

Pauli Nevalainen

# Korisähköjärjestelmän ohjauksen suunnittelu: Metropolian ConceptCar-hanke

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

10.5.2013

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Pauli Nevalainen Korisähköjärjestelmän ohjauksen suunnittelu: Metropolian ConceptCar-hanke 50 sivua + 3 liitettä 10.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja(t)	projektipäällikkö Harri Santamala autoelektroniikan lehtori Vesa Linja-aho
<p>Tässä insinööriyössä toteutettiin joustava ja tehokas järjestelmä ajoneuvon eri toimilaitteiden ohjaamiseen. Työn aluksi tutkittiin CANopen-teoriaa. Lopuksi suunniteltiin ohjelma ja piirilevy, jotka testattiin.</p> <p>Työssä käytettiin CANopen-verkkoa ajoneuvon korisähköjärjestelmän ohjauksen toteuttamiseen. Korisähköverkko jaettiin kolmeen kytkentärasiaan ja niihin suunniteltiin Frenzel+Bergin CO-4011-BD- ja CO-4017-BD-I/O-moduuleille käyttöliittymäpiirilevy Orcad Capture ja Allegro ohjelmistoilla. Piirilevyyn sisältyy kaksikanavainen hakkuri I/O-moduulien ja oheispiirien virransyötölle ja suojaus- ja puskuripiirit I/O-moduulien sisään- ja ulostuloille.</p> <p>I/O-moduuleille suunniteltiin ohjaus Epec 2024 -logiikkaohjaimella, jolle toteutettiin ohjelmakoodi CoDeSys-kehitysympäristössä kytkentärasioiden ohjaamiseen. Työssä käytettiin CANopen-protokollaperhettä SDO-, PDO- ja NMT-protokollia käyttäen.</p> <p>Insinööriyön tuloksena syntyi toimiva korisähkön ohjausjärjestelmä, johon voidaan helposti lisätä toimilaitteita. Järjestelmällä voidaan ohjata lukuisia erilaisia toimilaitteita. Työn tuloksia tullaan käyttämään Metropolian ConceptCar-hankkeessa syntyvässä kompaktissa kaupunkiautossa.</p>	
Avainsanat	korisähköjärjestelmä, CANopen, CoDeSys, Epec, PLC, Frenzel+Berg

Author(s) Title	Pauli Nevalainen The design of body electronics control system: Metropolia ConcepCar project
Number of Pages Date	50 pages + 3 appendices 10 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics
Instructor(s)	Harri Santamala, Project Manager Vesa Linja-aho, Senior Lecturer in Automotive Electronics
<p>In automotive environment it is very important to be able to effectively control all of the different electronic actuators a vehicle has. The aim of this Bachelor's thesis was to create a flexible and effective body electronics control system to support a large amount of different actuators.</p> <p>The system utilizes a CAN bus to control three junction boxes, designed around Frenzel+Berg CO-4011-BD and CO-4017-BD remote I/O modules, located around the vehicle. The junction boxes are controlled by an Epec 2024 programmable logic controller. CANopen protocol stack, specifically SDO, PDO and NMT protocols were used as CAN transfer protocol. The software was written with CoDeSys programming system in IEC-61131-3 standard programming languages.</p> <p>The design of the auxiliary PCB for the I/O modules was also a part of this Bachelor's thesis. The PCB incorporates a dual channel buck converter for the I/O modules and supporting devices and protection and buffer devices for the different inputs and outputs of the I/O modules. The design of the schematic was conducted using OrCAD Capture software and the PCB was designed with OrCAD Allegro software.</p> <p>The result of this Bachelor's thesis was a fully functioning body electronics control system for the Metropolia ConceptCar project. Adding different actuators is effortless and the I/O pins are extensively protected against different fault conditions.</p>	
Keywords	body electronics, CANopen, CoDeSys, Epec, PLC, Frenzel+Berg

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	CAN-väylätekniikka	1
2.1	CANopen	2
2.1.1	Tunnisteet	2
2.1.2	Object Dictionary	2
2.1.3	SDO-protokolla	3
2.1.4	PDO-protokolla	3
2.1.5	NMT-protokolla	4
3	Järjestelmä	5
4	MultiTool	6
4.1	Objektikirjasto	7
4.2	PDO-linkitys	8
4.3	Verkko-ominaisuudet	9
5	CoDeSys	11
5.1	PLC-ohjelmointikielet	11
5.1.1	SFC	11
5.1.2	ST	12
5.2	Ohjelman perusrakenne	12
5.3	I/O-moduulien sisään- ja ulostulojen käyttö.	16
5.3.1	Digitaalisen ulostulon ohjaus sisääntulon mukaan	17
5.3.2	I/O-moduulien analogiatulojen arvon muuttaminen käytettäväksi arvoiksi.	17
5.3.3	CO-4017-BD-moduulien PWM-lähtöjen ohjaus	19
6	Elektroniikan suunnittelu	20
6.1	Virransyöttö	21

6.2	Hakkurin mitoittaminen	22
6.2.1	Kelan mitoitus	23
6.2.2	Sisääntulokondensaattorin mitoitus	24
6.2.3	Ulostulokondensaattorin mitoitus	25
6.2.4	Diodin mitoitus	28
6.3	Tulojen ja lähtöjen suunnittelu	29
6.3.1	Analogiset sisääntulot	30
6.3.2	Digitaaliset sisääntulot	31
6.3.3	Digitaaliset- ja PWM-ulostulot	32
6.3.4	Digitaaliset sisään-ulostulot	33
6.4	Piirilevyn suunnittelu	34
6.4.1	Yleistä	34
6.4.2	Liittimet	37
6.4.3	Jumpperit	39
6.5	Piirilevyn testaus ja tulokset	42
6.5.1	Virtalähde	43
6.5.2	Analogiatulojen mittaukset	46
7	Yhteenveto ja päätelmät	49
	Lähteet	51
	Liitteet	
	Liite 1. Materiaaliluettelo	
	Liite 2. Kytkenäkaavio	
	Liite 3. Gerber-kuvat	

## Lyhenteet

A	Ampeeri. Virran SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö.
CJB	Center Junction Box. Keskimäinen kytkentärasia.
$\eta$	Eeta. Hyötysuhde.
ESR	Equivalent series resistance. Kondensaattorin sisäinen sarjavastus.
F	Faradi. Kapasitanssin SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö.
FJB	Front Junction Box. Etumainen kytkentärasia.
H	Henry. Induktanssin SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö.
Hz	Hertsi. Taajuuden SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö.
I/O	Sisääntulo/ulostulo.
IVI	In-Vehicle Infotainment, Auton kuljettajan tieto- ja viihdejärjestelmä.
J1939	CAN-väylätiedonsiirtoon liittyvä protokolla. Käytetään yleisesti dieselmootoreiden ja raskaan kaluston apulaitteiden ohjaukseen.
JEP	Juotteenestopinnoite. Estää piirilevyn juottamisen aikana tapahtuvia oikosulkuja komponenttijalkojen välillä ja suojaa piirilevyn kuparia hapettumiselta.
kbps	Kilobittiä sekunnissa. Tiedonsiirtonopeuden mittayksikkö.
$\Omega$	Ohmi. Resistanssin SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö.
mil	Tuhannesosatuuma. Piirilevysuunnittelussa käytetty yksikkö.
PDO	Process Data Object. CANopen-lähetysprotokolla.

