käytetyt ohjelmat ovat ilmaisia. Poikkeuksena Gerberlogix ja Microsoft Visual Studio Enterprise.

Piirilevyn suunnittelin KiCad-ohjelmalla, joka yllätti positiivisesti ollakseen ilmainen piirilevynsuunnitteluohjelmisto. Elektroniikkasimulointiin käytin LtSpice-ohjelmaa. Piirilevyn Gerber-tiedostot tarkistin Gerberlogix-ohjelmalla. Mikrokontrollerin ohjelmointiin käytin Atmel Studio 7-ohjelmaa. Windows-ohjelman ohjelmoin Visual Studiolla ja C# ohjelmointikielellä.

Sähkösuunnittelun lähdetietona käytin pääosin komponenttivalmistajien datalehtiä. Datalehdessä kerrotaan tiivistettynä komponentin arvot, ominaisuudet ja asennusohjeet. Datalehdissä ei yleensä oteta kantaa asennusympäristön vaatimiin suojauksiin. Häiriön-suojaukseen tarvittavat suunnitteluratkaisut täytyy usein tehdä itse. Komponenttivalmistajilta saattaa löytyä datalehden lisäksi kattavampia yleismallisia tai omiin tuotteisiin sidottuja asennusohjeita piirilevynsuunnitteluun.

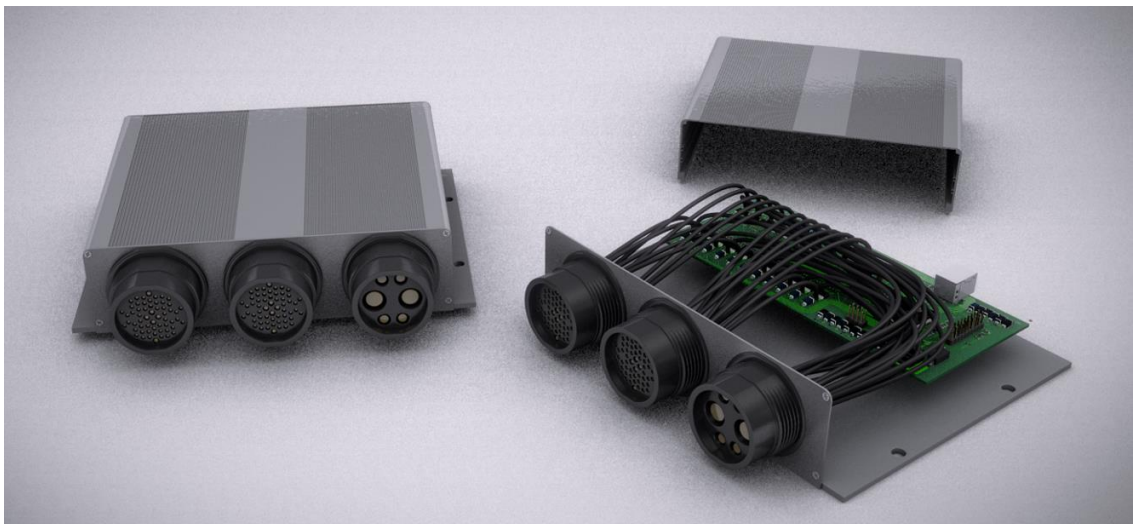
Elektroniikan perusratkaisut komponentin suojaamiseksi ovat tuttuja, mutta kokonaisuuden hahmottaminen suojausten osalta oli vielä epäselvää. Yritin etsiä sähkökaavioita autosähköympäristön rakennetuista laitteista, jotta saisin jonkinlaisen käsityksen tarvittavista suojauksista. Tätä varten tutustuin MegaSquirt 3 sähkökaavioon. MegaSquirt 3 on

harrastajille suunniteltu ajoneuvon moottorinohjausyksikkö, jonka voi tilata osissa ja rakentaa itse valmiiksi. [4]

Suunnitteluvaiheessa määrittelin kriteerit, jolla lähdin laitetta toteuttamaan:

- vähintään 16 kanavaa
- USB (Universal Serial Bus)
- CAN-väylä (Controller Area Network)
- 32-Bit ARM prosessori
- kaksikerroksinen piirilevy. Max 170 mm x 170 mm
- Windows-ohjelma laitteen käyttöä varten
- piirin katkaisunopeus vähintään yhtä nopea kuin perinteinen sulake
- vähintään 8 ohjelmoitavaa kytkintä

Kuvassa 10 virranjakomodulin 3D-malli. 3D-mallin avulla voidaan suunnitteluvaiheessa varmistua, että osat sopivat yhteen. Tein 3D-mallin Blender 3D-mallinnusohjelmalla.



Kuva 10. 3D-mallinnus virranjakomodulista.

3.2 Komponenttien valinta

Komponenttien valintaan ratkaisevina tekijöinä olivat komponentin varastosaldo, hinta, lämpötilankesto ja risk-arvosana. Työ toteutettiin pääosin pintaliitoskomponenteilla. Pintaliitoskomponenteilla saadaan vähennettyä häiriöitä sekä mahdollistetaan piirilevyjen koneellinen ladonta tuotantovaiheessa.

Korvaavien komponenttien etsiminen tuotannosta poistuvien tilalle vie aikaa ja voi tuoda mukanaan uusia ongelmia. Pitkällä aikavälillä tällä on suuri merkitys valmistettavalle elektroniselle laitteelle. Parts.io (<https://parts.io/>) on palvelu, joka ilmoittaa elektroniikan komponenteille risk-arvosanan. Matalan risk-arvosanan omaava komponentti on pitkään tuotannossa ja saatavilla. Palvelu oli ilmainen suunnitteluvaiheessa, mutta nykyään se on maksullinen.

Autoympäristössä komponentit joutuvat alttiiksi suurille lämpötilanvaihteluille. Tästä johtuen alumiinisia elektrolyyttikondensaattoreita ei suositella käytettäväksi. Lämpötilavaihtelun vuoksi ne alkavat vuotamaan ajan myötä. Tantaalikondensaattorit ovat kalliimpia, mutta ne soveltuvat korvaamaan elektrolyyttikondensaattorit.

3.3 Mikrokontrolleri

Päätin projektin alkuvaiheessa toteuttaa työn ARM-arkkitehtuuriin perustuvalla mikrokontrollerilla. ARM on tällä hetkellä sulautettujen maailmassa valtaa pitävä arkkitehtuuri, johon kaikki merkittävät valmistajat satsaavat. Mikrokontrolleriksi valitsin SAM4E16E:n Atmelin valikoimasta.

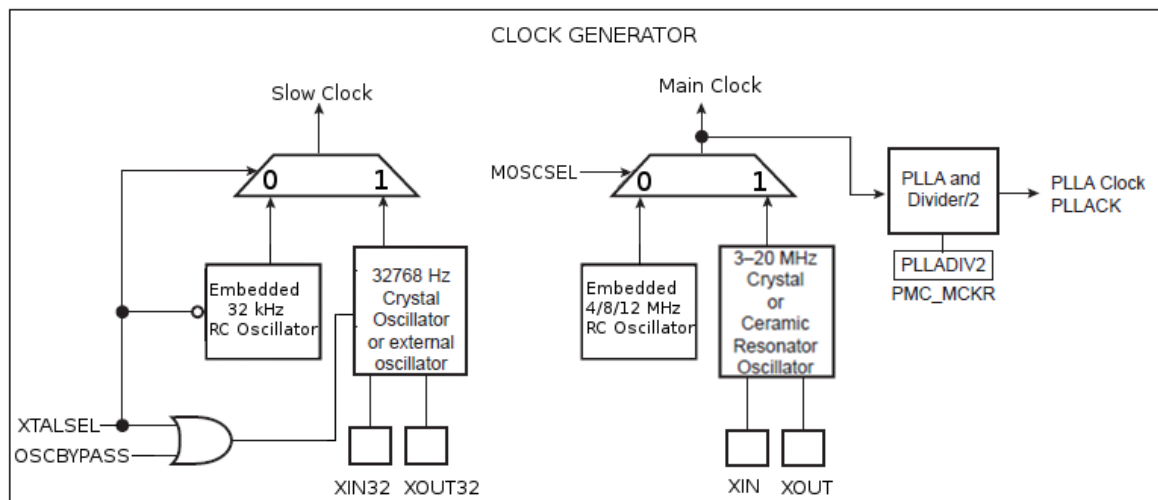
SAM4E16E on 144-pinninen 32-bittinen ARM-prosessori, joka perustuu Cortex-M4-ytimeen. Maksimi kellotaajuus on 120 Mhz ja käyttöjännite 3,3 V. Mikrokontrollerissa on suuri 1 MB:n flash-muisti ohjelmalle ja 128 kb:n työmuisti. Analogiakanavia on 23, joista CAN-väylä vie kaksi. Mikrokontrollerissa on kattava oheislaitteisto. Tässä työssä käytettäviä oheislaitteita ovat CAN-väylä, USB, UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) ja I^2C . [5, s. 1.]

Mikrokontrolleri generoi tarvitsemansa kellotaajuudet kahden oskillaattorin avulla. Nopean oskillaattorin avulla generoidaan pääkellotaajuus ja oheislaitteiden kellotaajuudet. Hidasta oskillaattoria käytetään virransäästötilaan sekä RTC:n (Real Time Clock) generoimiseen. Kellotaajuudet asetetaan ohjelmallisesti jakamalla ja kertomalla nopean oskillaattorin taajuudesta. Esimerkiksi kaavalla

$$12 \text{ MHz} * 50 / 3 / 2 = 100 \text{ Mhz} \quad (1)$$

asetetaan tässä työssä käytetty 100 Mhz:n pääkellotaajuus ulkoista 12 Mhz:n oskillaattoria käyttäen. [5, s. 571, 580.]

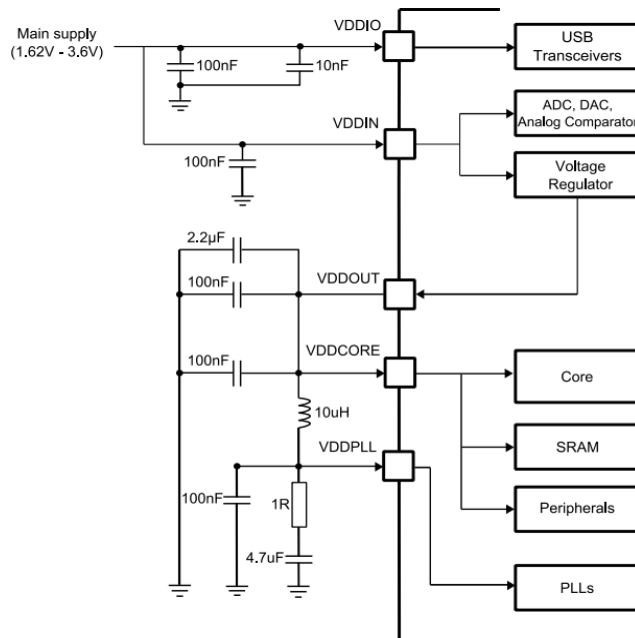
SAM4E16E mikrokontrolleriin on sisäänrakennettu nopea sekä hidas RC-oskillaattori, jotka voidaan korvata ulkoisilla. Tietyt synkronoidut toteutukset, kuten USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter) ja USB vaativat ulkoisen oskillaattorin niiden suuremman tarkkuuden vuoksi. Ulkoiset oskillaattorit liitetään mikrokontrollerin XIN32-, XOUT32-, XIN-, XOUT-pinneihin kuvassa 11.



Kuva 11. SAM4E16E kellojärjestelmän kaavio.

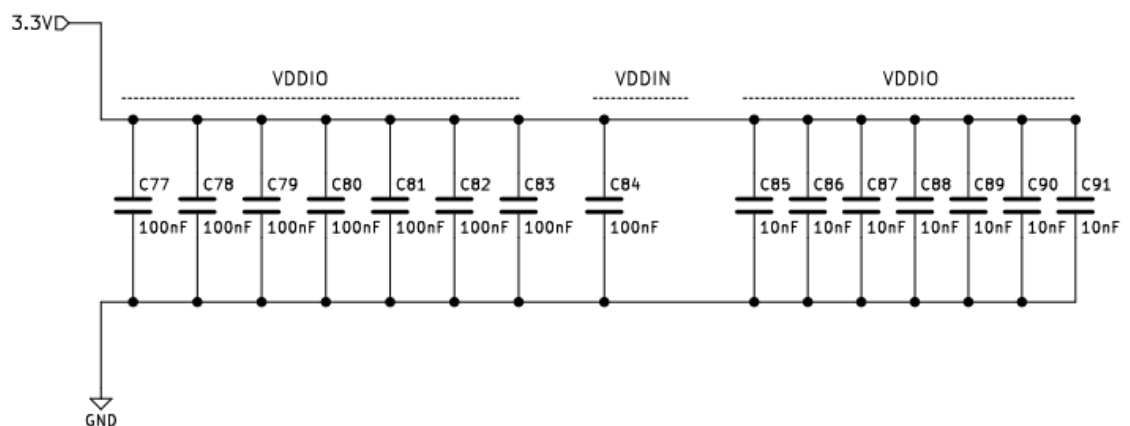
USB:n vuoksi sisäinen nopea RC-oskillaattori on korvattu 12 Mhz:n ulkoisella oskillaattorilla. Sisäänrakennetun RC-oskillaattorin tarkkuus ei riitä siihen, että mikrokontrolleri saa synkronoitua itsensä USB-kellotaajuuteen. RTC ei ole käytössä, joten käytän sisäänrakennettua RC-oskillaattoria hitaan kellotaajuuden generoimiseen. [5, s. 1142.]

Kuvassa 12 on SAM4E16E mikrokontrollerin virranjako- ja suodatusverkosto. Mikrokontrollerissa on kaksi jänniteverkkoa. Ulkoisen jänniteregulaattorin syöttämä 3,3 V:n jänniteverkko ja sisäinen regulaattorin 1,2 V:n jänniteverkko. Mikrokontrollerissa on useita virransyöttöpinnjä molemmista jänniteverkoissa. Jokaiselle virransyöttöpinnille täytyy laittaa omat suodatuskondensaattorit mahdollisimman lähelle pinniä. [6, s. 3 – 4.]



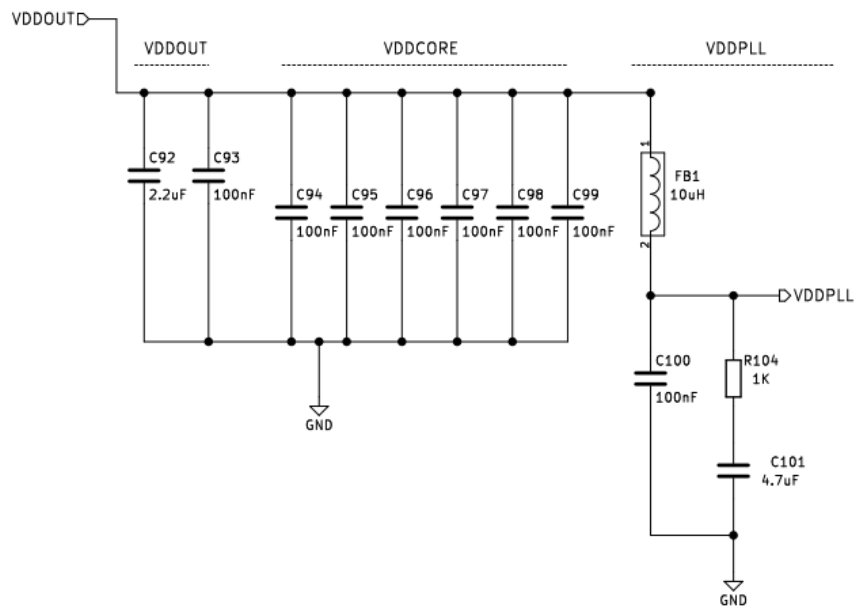
Kuva 12. SAM4E16E virranjakoverkosto. [5, s. 3.]

Kuvassa 13 näkyy SAM4E16E mikrokontrollerin 3,3 V:n virransyöttö ja suodatusverkon KiCad-sähkökaavio.



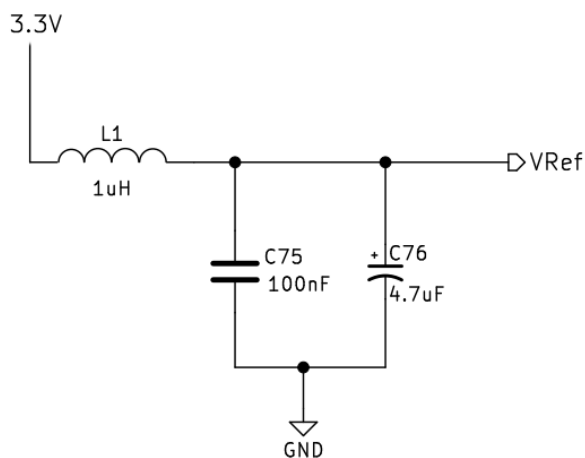
Kuva 13. Mikrokontrollerin virtasuodatus KiCad-kaavio.

Kuvassa 14 on mikrokontrollerin sisäisen regulaattorin 1,2 V:n virransyöttö ja suodatusverkoston KiCad-sähkökaavio.



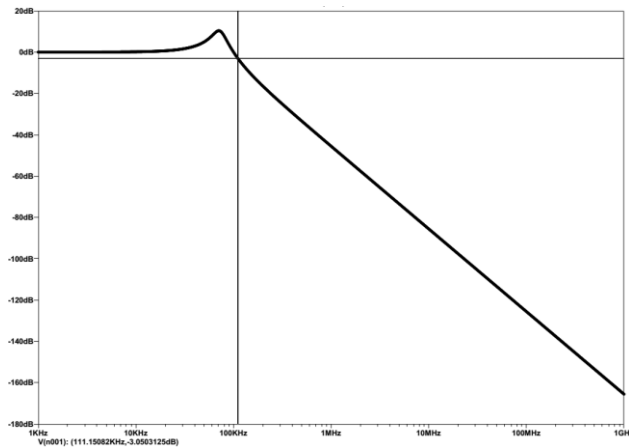
Kuva 14. Mikrokontrollerin oheislaitteiden virtasuodatus KiCad-kaavio.

Kuvassa 15 näkyy mikrokontrollerin referenssijännitteen suodatusverkosto. Referenssijännitteelle on syytä laittaa puskurikondensaattori, jotta jännite olisi mahdollisimman vakaa. Koska kyseessä on autosähköympäristö, päädyin hieman järeämpään ratkaisuun. Tutkin MegaSquirt 3 piirikaaviota ja siinä referenssi jännite on suodatettu LC-piirillä. Siisäilytin saman suodatuksen omaan piirilevy-suunnitelmaan. Mikäli LC-suodatuspiiri todetaan tarpeettomaksi myöhemmin, voidaan se korvata oikosululla. [4]



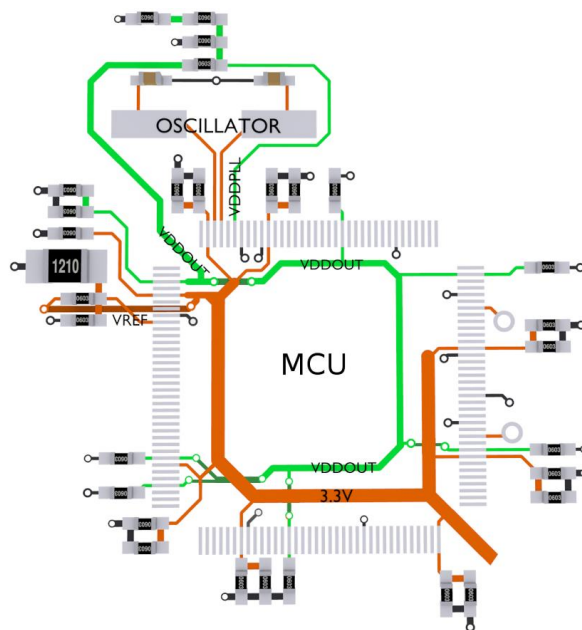
Kuva 15. Referenssijännite LC-suodatuspiirin Kicad-kaavio.

Kuvassa 16 näkyy LT-Spice simulaation bode-diagrammi referenssijännitteen LC-suodatuspiiristä. Kytkennän suodatustaajuus on noin 100 kHz.



Kuva 16. LT-Spice bode-diagrammi LC-suodatusverkosta.

Kuvassa 17 näkyy mikrokontrollerin layout. Datalehti ohjeistaa, että suodatuskondensaattorit asennetaan pintapuolelle mahdollisimman lähelle virransyöttöpinniä. Vetoja pii-rilevyn maapuolella tuli välttää, jotta mikrokontrollerin alapuolelle saadaan mahdollisimman yhtenäinen maa-alue. Tämä parantaa mikrokontrollerin toimintaa ja vähentää häiriöitä. Ulkoisen regulaattorin 3,3 V:n jänniteverkko on kuvassa oranssilla ja sisäisen regulaattorin 1,2 V:n jänniteverkko virheällä värillä. [6, s. 4.]



Kuva 17. Mikrokontrollerin layout.

3.4 Jännitelähde

Käyttöjännitteen tuottaa autokäyttöön soveltuva LM2937 lineaarinen LDO (Low Drop Out)-regulaattori. Regulaattori muuttaa auton 12—14,5 V:n jännitteen vakaaksi virranjakomodulin elektronisille komponenteille sopivaksi 3,3 V:n jännitteeksi. Regulaattori antaa maksimissaan 500 mA ulos. [7, s. 1.]

LM2937 sisäänrakennettuihin suojauksiin kuuluvat seuraavat ominaisuudet:

- suojaus väärinpäin kytketylle akulle
- oikosulku- ja lämpötilasuojattu
- +60 V:n ja -50 V:n transientin kesto

Regulaattori alentaa jännitteen ja ylimääräinen jännite muuttuu lämpöenergiaksi regulaattorissa. Se kuinka paljon lämpöä syntyy, riippuu regulaattorin läpi kulkevan virran ja hukattavan jännitteen suuruudesta. Tarvittaessa regulaattoriin muodostuva lämpö täytyy siirtää pois. Suunnitteluvaiheessa laskin datalehtien mukaan laitteen kokonaisvirrankulutuksen olevan noin 60 mA aktiivitilassa.

Lasketaan regulaattorin jäähdytystarve. T_J on regulaattorin maksimilämpötila ja T_A on regulaattorin ympäristön ilman lämpötila.

$$V_I = 14,5 \text{ V}, \quad V_O = 3,3 \text{ V}, \quad I_O = 60 \text{ mA}, \quad T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_A = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ensin lasketaan regulaattorissa haihdutettava lämpöenergia $P_{D(\max)}$. [8, s. 12.]

$$P_{D(\max)} = (V_I - V_O) * I_O = (14,5 \text{ V} - 3,3 \text{ V}) * 0,06 \text{ A} = 0,672 \text{ W} \quad (2)$$

Lasketaan maksimilämpötilanousu $T_{R(\max)}$. [8, s. 5.]

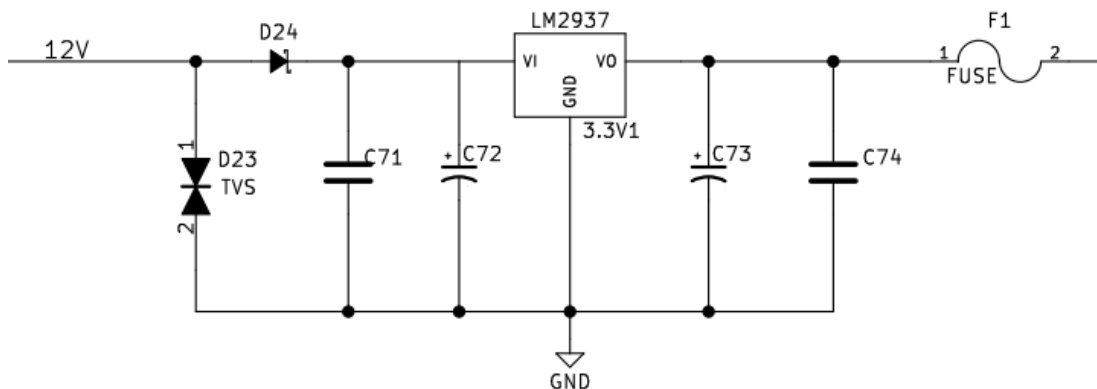
$$T_{R(\max)} = T_{J(\max)} - T_{A(\max)} = 125 \text{ }^\circ\text{C} - 40 \text{ }^\circ\text{C} = 85 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3)$$

Lasketaan regulaattorin ja ympäristön ilman lämpötilan lämpöresistanssi $R_{\theta JA}$. [8, s. 5.]

$R_{\theta JA}$ täytyy olla $\geq 80 \text{ }^\circ\text{C/W}$, jolloin erillistä jäähdytystä ei vaadita.

$$R_{\theta JA} = \frac{T_{R(\max)}}{P_D} = \frac{85\text{ }^{\circ}\text{C}}{0,672\text{ W}} = 126,48 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \quad (4)$$

Kuvassa 18 näkyy regulaattorin KiCad-sähkökaavio. Regulaattorin suojausten tekeminen on äärimmäisen tärkeää, koska regulaattori ottaa vastaan verkosta tulevat häiriöt. Datalehti määrittelee vain minimiarvot suodatuskondensaattoreille. Muut komponentit ovat lisätty suojaamaan häiriöiltä. Käydään läpi sähkökaavion kytkentä ja komponentit. [7, s. 11.]



Kuva 18. Regulaattorin KiCad-sähkökaavio.

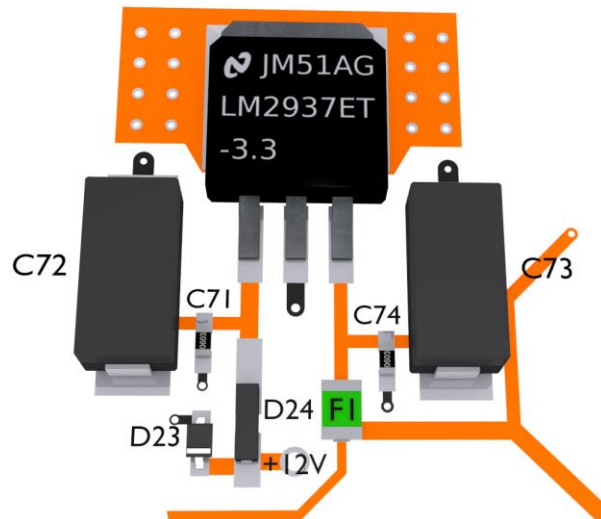
C71, C72, C73, C74: Sijoitin regulaattorin molemmille puolille pienen keraamisen ja suuren tantaalikondensaattorin. Kahdella kondensaattorilla saavutetaan kattavampi häiriösuodatus. Pienet keraamiset kondensaattorit suodattavat korkeataajuiset häiriöt ja nopeat transientit. Suuret tantaalikondensaattorit toimivat puskurikondensaattoreina sekä matalataajuisen ripplen suodatukseen.