PLC	Programmable logic controller. Ohjelmoitava logiikkaohjain.
PWM	Pulse width modulation. Pulssinleveysmodulointi.
RJB	Rear Junction Box. Takimmainen kytkentärasia.
SFC	Sequential Function Chart. IEC-61131-3-ohjelmointikieli.
SDO	Service Data Object. CANopen lähetysprotokolla.
ST	Structured Text. IEC-61131-3-ohjelmointikieli.
V	Voltti. Jännitteen SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö.
W	Watti. Tehon SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö.

## 1 Johdanto

Insinööriyössä toteutetaan ohjauksen runko auton korisähköverkolle. Tavoitteena on saada aikaan joustava ratkaisu eri toimilaitteiden ohjaukseen ja toimilaitteiden lisäämiseen toimilaitemäärän kasvaessa. Työ on tehty Metropolia Ammattikorkeakoulun ConcepCar-hankkeelle, joka toteutetaan Tekes-rahoitteisena. Hankkeen tavoitteena on suunnitella kompakti kaupunkiauto, joka lanseerataan Geneven autonäyttelyssä 2014. Korisähköjärjestelmä tulee olemaan osa valmista autoa.

Insinööriyön toteutus jakaantuu kahteen pääosioon: ohjauksen suunnitteluun sekä ohjauksen suorittavan elektroniikan suunnitteluun. Työssä haluttiin käyttää CAN-väylää, koska se on osoittautunut ajoneuvokäytössä luotettavaksi tavaksi siirtää tietoa ohjainlaitteiden välillä.

Työssä on ensin toteutettu logiikkaohjaimen ohjelma. Sen jälkeen on testattu käytännössä kirjoitetun ohjelman toimivuus ja korjattu virheet. Elektroniikan suunnittelu toteutettiin kahdessa vaiheessa: Ensin jaettiin suunniteltava piirilevy eri osa-alueisiin, joista tehtiin testilevyt ja jotka testattiin mittaamalla. Testien tuloksien perusteella suunniteltiin yksi yhtenäinen piirilevy, jonka toimivuus testattiin mittaamalla ja käytännössä.

## 2 CAN-väylätekniikka

CAN-väylä eli Controller Area Network on yksi yleisimmimminkin käytetyistä kenttäväylyistä. Se kehitettiin alun perin ajoneuvokäyttöön Robert Bosch GmbH:n toimesta ja ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 1986. [1, s. 1.] Perinteisen CAN-väylän standardi ei ota kantaa muuhun kuin ISO-järjestön kehittämän OSI-kommunikointikerrosmallin fyysisen kerroksen ja siirtoyhteyserroksen tiedonsiirtoon [2, s. 18]. Korisähköverkon suunnittelussa päädyttiinkin käyttämään jotain korkeamman tason protokollista suunnittelutyön helpottamiseksi. Lopulta käytettiin CANopen-protokollaperhettä.



## 2.1 CANopen

CANopen on alun perin teollisuuden käyttöön suunniteltu protokollaperhe. CANopen on yleisesti käytössä lisäksi mm. työkonekäytössä. Standardin kehittämisestä vastaa CAN in Automation -järjestö. Seuraavaksi käydään läpi peruskäsitteitä ja työssä käytettyjä CANopen-protokollia, joiden ymmärtäminen on välttämätöntä-CANopen verkon käyttämiselle.

### 2.1.1 Tunnisteet

*Node-ID.* Jokaisella CANopen-verkon laitteella on oltava oma tunniste, jonka avulla laitetta hallitaan, ja jonka avulla laitteelle tulevat ja laitteelta lähtevät viestit yksilöidään. Node-ID voi olla arvovälillä 1–127. [2, s. 41; 3, s. 1.]

*CAN-ID.* CAN-viestikehyksen viestikentän arvo. Oletuksena CANopen-verkossa käytetään 11-bittistä viestikenttää. Yksi CAN-ID voi viitata vain yhteen viestiin verkossa. [2, s. 41; 3, s. 1.]

*COB-ID.* Connection Object ID on tietyn kommunikointiobjektin tunnus. Se viittaa tiettyyn viestiin yhdeltä CANopen-solmulta toiselle ja saattaa sisältää ohjausbittejä, eli se sisältää CAN-ID:n ja saattaa sisältää lisätietoa. [2, s. 26, 41; 3, s. 1.]

### 2.1.2 Object Dictionary

Objektikirjasto toimii tietovarastona kaikelle CANopen-verkossa tarvittavalle tiedolle kuten parametreille ja lähetettävälle ja vastaanotettaville signaaleille. Sen on sijaittava haihtumattomassa muistissa, paitsi signaalien arvojen tulee sijaita ei-haihtumattomalla muistialueella. [3, s. 2.] Objektikirjasto on taulukko 16-bittisellä indeksillä ja 8-bittisillä ali-indekseillä. Jokainen indeksi voi sisältää yhdenlaatuisia muuttujia. [2, s. 28.]

Objektikirjastoon liittyy läheisesti laiteprofiili (Device Profile). Mikäli mitään standardia tiedon sijainnista ei olisi, olisi objektikirjaston käyttäminen työlästä. Siksi objektikirjaston sisältö on standardoitu erilaisille laitetypyeille. Lisäksi osa tiedoista on yhteisiä kaikille laiteprofiileille. [2, s. 30.] Työssä käytämme geneerisille I/O-laitteille tarkoitettua CAN in Automation DSP 401 -profiilia.

### 2.1.3 SDO-protokolla

Service Data Object -protokollaa käytetään objektikirjaston tietojen käsittelyyn laitteiden välillä. Verkon isäntä on ainoa laite, jolla on oikeus aloittaa SDO-viestin lähetys – se omistaa lähetyskanavat, joita on yksi jokaista laitesolmua kohden. Verkon laitesolmujen tulee vastata SDO-viestiin. SDO-viestillä voidaan joko lukea tai kirjoittaa tietoa objektikirjastoon. [2, s. 32–33.]

### 2.1.4 PDO-protokolla

Koska SDO-protokollan avulla on työlästä lähettää ja vastaanottaa signaalitietoa, on luotu PDO-protokolla tietojen lähettämisen helpottamiseksi. PDO-protokollan avulla laitesolmut voivat itsenäisesti lähettää tietoa väylälle ilman isännän erillistä käskyä. Jokaiselle PDO-viestille on oma yksilöllinen COB-ID, ja jokaista NODE-ID:tä kohden voi olla neljä lähtevää ja neljä saapuvaa PDO-viestiä. PDO-viestit linkitetään objektikirjastoon oletuksena siten, että isäntä on ainoa laite, joka voi vastaanottaa toimilaitesolmujen Transmit PDO -viestejä ja lähettää toimilaitesolmuille Receive PDO -viestejä. Tätä tapaa käytetään myös tässä työssä. [2, s. 34–37.]

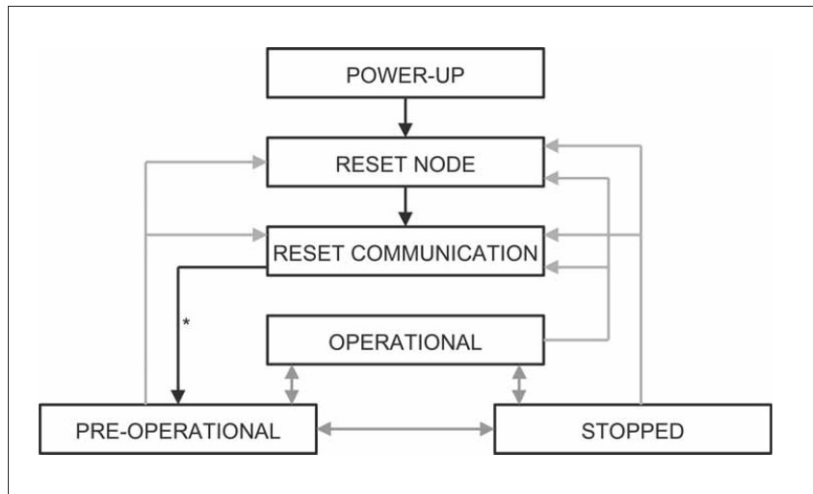
PDO-viestien hyvänä puolena on se, että jokaiselle viestille voidaan erikseen määrittää, milloin ja/tai millä edellytyksellä viesti lähetetään. CANopeniin on rakennettu neljä tapaa viestin lähetyksen aloituksen määrittämiseen:

- tapahtumalähtöinen lähetystapa
- aikalähtöinen lähetystapa
- kyselypohjainen lähetystapa
- synkronointipohjainen lähetystapa.

Jokaista lähetystapaa voi lisäksi muokata erilaisilla aika- tai tapahtumapohjaisilla viestinlähetyksmääreillä. Työssä on käytetty suurimmassa osassa viestejä tapahtumapohjaista lähetystapaa, johon on lisätty lähetyksen minimi- ja maksimilähetysväli. [2, s. 37–38.]

### 2.1.5 NMT-protokolla

NMT-protokollaa käytetään verkon toimilaitesolmujen tilan hallintaan ja valvontaan. Mikäli solmu havaitsee ongelman, se lähettää hätäviestin (EMCY), jolloin isäntä voi aloittaa solmun korjaus- tai sammutustoimenpiteet. Mahdolliset toimintatilat ovat: power-up, reset node, pre-operational, operational, stopped (Kuva 1).



Kuva 1. CANopen-solmun NMT-tilakoneen malli [3, s. 3].

Kun toimilaitesolmu käynnistyy se uudelleenkäynnistää oman kommunikointinsa ja applikaationsa. Tämän jälkeen solmu lähettää boot-up-viestin ja siirtyy tämän jälkeen pre-operational-tilaan. Tässä tilassa hallitussa käynnistyksessä isäntä tarkistaa toimilaitesolmun asetukset ja tarvittaessa päivittää ne, jonka jälkeen se asettaa solmun operational-tilaan, jolloin se voi lähettää PDO-viestejä. Mikäli solmu käynnistetään uudestaan tai käynnistyy uudestaan, se palaa uudelleenkäynnistystilaan. Mikäli isäntä asettaa toimilaitesolmun stopped-tilaan, yleensä vakavan vian seurauksena, se lopettaa kaiken muun viestinnän paitsi oman tilan lähettäminen väylälle heartbeat- tai node guarding -protokollilla. Se ei myöskään vastaa muihin kuin NMT-viesteihin. [2, s. 83–85, 3, s. 4.]

NMT-protokollaan liittyy läheisesti CANopen-standardissa heartbeat- ja node guarding -protokollat, joista jompaakumpaa voidaan käyttää toimilaitesolmujen tilan valvontaan. Molemmassa idea on sama: tietyin aikavälein toimilaitesolmun tila tarkastetaan. Heartbeat-protokollassa solmu lähettää itsenäisesti viestin, joka kertoo sen tilan. Aikaväli, jonka välein viesti lähetetään, saadaan objektikirjaston indeksistä 1017h. Node guarding -protokollassa solmu vastaa isännän lähettämiin kyselyihin omalla

tilallaan. Heartbeat-protokollaa suositellaan käytettäväksi, sillä se on joustavampi ja käyttää vähemmän verkon kaistaa. Tässä työssä on käytetty heartbeat-protokollaa. [2, s. 86; 3, s. 3.]

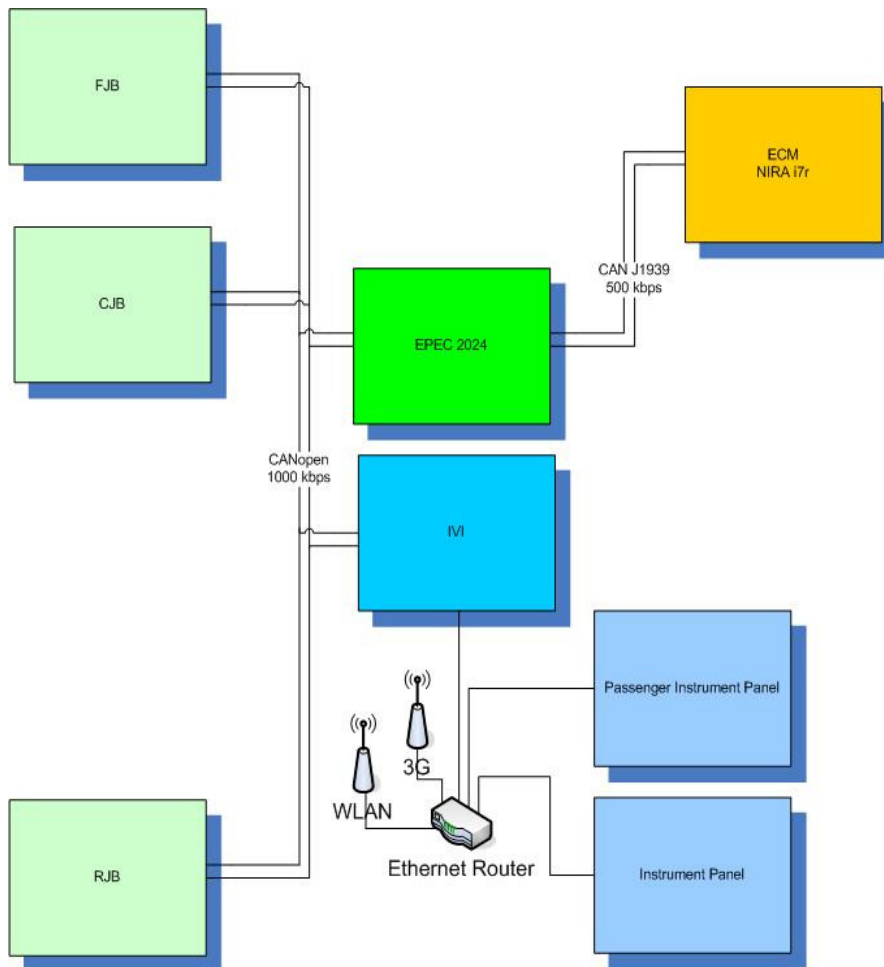
### 3 Järjestelmä

Korisähköjärjestelmä on rakennettu CANopen-verkon ympärille. Korielektronikan ohjaimena ja CANopen-verkon isäntänä toimii Epec 2024 PLC -ohjainlaite. Siinä on kaksi CAN-väylää joista toista käytetään kytkentärasioiden ohjaamiseen sekä korielektronikan ja kuljettajan tieto- ja viihdejärjestelmän eli IVI-järjestelmän väliseen viestintään. Toinen on yhteydessä moottorinohjaimen kanssa, johon on myöhemmin tarkoitus toteuttaa vaihteistonohjauksen toimintoja. (Kuva 2.) PLC itsessään sisältää myös tuloja ja lähtöjä.