D23: TVS (Transient Voltage Suppression)-diodi on tarkoitettu elektroniikan laitteiden suojaukseen. Se on äärimmäisen nopea toimimaan. D23 on kaksisuuntainen ja tässä tapauksessa sen tehtävä on ohjata > 20 V:n ylijännitepiikit maahan sekä negatiivisen piikin sattuessa 12 V:n linjassa tarjota matalaimpedanssinen reitti maasta ulos.

D24: Schottky-diodi suojaa laitetta negatiiviselta transientilta, sekä väärinpäin kytketyltä akulta. Valitsin tähän schottky-diodin sen pienen jännitehäviön vuoksi.

F1: On 500 mA itseresetoituva sulake.

Kuvassa 19 näkyy jännitelähteen layout. Regulaattorilla on passiivinen jäähdytys. Regulaattorin runko on juotettu kuparialueelle, josta on läpiviennit piirilevyn toiselle puolelle maapintaan. Maapinta on piirilevyn kokoinen kuparialue, jonne lämpö leviää ja haihtuu pois. Lämpötilalaskukaavojen (2—4) mukaan lisäjäähdytys ei ole tarpeen, mutta jäähdytyksen tekeminen ei lisää kustannuksia tai työmäärää, joten sisällytin sen piirilevysuunnitelmaan. [7, s. 15.]



Kuva 19. Regulaattorin layout.

3.5 Ajuripiiri

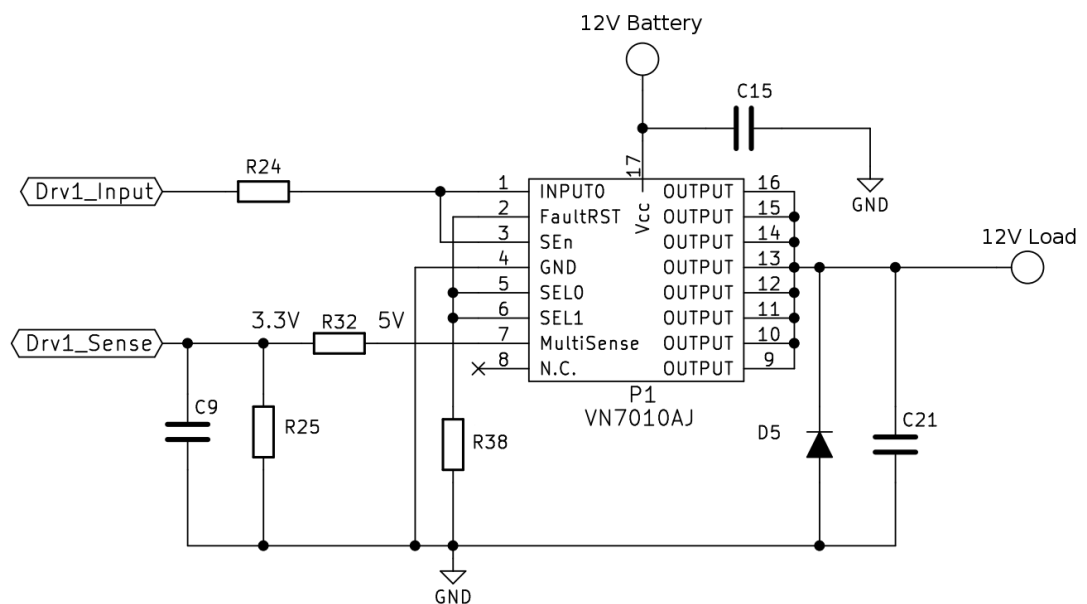
Valitsin ajuripiiriksi ajoneuvokäyttöön tarkoitetun STMicroelectronicsin valmistaman VN7010AJ:n. Piiri on positiiviselle puolelle kytkettävä, ja se on suunniteltu resistiivisille, kapasitiivisille ja induktiivisille kuormille. Piiriä voidaan ohjata 3,3 V:n logiikalla. Maksimivirta on 91 A ja resistanssi saturaatiossa on 10 mΩ. [9, s. 1.]

VN7010AJ antaa analogisen diagnostiikka tiedon (0—5 V) multipleksatun multisense pinnan kautta. Analogiatieto saadaan yhdestä pinnistä ja haluttu tieto valitaan S_{EN} -, SEL0- ja SEL1-pinnin avulla. Analogiatiedot ovat piirissä kulkeva virta, jännite sekä ajuripiirin lämpötila. Lisäkytkennällä on mahdollista saada digitaalinen tieto avoimesta piiristä ja oikosulusta. [3, s. 11.]

VN7010AJ ajuripiiriin on sisäänrakennettu erilaisia suojauksia:

- alijännitteellä (4 V) sammuttaa piirin
- ylijännitesuojattu ISO7637-2:2004
- käyttöjännitteen tai maan katketessa sammuttaa piirin turvallisesti
- yllämpötilasuojattu (175 °C)
- ylivirtasuojattu (91 A)
- ESD (Electrostatic Discharge) suojattu

Kuvassa 20 näkyy ajuripiiriin KiCad-sähkökaavio. Käydään läpi sähkökaavion kytkentä, komponentit.

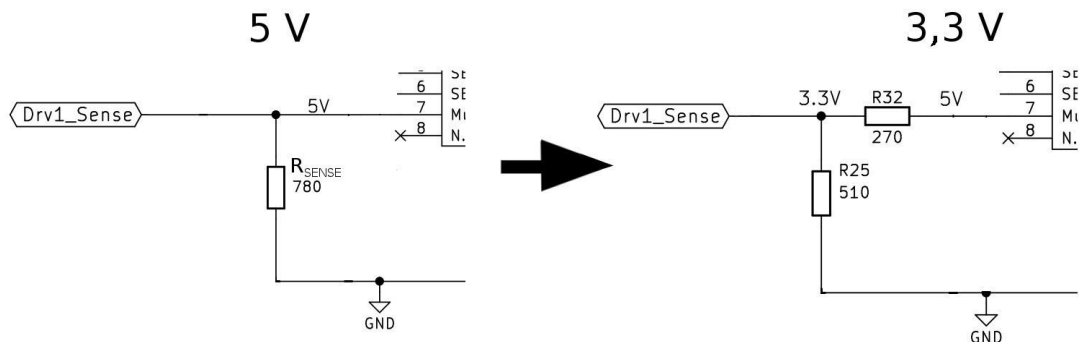


Kuva 20. Ajuripiiriin KiCad-sähkökaavio.

Drv1_Input: Mikrokontrolleri ohjaa ajuripiiriin päälle tai pois (3,3 V = On tai 0 V = Off).

Drv1_Sense: Multisense pinni antaa ulos 0—5 V:n jännitteen. Jännite kertoo ajuripiirissä kulkevan päävirran arvon. Virta on skaalattu kopio päävirrasta, jonka arvo riippuu kalibrointivastuksesta $R_{sense} = R32$. Datalehdessä löytyy ohjeet, miten vastuksen arvo laskeetaan K-kertoimen avulla. Käytännössä mitä pienempi vastus sitä isompaa virtaa piiri pysyy tulkitsemaan tarkkuuden kärsiessä pieniä virtoja lukiessa. 30 A riittää kanavan suurimmaksi mittausravoksi, joten kalibrointivastukseksi valikoitui 780 Ω . [3, s. 119]

Multisense piiriä täytyy tämän jälkeen hieman muokata, koska mikrokontrollerin analogiapinni pystyy lukemaan korkeintaan 3,3 V. Tehdään jännitteenjakopiiri lisäämällä vastus. Vastusten yhteenlasketun resistanssin pitää olla sama kuin alkuperäisen kalibrointivastuksen eli 780 Ω . Virta pysyy samana, mutta jännite putoaa 5 V:sta \rightarrow 3,3 V:n. Kuvassa 21 näkyy jännitejakopiirin lisääminen piirilevysuunnitelmaan.



Kuva 21. Jännitemuutos kaavio.

Lasketaan muuttunut jännite jännitteenjakopiirillä.

$$V_{multisense\ 3.3\ V} = R25 * \frac{V_{multisense\ 5\ V}}{R32+R25} = 510\ \Omega * \frac{5\ V}{270\ \Omega+510\ \Omega} \approx 3,269\ V \quad (5)$$

C9: Kondensaattorin tarkoitus on parantaa analogiamittauksen tarkkuutta. Se muodostaa R32 vastuksen kanssa RC-suodatinpiirin, eli alipäästösuodattimen. Sen tarkoitus on suodattaa korkeataajuisia häiriöitä signaalista. Datalehti suosittelee 470 pF:n arvoa. [3, s. 13.]

Lasketaan suodatustaajuus.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 * \pi * 270 \Omega * 470 * 10^{-12} F} = 1254176 \text{ Hz} \approx 1,25 \text{ Mhz} \quad (6)$$

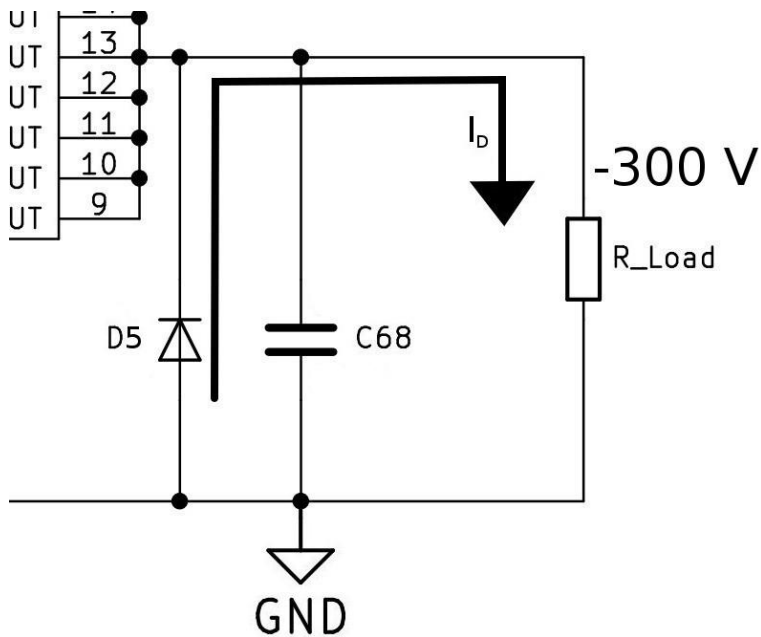
R24: Mikäli 12 V:n jännitesyöttö katkeaa ajuripiiriltä ja virranjakomoduliin on kytketty induktiivinen kuorma, voi tapahtua vaaratilanne, jossa ajuripiirin kaikkiin pinneihin syntyy jopa -150 V:n jännite. R24 vastuksen on tarkoitus suojella mikrokontrollerin pinniä rajoittamalla virta 10 mA:n. Alempana kohdassa D5 esitelty diodikytkentä tekee tämän vastuksen tarpeettomaksi ja se voidaan poistaa. Vastus on unohtunut kytkentään siinä vaiheessa, kun lisäksi D5 diodikytkennän. [3, s. 109.]

C21: 10 nF:n kondensaattori suodattaa korkeataajuisia häiriöitä, erityisesti ESD-purkauksia. [3, s. 14.]

C15: Datalehti suosittelee 100 nF:n kondensaattoria. Sen tehtävänä on suodattaa ajuripiirin aiheuttamaa korkeataajuisia häiriöitä 12 V:n jännitelinjasta. Häiriöt syntyvät ajuripiirin sisäisestä toiminnasta. Erityisesti PWM (Pulse Width Modulation) aiheuttaa usein häiriöitä. [3, s. 14.]