KytKentärasioita on suunniteltu autoon kolme: yksi konetilaan (FJB), yksi keskikonsoliin (CJB) ja yksi takaluukkuun (RJB). Syynä ratkaisuun on johtosarjojen yksinkertaistaminen ja uusien laitteiden lisäämisen helpottaminen – insinööriyön tekohetkellä läheskään jokainen toimilaite ei ollut valittuna. Jokaiseen kytkentärasiaan tarvitsee minimissään tuoda akulta käyttöjännitteen syöttöjohdot, CAN-väylän johdot ja yksi herätejohto PLC:ltä, jolla I/O-moduulien virta voidaan käynnistää ja sammuttaa. Yhdessä kytkentärasiasa on kaksi Frenzel+Bergin valmistamaa CANopen I/O eli sisään-/ulostulo -moduulia yhdellä tämän insinööriyön puitteissa suunnitellulla piirilevyllä, joiden mallit ovat CO4017-BD ja CO4011-BD. Yhteensä tuloja ja lähtöjä saadaan näin 64 kappaletta kytkentärasiaa kohden:

- 16 analogiatuloa
- kahdeksan PWM-lähtöä eli pulssisuhdemoduloitua lähtöä
- 20 digitaalista lähtöä
- 12 digitaalista sisääntuloa
- kahdeksan digitaaliseksi sisään- tai ulostuloksi konfiguroitavaa kanavaa.

Yhteen kytkentärasiaan tulee I/O-moduulien lisäksi moduulirakenteisia puolijohdekytkimiä eri tehonkestoilla, jotka on suunniteltu jo aikaisemmin, ja tilankäytön puitteissa yksilöityjä ohjainlaitteita esimerkiksi ajoneston osalta.



Kuva 2. Verkkojärjestelmän rakenne.

Tämän insinööriyön suunnittelun kohteena on CANopen-verkon toteutus ja kytkentärasioiden ohjainlaitteiden ja ohjauksen suunnittelu eli karkeasti kuvan 2 vasen puoli.

#### 4 MultiTool

MultiTool on Epec Oy:n suunnittelema Epecin valmistamien PLC-ohjainlaitteiden asetusten ja protokollien asettamiseen tarkoitettu aputyökalu CoDeSys-kehitysympäristöön. Lisäksi se sisältää valmiit ohjelmakirjastot CANopen- ja J1939-protokollille sekä Epecin ohjainlaitteiden ohjaukseen CoDeSys-kehitysympäristössä. Työssä sillä luotiin 2024-ohjainlaitteelle CANopen-objektikirjastot, mihin tulee kaikkien I/O-moduulien I/O sekä asetukset. Lisäksi MultiToolin avulla luotiin verkkoisännän ominaisuudet sekä määritettiin sen oma I/O. [4.]

#### 4.1 Objektikirjasto

MultiToolissa objektikirjaston luominen on melko suoraviivainen toimenpide. Epec luo profiilikohtaiset indeksit, ja käyttäjälle jää tehtäväksi täyttää applikaatiokohtaiset indeksit valmistajakohtaiselle alueelle (2000h–5FFFh). Tässä työssä PDO-viestien indeksit luotiin alueelle, joka alkaa indeksistä 2001h ja on kirjoitettu ei-haihtumattomalle muistialueelle (RAM)(Kuva 3). Parametrit, jotka tarkastetaan SDO-viesteillä ja tarvittaessa kirjoitetaan I/O-moduuleille, luotiin alueelle, joka alkaa indeksistä 3001h. Parametrit luotiin haihtumattomille muistialueelle (PARAMETER). I/O-moduuleja koskevat objektikirjaston indeksit löytyvät taulukoista 1 ja 2.

Taulukko 1. PDO-viesteille varatut alueet objektikirjaston valmistajakohtaisella alueella.

	BEGIN	TPDO		RPDO		END
		DI	AI	DO	PWM	
<b>FJB1</b>	<b>2201h</b>	2201h	2202h	2203h		<b>2210h</b>
<b>FJB2</b>	<b>2211h</b>	2211h	2212h	2213h	2214h	<b>2220h</b>
<b>CJB1</b>	<b>2221h</b>	2221h	2222h	2223h		<b>2230h</b>
<b>CJB2</b>	<b>2231h</b>	2231h	2232h	2233h	2234h	<b>2240h</b>
<b>RJB1</b>	<b>2241h</b>	2241h	2242h	2243h		<b>2250h</b>
<b>RJB2</b>	<b>2251h</b>	2251h	2252h	2253h	2254h	<b>2260h</b>

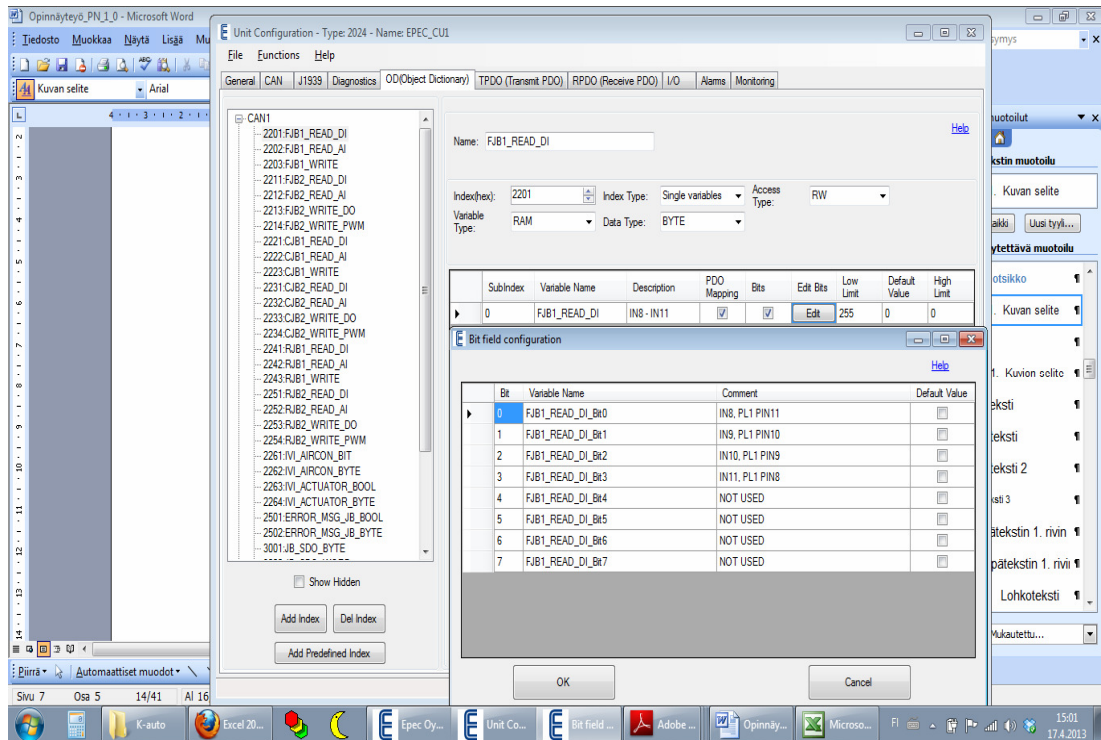
Jokaiselle toimilaitesolmulle on varattu oma 16 indeksin alue, ja jokaiselle muuttujatyypille on tehty oma indeksi.

Taulukko 2. Parametreille varatut alueet objektikirjaston valmistajakohtaisella alueella.

	BEGIN	BYTE	WORD	DWORD	END
<b>PAR ALL</b>	<b>3001h</b>	3001h	3002h	3003h	<b>3010h</b>
<b>PAR SINGLE</b>	<b>3031h</b>	3031h	3032h	3033h	<b>3040h</b>
<b>PAR JB1</b>	<b>3041h</b>	304Eh	304Fh	3050h	<b>3050h</b>
<b>PAR JB2</b>	<b>3051h</b>	305Eh	305Fh	3060h	<b>3060h</b>

Parametrit on jaoteltu sen mukaan, käytetäänkö niitä kaikissa I/O-moduuleissa, vain CO-4011-BD-moduuleissa, vain CO-4017-BD-moduuleissa, vai onko kyseessä vain yksittäistä moduulia koskeva parametri. Kaikille parametryypeille varattiin 16 indeksiä ja eripituisille parametreille (1/2/4 tavua) varattiin omat indeksit.

Tämän projektin objektikirjaston valmistajakohtaisen alueen indeksit näkyvät kuvassa 3.

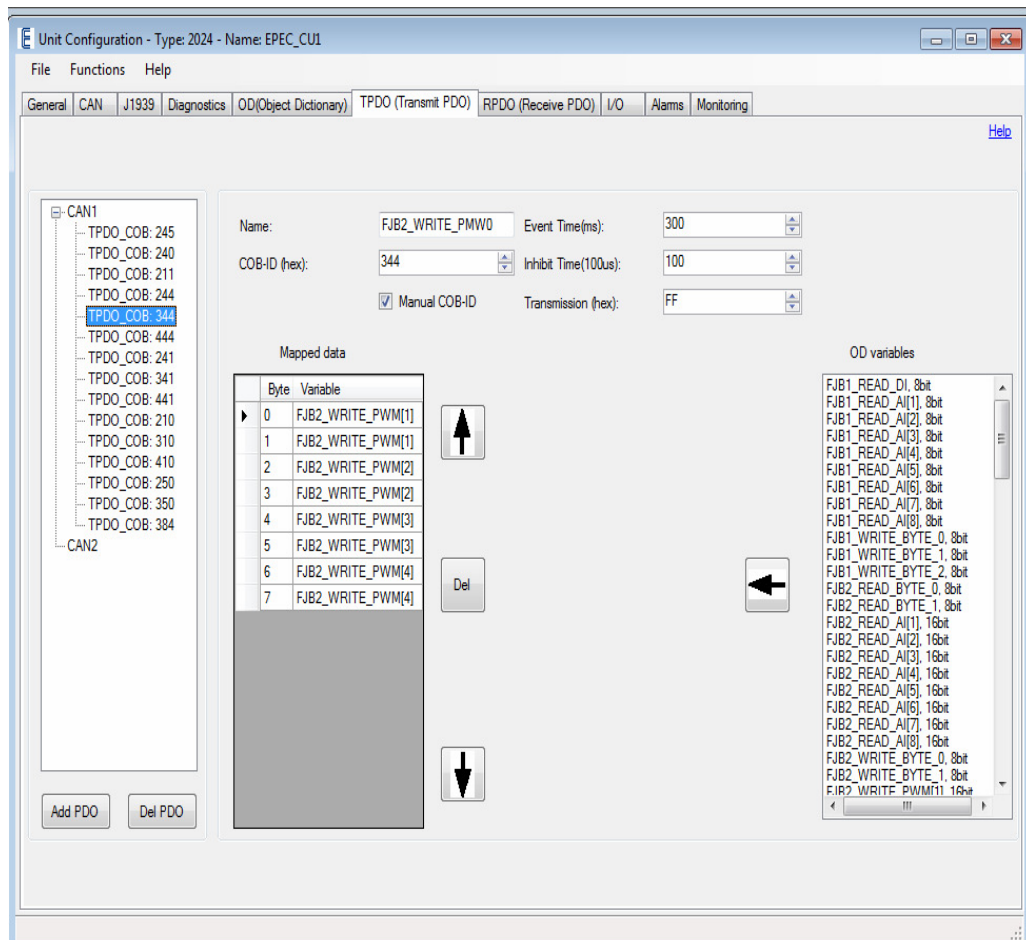


Kuva 3. Projektin valmistajakohtainen objektikirjasto MultiTool-ohjelmassa. Luvut heksadesimaalimuodossa.

Avoinna kuvassa on bittityyppisen muuttujan (digitaalinen sisääntulo) indeksi, joka PDO-viestin kannalta on tavu, josta on erikseen linkitetty bitit objektikirjaston muuttujiin. Kommenttiin on laitettu, mihin pinniin kyseinen tulo fyysisesti tulee.

#### 4.2 PDO-linkitys

PDO-linkitys onnistuu MultiTool-ohjelmalla helposti TPDO (lähetettävät PDO-viestit) ja RPDO (vastaanotettavat PDO-viestit) -välilehdiltä (Kuva 4). Välilehdet ja asetukset ovat identtiset pois lukien viestien lähetyssuunta.



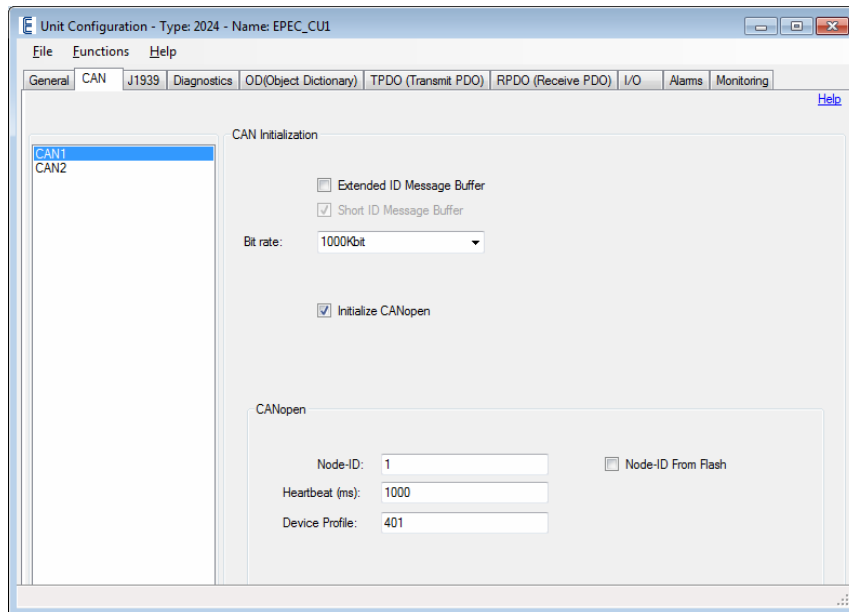
Kuva 4. PDO-linkitys MultiTool-ohjelmalla.

TPDO-viestille määritellään nimi ja COB-ID, joka vastaa vastaanottajan NODE-ID:tä ja objektin numeroa summattuna. Muuttujat linkitetään lähtevään viestiin Mapped data -kenttään. Lisäksi määritellään Transmission-kohtaan lähetystyyppi. FF vastaa asynkronista lähetystapaa, jolloin PDO-viesti lähetetään, kun muuttujan arvo muuttuu, tai aikapohjaisesti tai näiden yhdistelmänä [3, s. 4]. Tässä tapauksessa viesti lähetetään, kun Event Time -kohtaan asetettu aika täyttyy tai objektikirjastoon linkitetyn muuttujan arvo muuttuu, kuitenkin siten, että viestien välillä on vähintään Inhibit Time -kohdan aika. [4.]