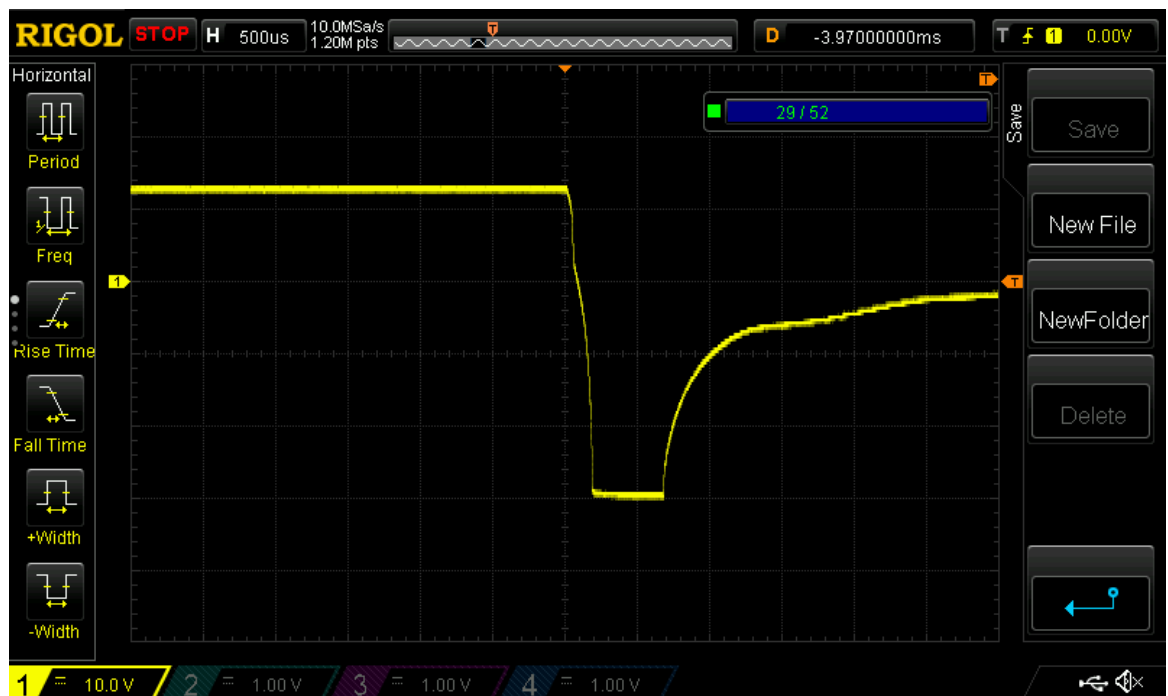
R38: Datalehti ohjeistaa kytkemään käyttämättä jääneet pinnit maahan 15 KΩ:n vastuksen kautta. [3, s. 14.]

D5: Kun induktiivinen kuorma kytketään pois päältä, syntyy kuorman ja ajuripiirin väliin pahimmassa tapauksessa jopa satojen volttien negatiivinen jännitepiikki. VN7010AJ kestää tämän jännitepiikin tiettyyn pisteeseen asti. Koska laiteeseen voidaan kytkeä käyttäjän toimesta erilaisia laitteita, ei voida olla etukäteen varmoja sisäänrakennetun suojauksen riittävydestä. Kuvassa 22 D5 diodi on lisätty kytkentään turvaamaan ajuripiiriä tarjoamalla matalaimpedanssinen reitti I_D virralle. [3, s. 102.]



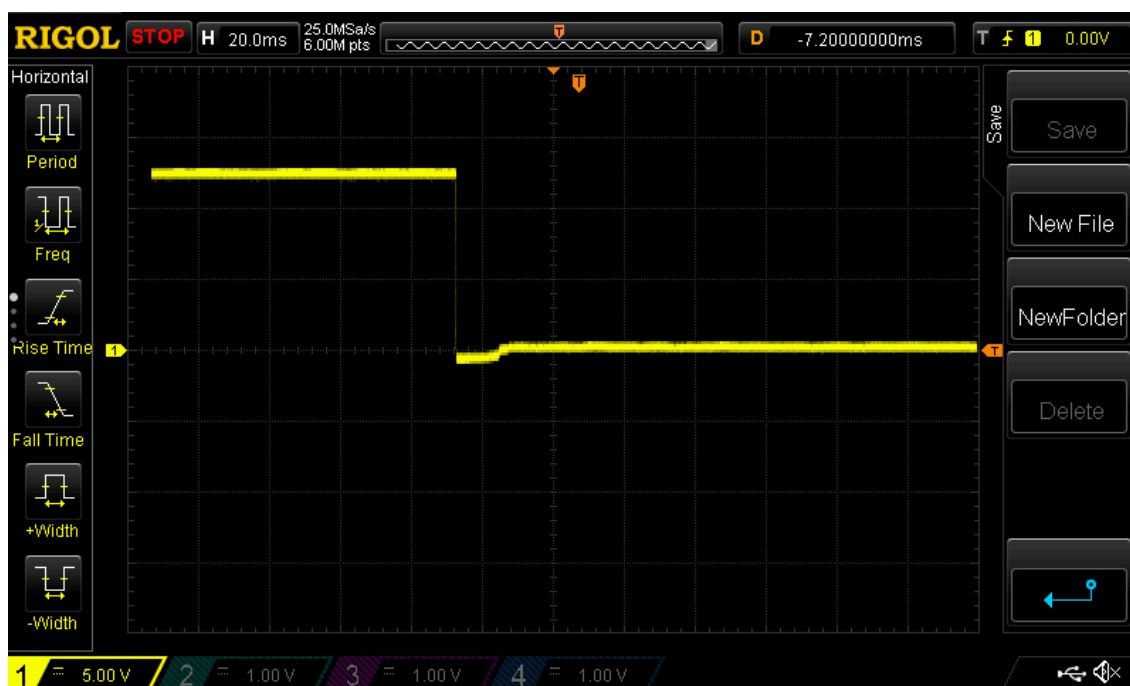
Kuva 22. Diodikytkennän toiminta.

Selvitin mittauksella diodikytkennän vaikutuksen. Aikaisemmassa mittauksessa (s.7), ilmeni että autorele aiheuttaa pois kytkettäessä -300 V:n negatiivisen jännitepiikin. Suoritin mittauksen uudestaan niin, että rele oli kytketty ajuripiiriin ilman D5 diodia. Kuvassa 23 näkyy kuinka VN7010AJ sisäinen kytkentä rajaa negatiivisen piikin n. -30 V:iin.



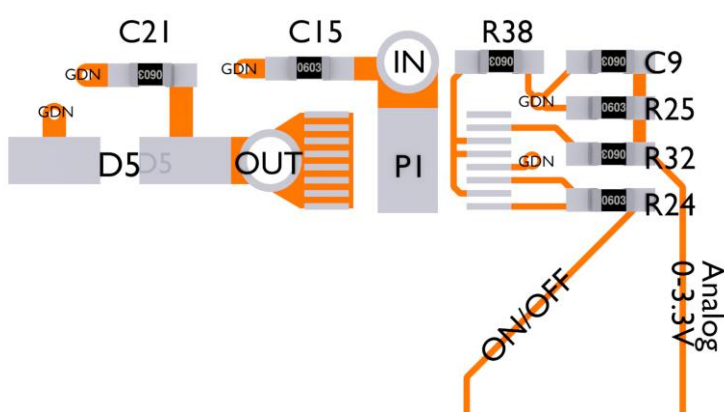
Kuva 23. Ajuripiiri ilman D5 diodia.

Kuvassa 24 näkyy sama mittaus D5 diodikytkennän lisäämisen jälkeen. Negatiivinen piikki leikkaantui pois lähes kokonaan.



Kuva 24. Ajuripiiri D5 diodin kanssa

Kuvassa 25 näkyy ajuripiirin layout. Layout on sama kaikissa 21 ajuripirissä. Ajuripiiri juotetaan pohjasta kiinni P1 juotosalueelle kuumailmapuhaltimella. Juotoksen onnistumista ei voida todeta silmämääräisesti. Halusin selvittää juotoksen laadun ja tämä selviää mittaamalla ajuripiirin jännitehäviö ja laskemalla ohmin lakia käyttäen piirin resistanssi. Tulosta verrataan valmistajan ilmoittamaan arvoon.



Kuva 25. Ajuripiirin layout.

Mittasin yleismittarilla ajuripiirin sisääntulon (IN) ja ulostulon (OUT) välillä 0,05 V:n jännitehäviön. Piirissä oli kuormana polttimo, joka kulutti virtaa 4,17 A.

Ohmin lakia käyttäen saadaan laskettua ajuripiirin resistanssi.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,05 V}{4,17 A} = 0,0119 \Omega \approx 12 m\Omega \quad (7)$$

12 mΩ on riittävän lähellä valmistajan ilmoittamaa 10 mΩ. Voin todeta juotostekniikan toimivaksi.

3.6 Muisti

SAM4E16E sisältää 1 Mb Flash muistia, 128 kByte SRAM (Static Random Access Memory) muistia ja ROM (Read Only Memory) muistin. Flash muisti on haihtumaton muisti, johon tallennetaan mikroprosessorin suorittama ohjelma. SRAM on nopea haihtuva työmuisti, johon tallennetaan käsiteltävä ajonaikainen data. ROM-muistilla on mikroprosessorin käyttöön liittyviä sovelluksia. [4, s. 25.]

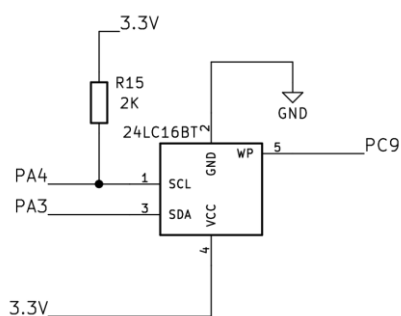
Sulakearvot, kanavakohtaiset tiedot ja asetukset täytyy tallentaa pysyvään muistiin. Atmel tarjoaa ohjelmallisen EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)-simulaation. Ohjelma varaa FLASH muistin loppupäästä muistialueen, joka on kymmenen kertaa isompi kuin tarvittava muisti ja siirtelee dataa algoritminsä mukaisesti. Kirjoituskertojen määrä saadaan nostettua FLASH muistille ominaisesta 10 000 kerrasta, 100 000 kertaan. Maksimi EEPROM-simulaation muistikoko on 512 tavua. [10, s. 5.]

Suunnitelmana oli käyttää EEPROM-simulaatiota, mikäli sen käyttöönotto ei osoittautuisi liian vaikeaksi. Varalta sisällytin ulkoisen EEPROM muistin piirilevysuunnitelmaan. 16Kbit I²C väylään liitettävä 24LC16BT EEPROM muisti kestää jopa miljoona uudelleen kirjoituskertaa ja tarjoaa nelinkertaisen muistimäärän simuloituun FLASH-EEPROM muistiin verrattuna.

Suunnitteluvaiheessa en osannut ottaa huomioon tallennettavan datan määrää, jota alkoi jo alkuvaiheessa kertyä paljon. Sain molemmat muistit toimimaan, mutta Flash-simulaation 512 tavun koko kävi pieneksi ja päätin ottaa ulkoisen EEPROM muistin käyttöön.

Muisti keskustelee mikrokontrollerin kanssa I^2C väylällä. I^2C on sarjamuotoinen protokolla, jossa käytetään kahta linjaa. Toisessa kulkee kello ja toisessa data. Väylässä on vähintään kaksi laitetta, joista toinen on isäntä ja toinen orja. Väylän nopeus on 100 kHz tai 400 kHz. Väyliä tarvitsee toimiakseen kaksi ylösvetovastusta joiden resistanssit riippuvat väylän nopeudesta. [4, s. 815.]

Kuvassa 26 on EEPROM muistin KiCad-sähkökaavio. Muistin kytkentä on hyvin yksinkertainen. [11, s. 5.]



Kuva 26. EEPROM KiCad-sähkökaavio.

Muistin käyttöönotto ei aluksi onnistunut. Syyksi selvisi datalinjan puuttuva ylösvetovastus. Kuvassa 27 (punainen nuoli) näkyy jälkikäteen lisätty vastus. Vastus oli jäänyt laittamatta piirilevyn suunnitteluvaiheessa. [11, s. 5.]



Kuva 27. EEPROM muistin korjaus.

3.7 USB

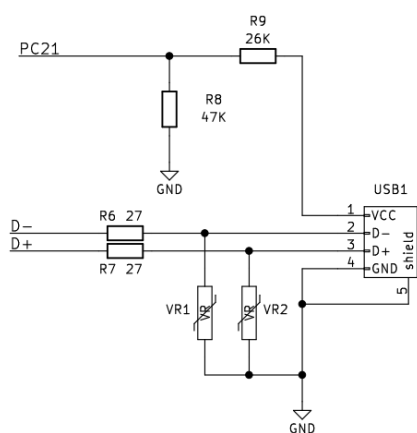
USB-liitäntää käytetään tiedonsiirtoon tietokoneen ja virranjakomodulin välillä. Tietokone ja virranjakomoduli keskustelevat keskenään lähettämällä tilapyyntöjä toisilleen. SAM4E16E pitää sisällään USB 2.0 full-speed 12 Mbit/s liitäntän. Liittimeksi valitsin USB-B liittimen, joka tarjoaa tukevimmän liitäntän kaikista USB liittimistä. Kuvassa 28 näkyy USB-B liitin.



Kuva 28. USB-B liitin.

USB-datasignaalit lähetetään differentiaalisina pareina ja arvo ilmaistaan D- ja D+ välisenä erona. Data siirtyy sarjamuodossa bitteinä. Bitit tallentuvat mikrokontrollerin puskuriin, jossa ne säilyvät, kunnes puskuri luetaan. SAM4E16E USB:n puskurikoko voidaan määrittää 64 tavun ja 16 kilotavun väliltä. Suurempi puskuri vie enemmän kallisarvoista käyttömuistia. Tässä projektissa on määriteltä 128 tavun puskuri, jonka osa datapaketeista ylittää. Tässä tapauksessa datapaketti jaetaan osiin ja mikrokontrolleri pyytää ohjelmalta seuraavan paketin, kun se on saanut luettua ja prosessoitua edellisen. [4, s. 1185.]

Kuvassa 29 näkyy USB:n KiCad-sähkökaavio. Käydään läpi sähkökaavion kytkentä ja komponentit. [6, s.13.]