#### 4.3 Verkko-ominaisuudet

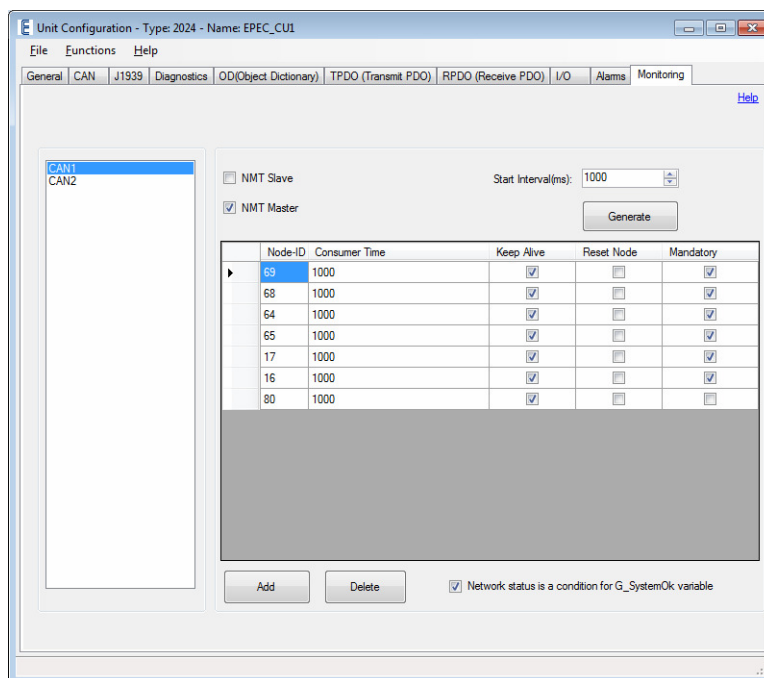
2024-ohjainlaitteeseen voidaan asettaa verkko-ominaisuudet MultiTool-ohjelman kautta. Valittavissa on käytetty protokolla, viestikentän CAN-ID:n pituus, Node-ID, siirtonopeus, laiteprofiili ja heartbeat-aika (Kuva 5). [4.]





Kuva 5. Projektin 2024-ohjainlaitteen CAN-väyläasetukset.

Lisäksi voidaan automaattisesti luoda verkkoisännän ominaisuudet ja heartbeat-valvonta (Kuva 6).



Kuva 6. Projektin 2024-ohjainlaitteen verkonvalvonta.

Kun ohjainlaite on määritetty CANopen verkkoisännäksi NMT Master -kohdasta, on mahdollista valita, miten toimilaitesolmujen tilan valvonta toteutetaan. Start interval

-kohdasta säädetään, miten usein laitteelle voidaan tehdä korjaustoimenpiteitä. Keep-alive -kohdasta voidaan asettaa automaattinen toimilaitesolmun NMT-toimintatilaan asetus, mikäli toimilaitesolmun heartbeat-viesti ei saavu Consumer time -kohdan ajassa. Reset node -kohdasta voidaan asettaa automaattinen toimilaitesolmun NMT-uudelleenkäynnistys, mikäli toimilaitesolmun heartbeat-viesti ei saavu Consumer time -kohdan ajassa. Mandatory kohta säättää sitä mitkä laitteet vaikuttavat verkon oikeaa toimintaa kuvaavan muuttujan tilaan. Kun verkkoisännän asetukset on luotu, saadaan PLC-ohjelmasta suoraan tieto laitteiden tiloista ja lisäksi voidaan tehdä ehtoja sen perusteella, onko verkko kunnossa. [4.]

## 5 CoDeSys

CoDeSys on IEC-61131-3-standardin mukainen kehitysympäristö. Sen on kehittänyt saksalainen 3-S Software. Se sisältää ohjelmakääntäjän ja lisäksi myös muita aputyökaluja kuten käytönaikaisen debug-työkalun.

### 5.1 PLC-ohjelmointikieliet

IEC-61131-3-standardi sisältää kuusi eri ohjelmointikieltä, joista jokaisella on omat vahvuutensa. Logiikkaohjelmointi oli minulle uutta, joten kaikkia kieliä en ehtinyt opiskella. Tässä työssä käytettiin pelkästään SFC- ja ST-ohjelmointikieliä.

#### 5.1.1 SFC

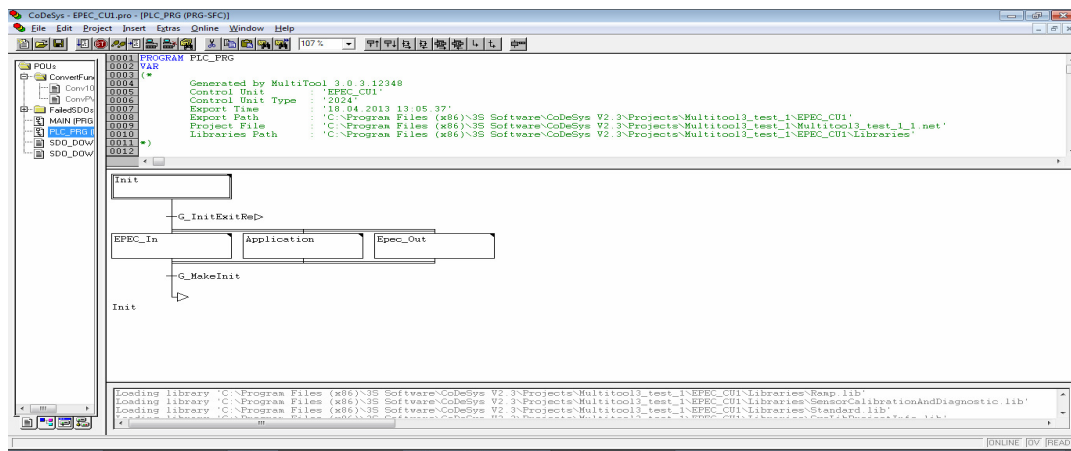
Sequential Function Chart on lohkomuotoinen graafinen ohjelmointikieli, joka sopii hyvin prosessien ohjaukseen. Kielen ominaisuutena on se, että laajat kokonaisuudet voi lohkoa pienempiin kokonaisuuksiin, jolloin niitä on helpompi hallita. Käynnissä oleva lohko tai rinnakkain olevat lohkot suorittavat ohjelmaansa niin kauan, kunnes ulostulomuuttujan (BOOL) arvo muuttuu todeksi tai maksimisuoritus aika täyttyy, kuitenkin niin, että minimisuoritus aika täyttyy. Lohkojen suorittava koodi ohjelmoidaan jollain muulla IEC-61131-3-standardin ohjelmointikiielellä. Tässä työssä SFC-ohjelmointikiielellä onkin ohjelmoitu perusrunko ja suorittava koodi ST-kiielellä. Jatkokehitystä ajatellen ei ole mitään estettä, ettei muita kieliä voisi käyttää. [5, s. 164–165.]

## 5.1.2 ST

Structured Text on tekstimuotoinen C-ohjelmointikielen kaltainen ohjelmointikieli. Siinä käytetään valmiiksi määriteltyjä korkean tason komentoja, joilla voi toteuttaa tiivistä koodia selkeässä muodossa. Haittapuolena voidaan pitää sitä, että yleensä käännetty ohjelmakoodi on alemman tason kieliä pidempi ja hitaampi. Itselläni on jonkin verran kokemusta C-ohjelmointikielestä, joten ST oli helposti lähestyttävä. [5, s. 111–112; 6, s. 25.]

## 5.2 Ohjelman perusrakenne

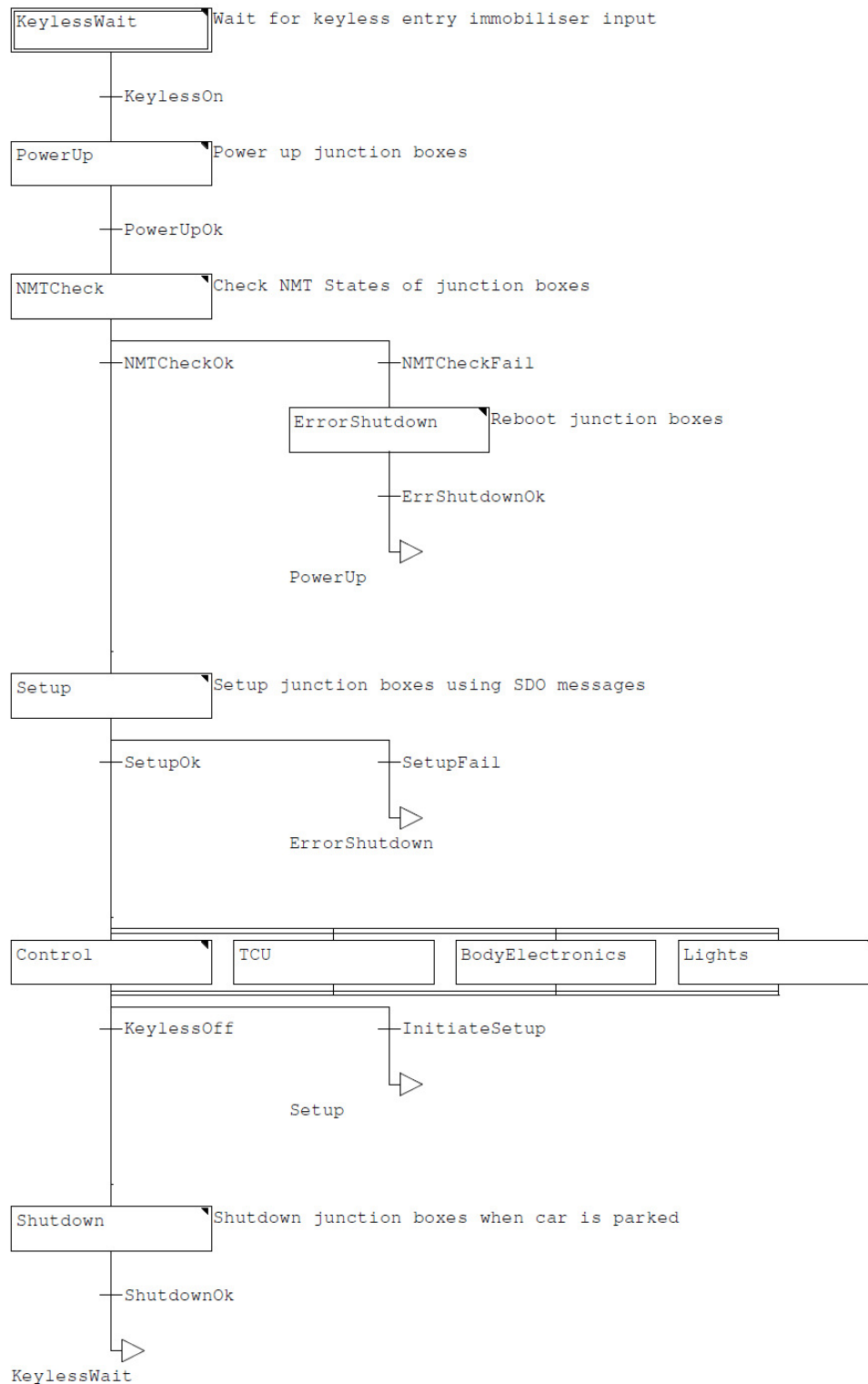
Insinööriyön puitteissa toteutettiin ohjelmalle perusrunko, jota pystyy toimilaitemäärän kasvaessa helposti laajentamaan. Ohjelman perusrunko jakautuu MultiTool-ohjelman luomaan ohjelman perusrunkoon (Kuva 7) ja työssä luotuun applikaation perusrunkoon (Kuva 8). Ohjelma käynnistää, sammuttaa ja antaa asetukset I/O-moduuleille auton tilan mukaan. Lisäksi toteutettiin esimerkkejä eri I/O-toiminnoista, joita on mahdollista luoda suunnitellun laitteiston puitteissa.



Kuva 7. MultiTool-ohjelmasta tuotu PLC-ohjelman perusrunko.

Init-lohkossa alustetaan kaikki 2024-ohjainlaitteen vaatimat asiat kuten I/O, CAN-ajurit ja käytetyt CAN-väyläprotokollat. Kun alustus on suoritettu ohjelma suorittaa Epec\_In-, Application- ja Epec\_Out-lohkoja vuorotellen. Ensin Epec\_In-lohkossa luetaan laitteen omat ja CAN-viesteinä tulleet sisääntulot muuttujiin. Application-lohkossa suoritetaan käyttäjän koodi, jossa ulostulomuuttujien tilaa voidaan muuttaa. Lopuksi Epec\_Out

-lohkossa muuttujat päivitetään 2024-ohjainlaitteen ulostuloihin ja CAN-viesteinä I/O-moduulien lähtöihin. [7.]



Kuva 8. Työssä luodun applikaation perusrunko.

Applikaation perusrunko on luotu SFC-kielellä. Se on jaettu eri vaiheisiin sen mukaan mikä on auton tila. Kun ajoneuvo on pysäköitynä ja ovet lukossa, odotetaan avaimettoman käynnistyksen ohjainlaitteelta tietoa siitä, että avain on lähellä. Kun avain on havaittu, käynnistetään I/O-moduulit, minkä jälkeen niiden NMT-tila tarkastetaan. Mikäli moduuleja puuttuu, yritetään ne käynnistää uudelleen. Kun kaikki moduulit on havaittu, tarkastetaan niiden parametrit ja tarpeen mukaan korjataan ne oikeiksi (Esimerkkikoodi 1; Esimerkkikoodi 2). Mikäli parametrien asetuksessa tapahtuu virheitä, siirrytään moduulien uudelleenkäynnistykseen. Kun parametrit ovat kunnossa, siirrytään varsinaiseen korielektronikan applikaatioon, jossa toimilaitteiden tiloja muutetaan saatujen sisääntulotietojen perusteella. Tällä hetkellä lohkoja on neljä. TCU-lohko on omistettu vaihteistonohjaukselle. BodyElectronics-lohko huolehtii korin sähkölaitteiden ohjaamisesta ja Lights-lohko valojen ohjauksesta. Control-lohko vahtii mm. ajoneuvon virtalukon tilaa, avaimettoman käynnistyksen ohjainlaitteen tietoa ja I/O-moduulien tilaa. Se siirtää applikaation joko moduulien parametrien asennukseen tai moduulien sammutukseen ehtojen täytyessä.

```

FUNCTION_BLOCK SDO_DOWNLOAD_JB1
VAR
    SDOReceiveBYTE : BYTE; (*READ OD VARIABLE FOR ONE BYTE PARAMETERS*)
    SDOReceiveWORD : WORD; (*READ SLAVE OD VARIABLE FOR TWO BYTE PARAMETERS*)
    SDOReceiveDWORD : DWORD; (*READ SLAVE OD VARIABBLE FOR FOUR BYTE
PARAMETERS*)
END_VAR
VAR_INPUT
    NodeIDIndex : BYTE; (*INPUT FOR NODE ID TO BE CONFIGURED*)
    ResetCSDOCASE : BOOL := FALSE; (*INPUT TO RESET CASE*)
    CSDOCASE : WORD; (*CASE-STRUCTURE VARIABLE*)

END_VAR
VAR_OUTPUT
    SetupReadyJB : BOOL := FALSE; (*OUTPUT TRUE WHEN SETUP FINISHED*)
    SetupErrorsJB : BOOL := FALSE; (*OUTPUT TRUE IF ERRORS DURING SETUP*)
    SetupAbortCode : WORD := 0; (*OUTPUT POSSIBLE ABORT CODE IF ERRORS*)
END_VAR
VAR
    CSDO : CANOpenCSDOTransfer; (*EPEC CSDO FUNCTION BLOCK*)
    SUBINDEXi : BYTE; (*SUBINDEX CALCULATOR VARIABLE FOR MULTIPLE SUBINDEX OD
ENTRIES*)
END_VAR

```

Esimerkkikoodi 1. Parametrien asettamiseen luodun funktioblokin esittely.