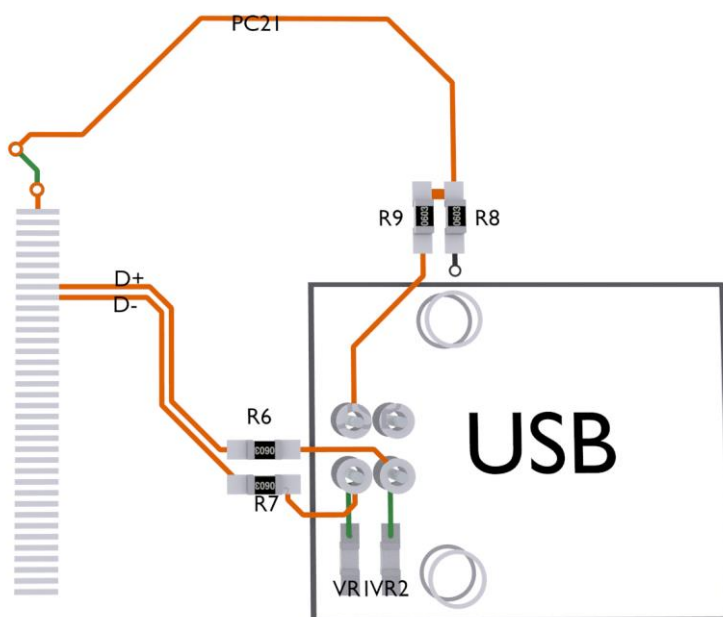
Kuva 29. USB KiCad-sähkökaavio.

R9 ja R8: USB:n VCC-jännite on 5 V. Täytyy suorittaa jännitteen jako 5 V:sta → 3.3 V:n. Signaali ilmoittaa mikrokontrollerille USB:n kytkeytymisestä. [4, s. 1142.]

VR1 ja VR2: Varistorit suojaavat mikrokontrolleria kaapeleissa esiintyviltä transienteilta ohjaamalla > 25 V:n jännitepiikit maahan.

R6 ja R7: Vastukset ovat 27 Ω :n terminointivastukset. Vastusten avulla saadaan sovitettua impedanssit USB-kaapelin sekä mikrokontrollerin välillä. Ilman terminointi vastuksia signaalit heijastuvat osittain takaisin ja aiheuttavat häiriöitä. [4, s. 1142.]

Kuvassa 30 näkyy USB:n layout. USB 2.0 full-speed on nopea differentiaalinen signaali, jonka piirilevysuunnitteluun täytyy kiinnittää tarkempaa huomiota. Nopeat signaalivedot tehdään piirilevylle ensimmäisenä korkealla prioriteetilla. D+ ja D- signaalien pitää kulkea vierekkäin ilman jyrkkiä mutkia. Niiden pitää olla yhtä pitkiä ja yhtenäinen maa piirilevyn toisella puolella. Mikäli signaalien pituuksien sovittamiseksi pitää tehdä toisesta signaalista pidempi, tehdään lisäys signaalin liittimen puoleiseen päähän. Jotta sain signaalivedot mitoitettua yhtä pitkiksi, tein liittimen alkuun D-signaaliin pienen mutkan.



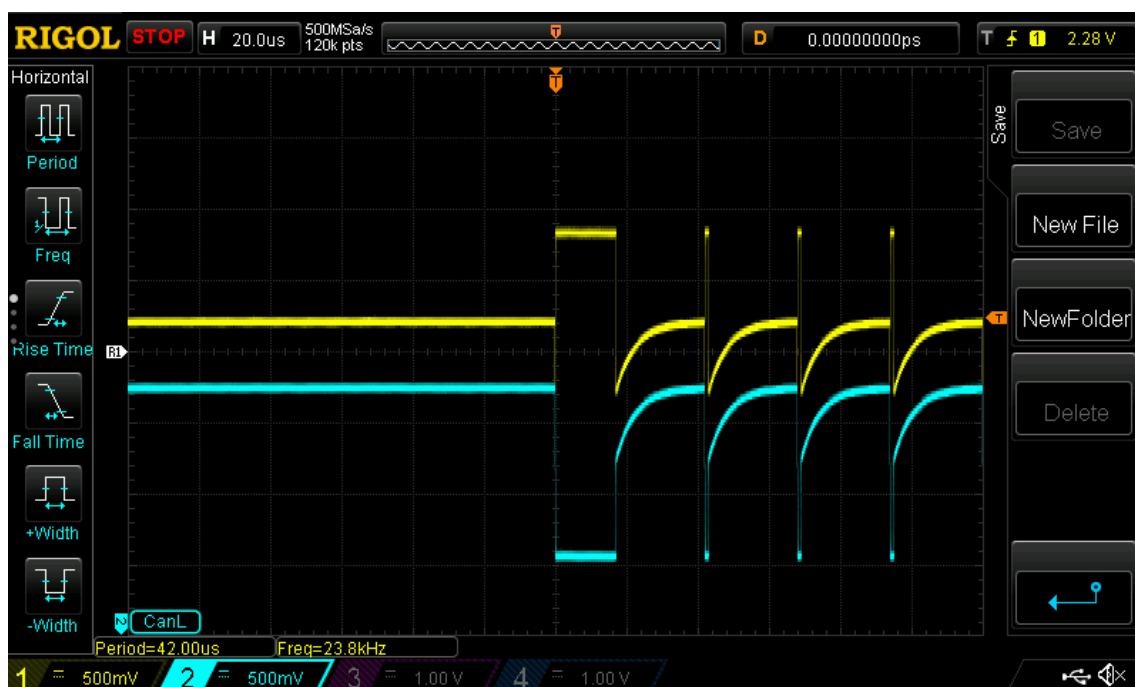
Kuva 30. USB-layout.

3.8 CAN-väylä

CAN on väyläpohjainen tiedonsiirtoprotokolla, joka on muodostunut standardiksi autotekniikassa. CAN-väylän signaalit ovat differentiaalisia ja nopeus 1Mhz. Data liikkuu sarjamuodossa. Väylässä voi olla useita moduuleita ja kaikki moduulit näkevät väylässä liikuvan datan. Datapaketissa on tunniste, jonka avulla moduulit tietävät mikä data kuuluu millekin. Datassa on myös prioriteetti, minkä avulla kriittisempi data saadaan lähettyä perille ennen vähemmän kriittistä. [12]

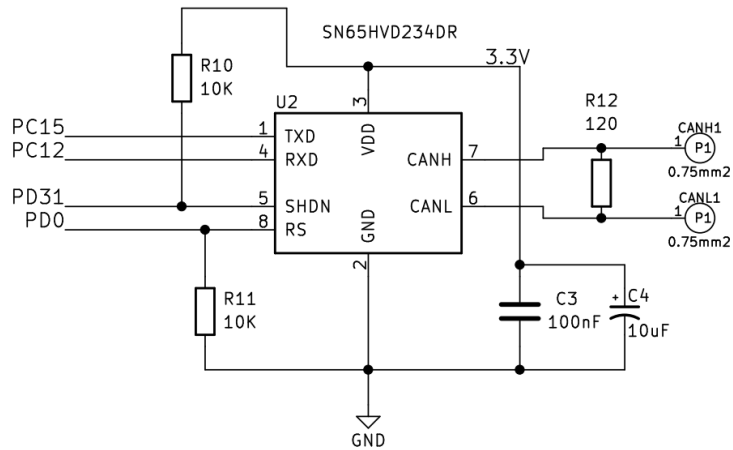
CAN-väylän avulla ECU:sta saadaan auton moottoriohjauksen data käyttöön. Tätä dataa hyväksikäyttäen voidaan autoon ohjelmoida erilaisia toimintoja. Voidaan esimerkiksi ohjata moottorin jäähdyttimen tuuletinta moottorin lämpötilan mukaan. Erilaiset ohjaukset ovat käyttäjän asetettavissa Windows-ohjelmasta.

Totesin CAN-väylän toimivuuden oskilloskoopilla. Käytössä oleva oskilloskooppi ei tue CAN-väylän purkua, joten se ei pysty liipaisemaan CAN-viestiä oikein. Kuvassa 31 näkyy CAN-väylän differentiaalinen signaali. Mittauksessa virranjakomodiuulin CAN-liittimiin on juotettu parikaapeli, jonka päässä on 120 Ω :n terminointivastus.



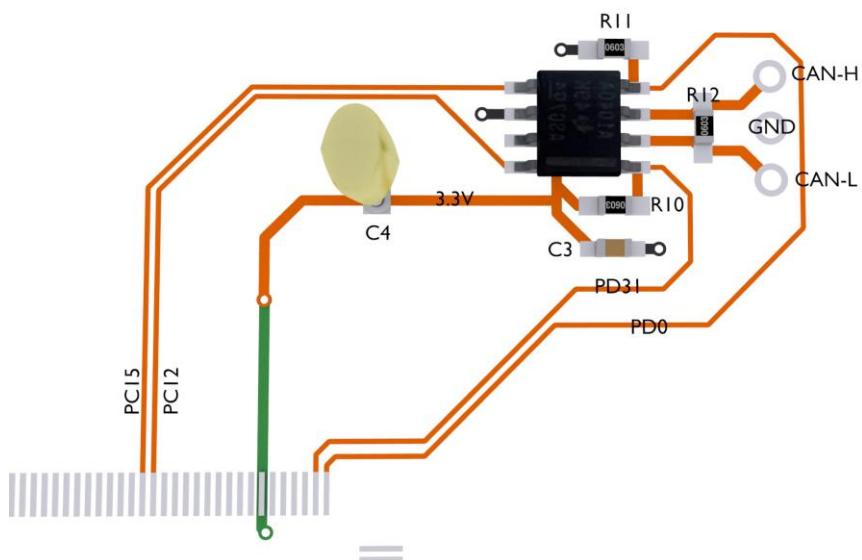
Kuva 31. CAN-väylän oskilloskooppi kuva.

Kuvassa 32 näkyy SN65HVD23DR CAN-moduulin KiCad-sähkökaavio. Komponenttien arvot ovat määriteltä valmistajan datalehdessä. Lisään lopulliseen piirilevyversioon TVS-diodit CANH1 ja CANL1-linjoihin antamaan lisäsuojausta. [13, s. 28.]



Kuva 32. CAN-väylän Kicad-sähkökaavio.

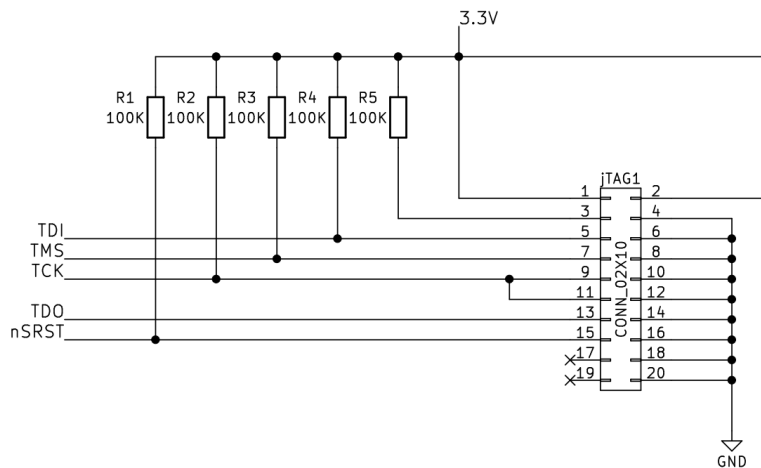
Nopeuden puolesta CAN-väylä ei ole yhtä kriittinen kuin USB. Noudatin silti samoja kriteereitä piirilevyn signaalivedoissa PC15 ja PC12. Kuvassa 33 näkyy CAN-väylän layout.



Kuva 33. CAN-väylän layout.

3.9 JTAG

JTAG on mikrokontrolleiden ohjelmointiin ja ohjelmointivirheiden etsimiseen käytettävä liitäntä. Sen avulla mikrokontrollerin ohjelmaan voidaan laittaa taukoja, jolloin ohjelman suorittaminen pysähtyy ja muistin sisältö voidaan lukea. ARM-järjestö on määritellyt ARM-mikrokontrollereihin 20-pinnisen JTAG liitännän. Liitännän KiCad-sähkökytkentä näkyy kuvassa 34. Liitäntä on tarpeen prototyyppivaiheessa. Tuotantomalleissa se voidaan jättää pois ja tyhjä piiri ohjelmoidaan USB-liitännän kautta. [5, s. 11.]



Kuva 34. JTAG sähkökaavio.

Mikrokontrollerin ohjelmointiin tarvitaan ohjelmointityökalu, joka liitetään JTAG-liittimen ja tietokoneen välille. Ostin tätä varten SAM-ICE JTAG-Emulaattorin, joka näkyy kuvassa 35.



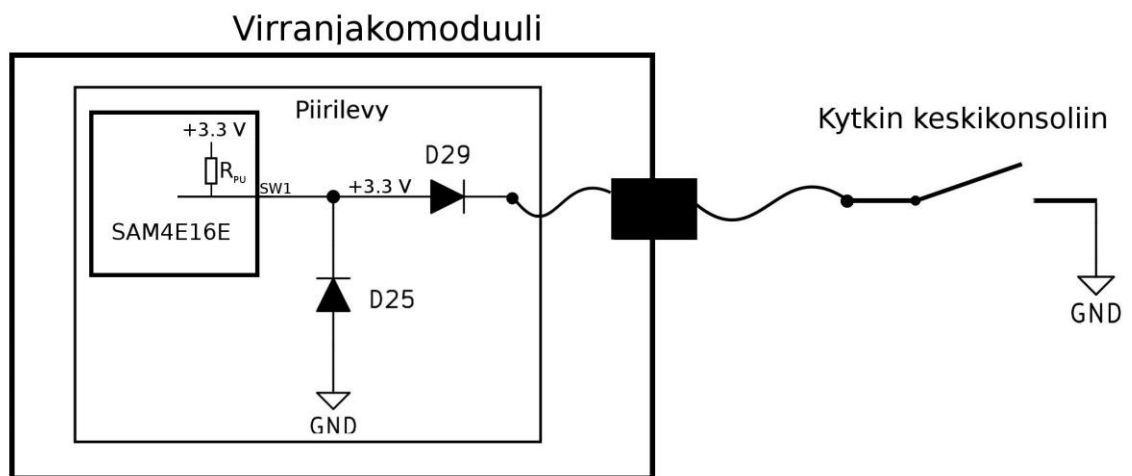
Kuva 35. SAM-ICE JTAG-Emulaattori.

3.10 Kytkimet

Laitteessa on paikat kahdeksalle kytkimelle. Käyttäjä liittää kytkimet virranjakomoduliin ja asentaa kytkimet haluamaansa paikkaan. Kytkimillä ohjataan virranjakomodulia ja siihen kytkettyjä laitteita käyttäjän ohjelmassa määrittämällä tavalla.

Mikrokontrollerin pinni (SW1 kuvassa 36) on ohjelmoitu digitaaliseksi sisääntuloksi. Pinniä seuraa diodikytkentä, joka päättyy piirilevyllä olevaan juotoskaulukseen. Juotoskauluksesta signaali viedään virranjakomodulin liittimen kautta kytkimeen, joka sijoitetaan käyttäjän haluamaan paikkaan. Sopiva paikka voisi olla esimerkiksi keskikonsolissa.

Mikrokontrollerin SW1 pinni on ohjelmallisesti asetettu 3,3 V:n mikrokontrollerin sisäisellä ylösvetovastuksella. Kun kytkin on auki, mikrokontrolleri lukee 3,3 V SW1 pinnistä. Kytkimen sulkeutuessa SW1 pinni kytkeytyy maahan ja mikrokontrolleri lukee 0 V, jolloin kytkentä on aktiivinen. D29 ja D25 diodit suojelevat mikrokontrollerin pinniä transienteilta.



Kuva 36. Kytkimen sähkökaavio.

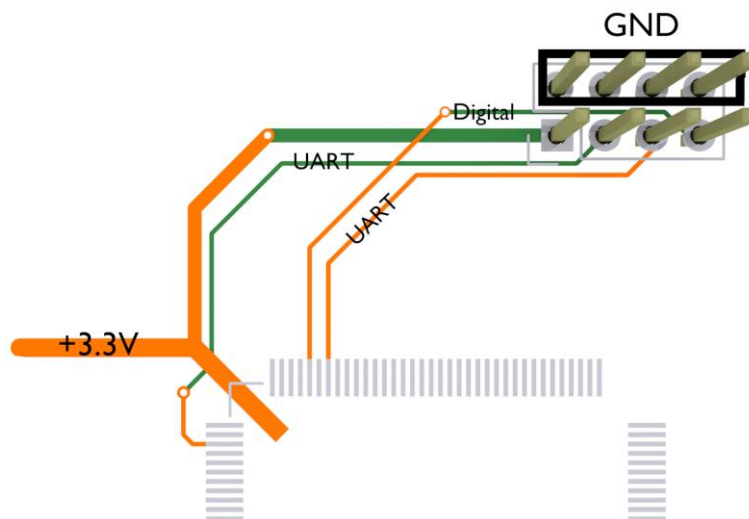
Kytkimet eivät ole suojattu oikosulun varalta. Nykyisellä toteutuksella käyttäjä lisää kytkimien perään 10 mA sulakkeet. Koska laitteen perusidea on korvata releet ja sulakkeet, lienee järkevämpää lisätä jokaiselle kytkimelle 10 mA automaattisesti resetoituvat sulakkeet. Muutos tehdään seuraavaan piirilevysuunnitelmaan.

3.11 Väyläliitäntä

21 kanavaa riittää yksinkertaisella sähköjärjestelmällä varustetulle autolle. Monimutkaisemmissa sähköjärjestelmissä tarvitaan enemmän kanavia. Tätä varten kehityksessä on lisäkortti, jolla voidaan laajentaa laitetta. Lisäkortilla voidaan nostaa laitteen kanavien määrä jopa 42 kanavaan. Virranjakomoduuli voidaan myydä lisäkortillisena 42 kanavaisena tai asiakas voi ostaa lisäkortin jälkikäteen ja täydentää 21 kanavaista virranjakomoduulia.

Lisäkortin tiedonsiirtoa varten sisällyttiin piirilevysuunnitelmaan väyläliitännän. Tieto liikkuu korttien välillä UART:illa sarjamuotoisena. Liittimessä on ylimääräinen digitaalinen linja, jota voidaan käyttää tarvittaessa. Signaalit ja maa kulkevat lattakaapelissa vierekkäin ja vuorotellen häiriöiden vähentämiseksi. Kuvassa 37 näkyy väyläliitännän KiCad-layout.

Lisäkorttina voidaan käyttää samaa tässä työssä suunniteltua piirilevyä. Kortista jätetään pois ylimääräiset komponentit, kuten jännitteensyöttö, CAN-väylä ja mahdollisesti muutakin.



Kuva 37. Väyläliitännän layout.

3.12 Laitteen kokoaminen

Valmistutin piirilevyn ulkomaisella piirilevynvalmistajalla. KiCad luo piirilevyn valmistukseen tarvittavat Gerber-tiedostot, jotka lähetetään sähköisesti valmistajalle. Noin kahden viikon kuluttua piirilevyt saapuvat postilla kotiin. Juotin komponentit käsin piirilevyille. Kuvassa 38 näkyy piirilevy komponentit juotettuna.



Kuva 38. Virranjakomodulin piirilevy.

Kaupalliset virranjakomodulit käyttävät usein CNC-koneistettuja tai mittojen mukaan valettuja alumiinikoteloita. Omassa tuotteessa nämä vaihtoehdot ovat poissuljettuja kustannusten vuoksi. Valitsin koteloksi edullisen yleismallisen alumiinisen kotelon. Koteloon mahtuu kaksi piirilevyä päällekkäin (kuva 39).



Kuva 39. Virranjakomodulin kotelo.

Liittimiksi valitsin TE Connectivityn HDP20-sarjan pyöreät moninapaliittimet. Laitteeseen tulee kolme moninapaliittintä. Kahdessa liittimessä kulkevat kanavien virrat ja muut signaalit. Kolmas liitin toimii virransyöttönä. Signaali- ja kanavaliitimissä (kuva 40) on erikoisia pinnejä, joiden virrankesto vaihtelee 7,5—25 A:n välillä. [14, s. 145.]



Kuva 40. TE Connectivity moninapaliittimet.

Kuvan 41 virransyöttöliittimen pinnit ovat suuria ja kestävät yhdessä laitteen vaatiman +100 A:n virran.



Kuva 41. TE Connectivity virtaliitin.

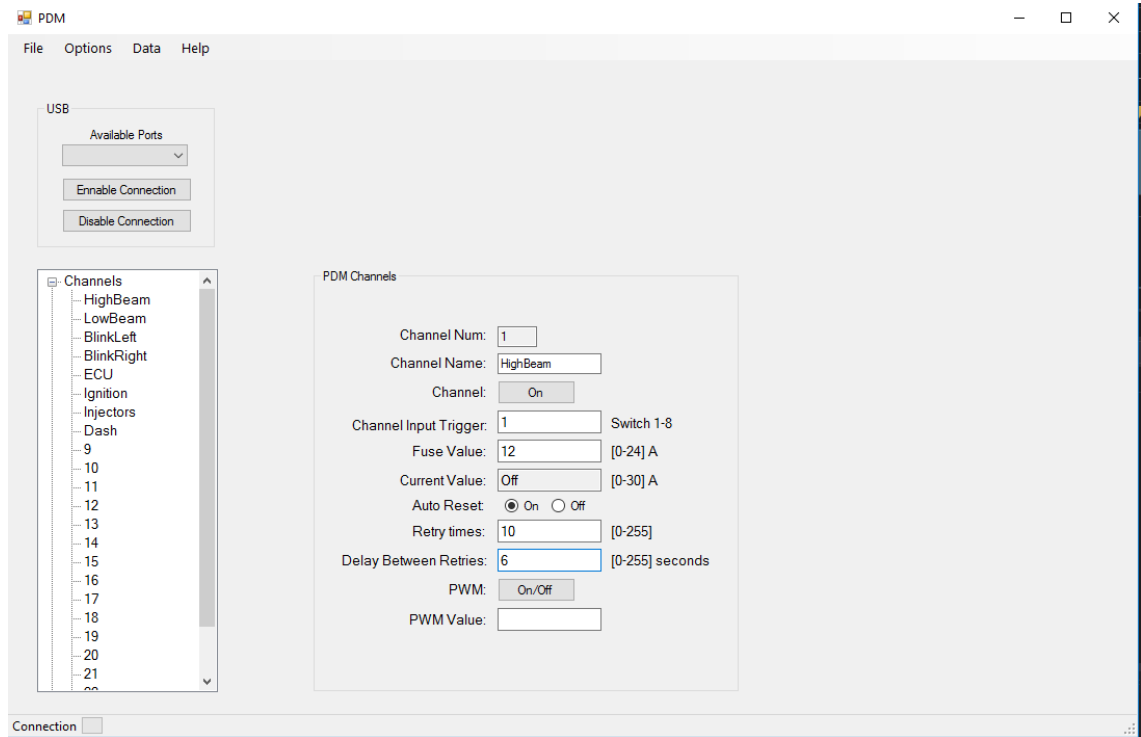
Liittimen pinnien puristamiseksi tarvitaan erikoispihdit. Tilasin HDT-48-00 pihdit, jotka näkyvät kuvassa 42.



Kuva 42. HDT-48-00 pihdit.

3.13 Ohjelmisto

Tätä insinööriötä varten tavoite oli tehdä yksinkertainen Windows ohjelma, jolla saadaan ladattua sulakearvot virranjakomoduuliin. Ohjelmoin Windows-ohjelman C#-kielellä. Ohjelman kehitystä jatketaan tulevaisuudessa. Kuvassa 43 näkyy Windows-ohjelma.



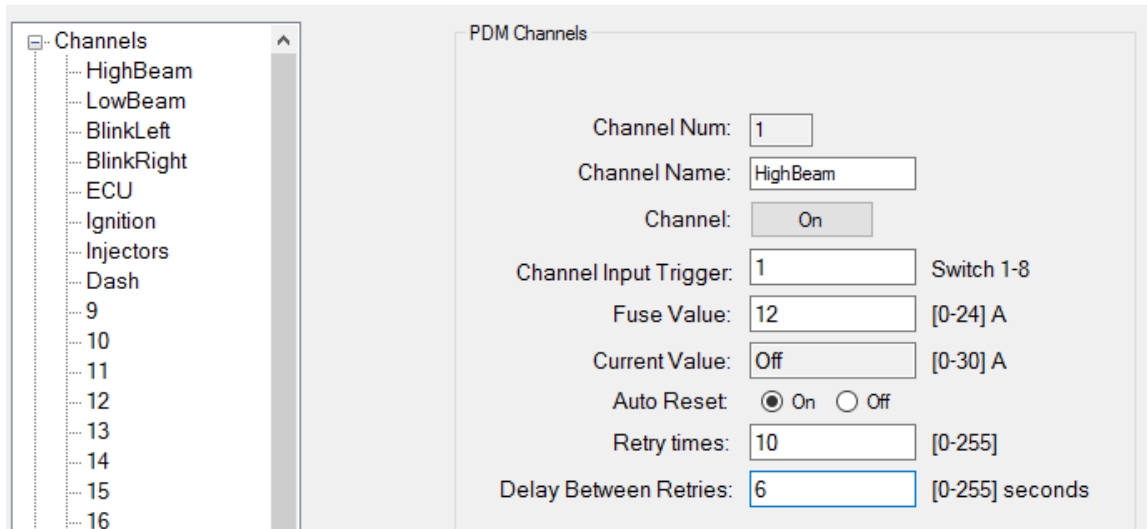
Kuva 43. Virranjakomoduulin Windows-ohjelma.

Kuvassa 44 näkyy yhteyden aloittaminen virranjakomoduulin kanssa. Ohjelmasta valitaan COM-portti, johon laite on kytketty ja aloitetaan yhteys. Ohjelman vasemmassa alkulmassa (kuva 43) ”Connection” neliö ilmaisee yhteyden tilan.



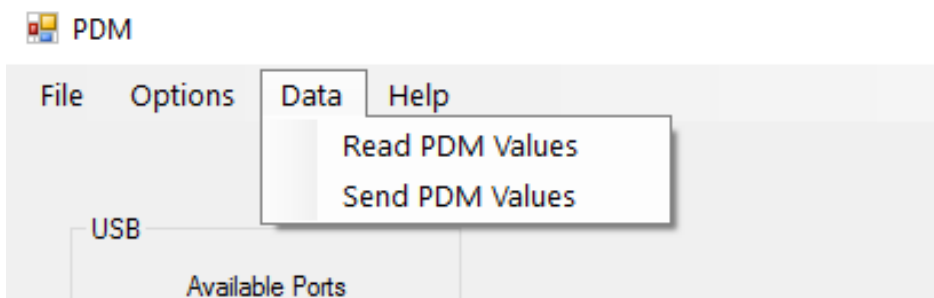
Kuva 44. COM-portin valitseminen.

Kuvassa 45 näkyvät kanavan asetukset. Vasemmalta tikapuuvalikosta valitaan muokattava kanava. Kanavat voidaan nimetä käytön helpottamiseksi. Ohjelma ei anna kirjoittaa tietueen arvoksi kirjainta tai erikoismerkkiä. Mikäli käyttäjä syöttää numeroarvon joka on määriteltyjen arvojen ulkopuolella, muuttaa ohjelma tietueen arvon 0:ksi. Kanavan virrankulutus näkyy reaaliajassa ”Current Value” tietueesta.



Kuva 45. Kanavan asetukset.

Virranjakomoduulin arvot ladataan ja luetaan ylösvalikon kautta. Valikko näkyy kuvassa 46.



Kuva 46. Virranjakomoduulin ylösvalikko.

4 Lopputuloksen arviointi

4.1 Asennus

Virranjakomoduulin avulla auton sähköjärjestelmän toteuttaminen on nopeaa ja helppoa. Samalla saavutetaan myös kevyempi ja vähemmän tilaa vievä siisti asennus. Verrataan virranjakomoduulia aikaisemmin toteuttamaani katukäyttöön tarkoitetun kilpa-auton sähköpääkeskukseen.

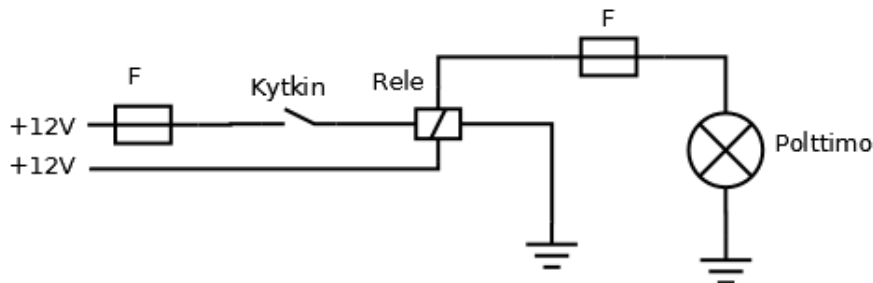
Sähköpääkeskus näkyy kuvassa 47. Sähköpääkeskuksessa on 15 relettä ja 33 sulaketta polykarbonaattilevylle sijoitettuna. Virranjakomoduulissa on 21 kanavaa, mikä vastaa 21 relettä ja 21 sulaketta. Sähköpääkeskuksen paino ja koko ei muutu olennaisesti, vaikka se muutettaisiin vastaamaan virranjakomoduulia sulakkeiden ja releiden osalta.



Kuva 47. Kilpa-auton sähköpääkeskus.

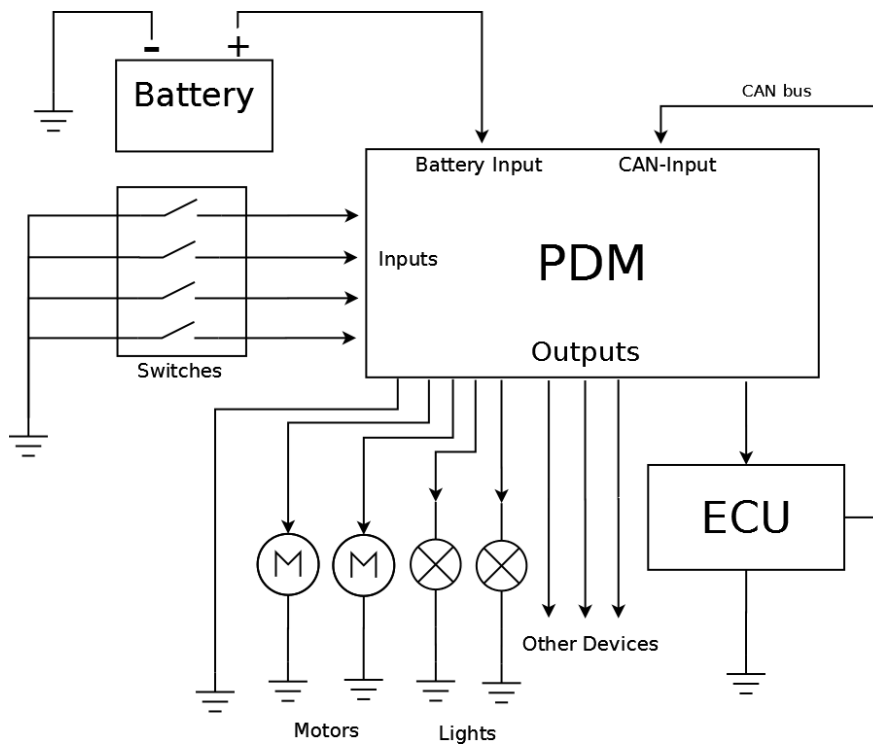
Asennuksessa molempiin laitteisiin täytyy tehdä virransyöttö, maadoitus sekä asentaa käyttökytkimet. Työmäärä on näiden osalta sama molemmissa laitteissa. Erot tulevat ilmi, kun verrataan yhden laitteen, releen ja sulakkeen kytkemiseksi käytettävää työmäärää.

Kuvassa 48 näkyy perinteisellä releellä ja sulakkeella tehty yhden sähkölaitteen kytkentä. Laitteen kytkemiseksi joudutaan tekemään 16 kytkentää. On myös huomioitava, että oikein tehtynä jokainen kytkentä pitää suojata kutisteliimasukalla. Tällä suojataan liittintä hapettumiselta.



Kuva 48. Releen, sulakkeen ja laitteen kytkeminen.

Kuvassa 49 näkyy virranjakomodulin asennuskaavio. Yhden laitteen lisäämiseksi joudutaan tekemään 4 kytkentää. Virranjakomoduli käytännössä vähentää tarvittavien kytkentöjen tekemistä noin 75 %. Ajansäästö on huomattava virranjakomodulin hyväksi.



Kuva 49. Virranjakomodulin asennuskaavio.

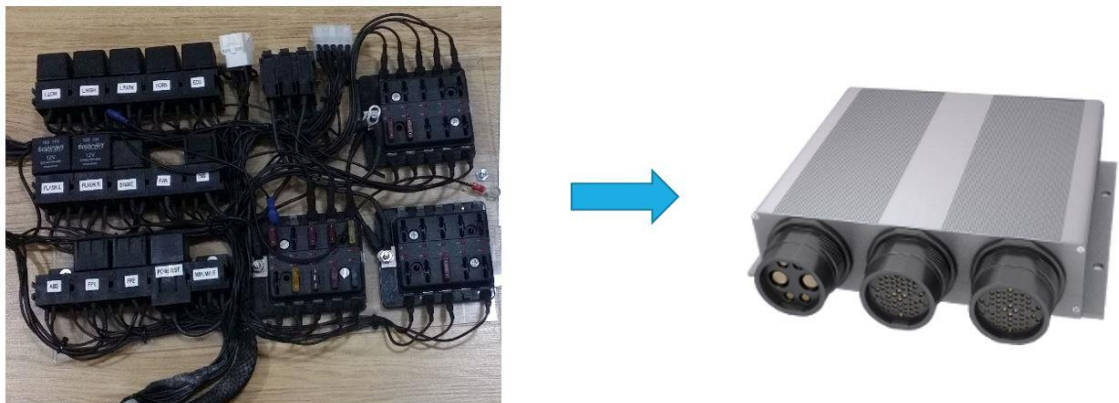
Myös sähköjärjestelmän dokumentointi helpottuu. Virranjakomodulin kytkennät käyvät ilmi Windows-ohjelmasta, mikäli käyttäjä nimeää kanavat. Tästä huolimatta yleismallinen kytkentäohje on syytä tehdä. Releillä ja sulakkeilla kytkennät täytyy dokumentoida tarkkaan ja pitää ajan tasalla asennuksen ajan. Jälkikäteen kytkentöjen selvittäminen on työlästä.

4.2 Fyysiset ominaisuudet

Verrataan virranjakomodulia perinteiseen autosähköpääkeskukseen. Kuvassa 50 vasemmalla näkyy autosähköpääkeskus ja oikealla virranjakomoduli. Huomioitavaa on, että prototyypin kotelo on kolmasosan liian pitkä. Tuotantovaiheessa kotelot voidaan tilata isommassa erässä ja omien mittojen mukaan. Paino ja kokolaskelmat on tehty vähentämällä prototyypin kotelon pituudesta ja painosta 30 %.

Itse tekemäni sähköpääkeskus painaa 2 kg. Virranjakomodulin paino on 600 g. Sähköpääkeskus on 1,4 kg painavampi, kuin virranjakomoduli. Ero ei kiloina välttämättä tunnu isoilta, mutta kilpa- ja harrasteautomaailmassa ero on suuri.

Sähköpääkeskus ja virranjakomoduli ovat saman korkuiset, mutta pinta-alassa on suuri ero. Sähköpääkeskuksen pinta-ala on 925 cm^2 ja virranjakomodulin 320 cm^2 . Virranjakomoduli on lähes kolme kertaa pienempi fyysisiltä mitoiltaan kuin sähköpääkeskus. Lisäksi asennus saadaan siistimmäksi.



Kuva 50. Sähköpääkeskus ja virranjakomoduli.

4.3 Kustannukset ja kannattavuus

Arvioidaan prototyypin perusteella laitteen valmistamiseen kuluva työaika ja materiaalikustannukset. Tämän perusteella tuotteelle voidaan määritellä myyntihinta ja pohtia virranjakomoduulin kannattavuutta. Autoharrastajana oma subjektiivinen näkemykseni sopivasta hinnasta 21 kanavaiselle virranjakomoduulille on 800 € ja 42 kanavaiselle lisäkortilla varustetulle virranjakomoduulille 1400 €.

Materiaalikustannukset on laskettu prototyypin mukaan. Tämä oli ensimmäinen kerta, kun juotin käsin pieniä pintaliitoskomponentteja. Tehostamalla prosessia ja kokemuksen karttuessa uskon, että juottamiseen menevä aika saadaan puolitettyä. Juottamisen lisäksi aikaa kuluu ohjelmointiin, testaukseen ja kokoonpanoon. Huomioitavaa on, että materiaalikustannukset laskevat huomattavasti, mikäli komponentit ja tarvikkeet tilataan isommissa erissä.

Alla on listattuna prototyypin valmistuskulut.

- elektroniikan komponentit 96 €
- piirilevy 10 €
- kotelo 20 €
- liittimet 140 €
- työ 7 h * 30 €/h = 195 €

Virranjakomoduulin loppusummaksi tulisi 461 € materiaalien ja työn osalta. 800 € hinnalla arvolisänveron jälkeen yhdestä laitteesta jäisi 171 € voittoa. Lisäkortilla varustettu 42 kanavaisen virranjakomoduulin materiaali- ja työkulut ovat noin 760 €. 1400 € myyntihinnalla laitteesta jäisi noin 346 € voittoa verojen jälkeen. Tällä kulurakenteella ei ole järkevää valmistaa tuotetta käsin.

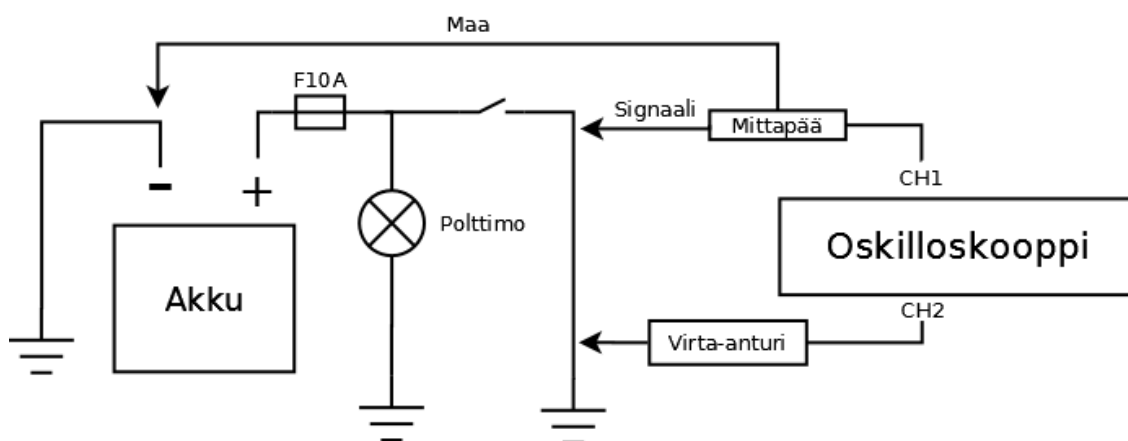
Piirilevyt ja komponentit voidaan valmistaa myös valmiiksi ladottuina piirilevynvalmistajalla. Kiinalaisen piirilevynvalmistajan (<http://www.pcbcart.com/assembly>) sivuilla on suuntaa antava laskuri ladonnan kustannusten arvioimiseksi. 100 kpl erälle ladonnan kustannukseksi tulisi 1000 \$. Ladonnan lisäksi pitää huomioida komponenttikustannukset ja mahdollisesti muitakin kuluja. Puhutaan 10 000—15 000 € investoinnista. Aiemasta kustannuslaskelmasta voidaan vähentää 5—6 työtuntia ja tuotteen valmistaminen tulisi kannattavaksi.

Kolmas vaihtoehto on investoida omaan ladontakoneeseen ja juotosuuniin. Noin 2000 € investoinnilla on mahdollisuus hankkia tarvittavat laitteet. Toimintaa voidaan harjoittaa kotoa käsin. Kotimainen yritys (<http://www.liteplacer.com/>) myy 1799 € hintaan ladontakonetta ja juotosuuneja saa Ebaysta (<http://www.ebay.com/>) halvimmillaan 300 € hintaan.

Näistä vaihtoehtoista viimeinen on mielekkäin. Toiminta voidaan aloittaa pienellä alkuinvestoinnilla ilman taloudellisia riskejä. Virranjakomoduulia voidaan valmistaa pientuotantona kysynnän mukaan.

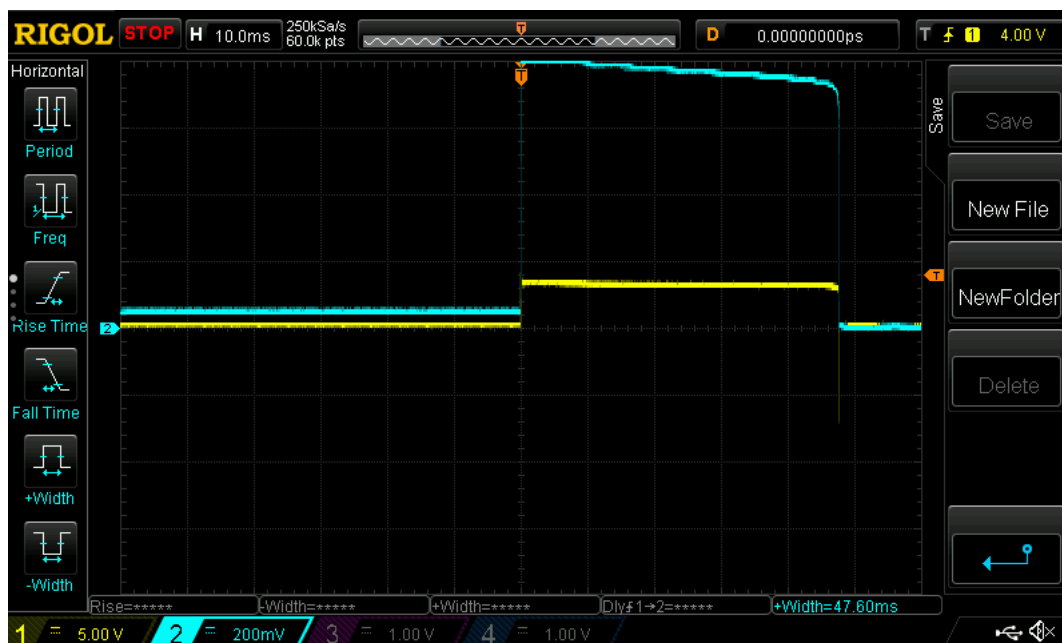
4.4 Suorituskyky

Virranjakomoduulin sulakkeen laukeamisajan täytyy vastata perinteistä lattasulaketta. Laitetta ei ole järkevää ottaa tuotantoon, jos tämä ehto ei täyty. Suoritin virranjakomoduulin sekä lattasulakkeen laukeamisaikamittaukset. Kuvassa 51 on mittauksen kytkentä. Virranjakomoduulin mittauksessa sulake on korvattu virranjakomoduulilla. Muuten kytkentä on sama molemmissa mittauksissa. Kytkimellä aiheutetaan oikosulku ja oskilloskoopilla mitataan sulakkeen laukeamisaika.



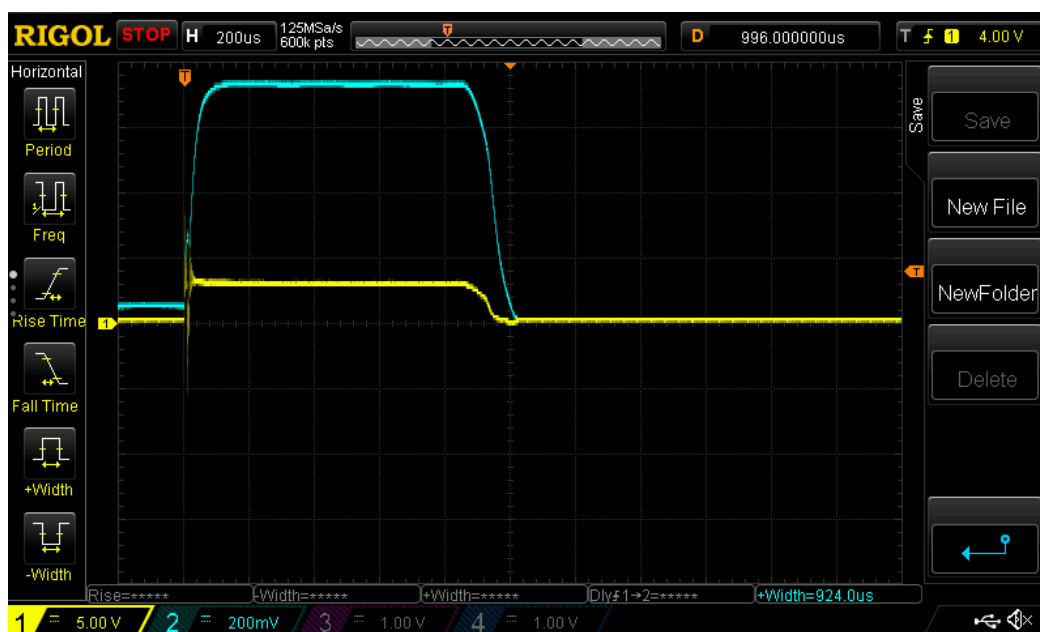
Kuva 51. Sulakkeen laukeamismittauksen kytkentä.

Kuvassa 52 on 10A:n autolattasulakkeen laukeamisaikamittauksen tulokset. Turkoosi väri on virta ja keltainen väri on jännite. Sulakkeen laukeamisaika on 48 ms.



Kuva 52. 10 A Autolattasulakkeen laukeamisnopeus oikosululla.

Kuvassa 53 on virranjakomodulin mittauksen tulokset. Turkoosi väri on virta ja keltainen väri on jännite. Sulakkeen laukeamisnopeus on 1 ms, mikä on huomattavasti pienempi kuin perinteisellä sulakkeella.



Kuva 53. Virranjakomodulin sulakkeen laukeamisnopeus oikosululla

4.5 Tulevaisuuden suunnitelmat

Virranjakomoduuli otetaan seuraavaksi kenttätesteihin. Se tullaan asentamaan harrastekilpa-autooni, jossa se korvaa auton entisen sähköpääkeskuksen kokonaan. Mahdollisesti etsin myös yhden tai kaksi muuta testikohdetta. Voisin tarjota laitetta edulliseen hintaan, vaatimuksena raportointi laitteen toimivuudesta.

Virranjakomoduulin kehitys jatkuu pitkälle tulevaisuuteen. Ensisijaista on ohjelmoida Windows-ohjelmaan ja virranjakomoduulin firmware-päivitystoiminto. Tämän jälkeen tuote voidaan laskea markkinoille ja virranjakomoduulin ohjelma päivittää uudempaan versioon käyttäjän toimesta.

Alla on listattuna muutamia ideoita, joita on tarkoitus kehittää tulevaisuudessa:

- Firmware-päivitys: Virranjakomoduuli päivitetään Windows-ohjelman kautta.
- Loogiset toiminnot: Käyttäjä voi ohjelmoida erilaisia toimintoja Windows-ohjelmalla. Kanava voi kytkeytyä päälle kytkimeen ja loogisen operaation seurauksesta. Tässä voidaan käyttää hyödyksi CAN-väylän avulla ECU:sta saatuja tietoja.
- CAN-väylätoiminnot: Käyttäjä määrittelee Windows-ohjelmasta CAN-asetukset ja vastaanotettavan datan.
- PID (Proportional-Integral-Derivative Controller)-ohjaus: PMW:n ja CAN-väylätietojen avulla voidaan toteuttaa sähkömoottoreiden nopeuden ohjauksia lämpötilojen mukaan.
- Starttinappi: Starttinappia painetaan kerran ja moottorin starttaus lopetetaan, kun moottorin kierrosluku on riittävä. Voidaan myös määritellä mitkä laitteet saavat sähköä starttauksen ajan.
- Kanavakohtainen viive: Ominaisuutta voidaan käyttää jälkijäähdytyksiin. Auto voidaan sammuttaa ja sähköiset jäähdytyspumput jatkavat toimintaa määritellyn ajan verran.
- Ajonestojärjestelmä: Voidaan toteuttaa USB-tikulla, puhelimella tai RFID-tunnistimella.
- Ohjelmoidut sähköprofiilit: Esimerkiksi, kun sähköjärjestelmän jännite laskee alle raja-arvon, tarpeettomat sähkölaitteet sammutetaan.
- Turvatoiminto: Auton kääntyessä katolleen sähköjärjestelmä sammutetaan. Onnettomuustilanteessa voidaan välttyä tulipalolta ja moottorivauriolta. Laitteeseen lisätään gyroskooppi-anturi.

5 Yhteenveto

Tämä on ensimmäinen kerta, kun toteutan elektroniikan projektin tässä mittakaavassa ja haastavuudessa. Alkuvaiheen suunnittelu, piirilevyn luonti ja laitteen kokoonpano sujui kohtuullisen mutkattomasti. Raskain työvaihe oli mikrokontrollerin ohjelmointi, jossa vaiheittain jokainen osa-alue piti todeta toimivaksi. Tässä yhdistyivät ohjelmointi-, suunnittelu- ja kokoonpanovirheet sekä niiden selvittäminen. Hetkittäin tilanne on ollut hyvinkin haastava, mutta päättäväisyyden avulla ongelmat selvisivät.

Virranjakomoduuli on teknisesti ylivoimainen, kun sitä verrataan perinteisillä releillä ja sulakkeilla toteutettuun tekniikkaan. Virranjakomoduulin sulakkeen laukeamisaika on 48 kertaa nopeampi, kuin perinteisen sulakkeen. Virranjakomoduulilla saavutetaan 75 % säästö työmäärässä, 70 % säästö painossa ja 65 % säästö fyysisessä koossa. Laite on myös taloudellisesti kannattava. Tämä insinööriyden tavoitteet on saavutettu ja insinööri-työ voidaan todeta onnistuneeksi.

Lähteet

- 1 Denton, Tom. 2004. Automobile electrical and electronic systems. Great Britain: Arnold, a member of Hodder Headline plc.
- 2 Fuseology. 2014. Datalehti. Littelfuse.
<http://www.littelfuse.com/~media/automotive/catalogs/littelfuse_fuseology.pdf>
- 3 VIPower M0-7 standard high-side drivers hardware design. 2015. Datalehti. STMicroelectronics.
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/group0/13/bb/11/4c/95/7c/4a/d0/DM00214136/files/DM00214136.pdf/jcr:content/translations/en.DM00214136.pdf>
- 4 MegaSquirt V3 Main Board. Luettu 2017. Megasquirt. Verkkodokumentti.
<<http://www.megamanual.com/ms2/pcb.htm>>. Luettu 12.10.2016.
- 5 SAM4E Series Datasheet. 2016. Datalehti. Atmel.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-11157-32-bit-Cortex-M4-Microcontroller-SAM4E16-SAM4E8_Datasheet.pdf>
- 6 AT06068: SAM4E Schematic Checklist. 2016. Datalehti. Atmel
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-42231-SAM4E-Schematic-Checklist_AP-Note_AT06068.pdf>
- 7 LM2937 2.5-V and 3.3-V 400-mA and 500-mA Voltage Regulators. 2014. Datalehti. Texas Instruments. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2937-2.5.pdf>>
- 8 Linear Regulator Design Guide For LDOs. 2008. Datalehti. Texas Instruments.
<<http://www.ti.com/lit/an/slua118a/slua118a.pdf>>
- 9 VN7010AJ High-side driver with MultiSense analog feedback for automotive applications. 2015. Datalehti. STMicroelectronics.
<<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/3e/25/38/33/b9/6a/48/e5/DM00157078.pdf/files/DM00157078.pdf/jcr:content/translations/en.DM00157078.pdf>>
- 10 AT4066: EEPROM Emulation Using Internal Flash (SAM4). 2013. Datalehti. Atmel. <http://www.atmel.com/Images/Atmel-42218-EEPROM-Emulation-Using-Internal-Flash-SAM4_AT4066_AP-Note.pdf>
- 11 24AA16/24LC16B. 2016 Datalehti. Microchip.
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21703L.pdf>>
- 12 Can Control Area Network. 2015. Youtube-video.
<<https://www.youtube.com/watch?v=RRbrk3SdSKA>>. Katsottu 12.1.2017.

- 13 SN65HVD233, SN65HVD234, SN65HVD235. 2015. Datalehti. Texas Instruments. <<http://www.ti.com/lit/gpn/SN65HVD233>>
- 14 Terminals and Connectors. 2017. Datalehti. TE Connectivity. <http://www.mouser.fi/pdfdocs/TE-DEUTSCH-ICTCatalog_revised.pdf#page=149>