Parametrien asettamiseen käytetään Epecin toteuttamaa CANOpen CSDO -kirjastoa ja sen CANOpenCSDOTransfer-funktioblokkia oman parametrien asetukseen tehdyn funktioblokin sisältä. CANOpenCSDOTransfer-blokki vaatii taulukon 3 mukaiset sisääntulot, ja siitä on saatavilla ulostulona blokin tilaa ja mahdollisia virheitä koskevat ulostulot.

Taulukko 3. CANopenCSDOTransfer-funktioblokin sisääntulot [7].

Input name	variable	Data type	Range	Description
i_Enable		BOOL	TRUE/ FALSE	CSDO transfer is started when <i>i_Enable</i> changes from FALSE to TRUE.
i_Channel		BYTE	0,1,2,..	CAN bus number 0,1,2,..
i_NodeID		BYTE	1 - 127	Unique ID number of the control unit. Can be changed between requests.
i_Index		WORD		CANopen OD main index.
i_SubIndex		BYTE		CANopen OD sub-index.
i_pData		DWORD		Pointer to data buffer for send/received data
i_Size		DWORD		Size of the data buffer.
i_Write		BOOL	TRUE/ FALSE	TRUE - SDO download FALSE - SDO upload
i_Stop		BOOL	TRUE/ FALSE	Stops the SDO request.
i_TimeOut		TIME		Time out for action. This includes also time which is waited to get free CSDO channel.

Funktioblokki toimii siten, että sille annetaan sisääntuloina SDO-viestin vaatimat tiedot: Node-ID, indeksi, ali-indeksi, data (osoittimena muistiosioon), datan pituus ja onko kyseessä luku vai kirjoitus solmun objektikirjastoon. Lisäksi annetaan 2024-ohjainlaitteen käytetty CAN-sovittimen numero ja viestinlähetyksen vanhenemisaika. Viestin lähetyks alkua muuttujan *i\_Enable* nousevalla reunalla, ja se voidaan keskeyttää asettamalla *i\_Stop*-muuttujan arvoksi TRUE. Alla on esimerkki yhden parametrin asettamisesta (Esimerkkikoodi 2). [7.]

```

0: CSDO();
  IF CSDO.o_State = 3 THEN (*Wait for CSDO to become IDLE*)
    CSDO.i_Enable := FALSE; (*Set ENABLE to FALSE*)
    CSDO();
    CSDOCASE := 1;
  END_IF

1: (*Read PRODUCER HEARTBEAT TIME*)
  CSDO();
  IF CSDO.o_State = 3 THEN
    CSDO(
      i_Channel:= 0,
      i_Data := ADR(SDOReceiveWORD),
      i_NodeID:= G_CAN1_CSDOinstances[NodeIDIndex].i_NodeID,
      i_Index := 16#1017,
      i_SubIndex := 16#00,
      i_Size:= SIZEOF(PAR_PRODUCER_HEARTBEAT_TIME),
      i_Write:=FALSE,
      i_Timeout:= T#1s);

    CSDO.i_Enable:=TRUE;
    CSDO();
    CSDOCASE := 2;
  END_IF

```

```

2: (*VERIFY RECEIVED DATA TO BE CORRECT*)
  CSDO();
  IF CSDO.o_State = 3 THEN
    CSDO.i_Enable := FALSE; (*Set ENABLE to FALSE so that OLDENABLE is
FALSE*)
    CSDO();
    IF CSDO.o_Error <> 0 THEN
      SetupErrorsJB := TRUE;
      SetupAbortCode := CSDO.o_AbortCode;
      CSDOCASE := 1023; (*EXIT SETUP*)
    ELSIF SDOReceiveWORD = PAR_PRODUCER_HEARTBEAT_TIME THEN
      CSDOCASE := 4; (*DATA IS SAME IN SLAVE OD PROCEED TO NEXT
PARAMETER*)
    ELSE
      CSDOCASE := 3; (*DATA DIFFERS, WRITE CORRECT DATA*)
    END_IF
  END_IF

3: (*Set PRODUCER HEARTBEAT TIME*)
  CSDO();
  IF CSDO.o_State = 3 THEN
    CSDO(
      i_Channel:= 0,
      i_Data := ADR(PAR_PRODUCER_HEARTBEAT_TIME),
      i_NodeID:= G_CAN1_CSDOinstances[NodeIDIndex].i_NodeID,
      i_Index := 16#1017,
      i_SubIndex := 16#00,
      i_Size:= SIZEOF(PAR_PRODUCER_HEARTBEAT_TIME),
      i_Write:=TRUE,
      i_Timeout:= T#1s);

    CSDO.i_Enable:=TRUE;
    CSDO();
    CSDOCASE := 1; (*READ DATA AGAIN*)
  END_IF

```

Esimerkkikoodi 2. CANopen producer heartbeat time -parametrin tarkastus ja asetus.

Parametrin tarkastus alkaa lukemalla parametrin arvo kohdesolmun objektikirjastosta. Tämän jälkeen tarkastetaan, täsmääkö luettu parametri haluttua parametrin arvoa. Mikäli parametrin arvo on eri, lähetetään oikea parametri solmulle ja luetaan parametri uudestaan. Kun parametri on oikein, siirrytään seuraavan parametrin tarkastukseen. Mikäli parametrin tarkastuksessa tai asetuksessa tapahtuu virhe, asettaminen keskeytetään, tallennetaan virheen koodi ulostulomuuttujaan ja palautetaan kutsuvalle ohjelmalle.

### 5.3 I/O-moduulien sisään- ja ulostulojen käyttö.

I/O-moduuleilta saadaan tietoa digitaalisessa muodossa, jota voidaan käyttää suoraan, kunhan huomioidaan että polariteetti on oikeinpäin. Digitaalisten sisääntulojen polariteetti asetetaan moduulien objektikirjaston indeksiin 6002h. Analogiatulojen dataa

täytyy muokata, jotta se saadaan käyttökelpoisempaan muotoon (ks. Esimerkkikoodi 4 - Esimerkkikoodi 8). I/O-moduulien digitaalisia lähtöjä voidaan ohjata suoraan, kunhan huomioidaan ulostulojen polariteetti. Digitaalisten ulostulojen polariteetti asetetaan moduulien objektikirjaston indeksiin 6202h. Pulssisuhdemoduloitujen lähtöjen lähtevää tietoa täytyy muokata ennen lähetystä (ks. Esimerkkikoodi 9 ja Esimerkkikoodi 10). [9, s. 25, 28.]

### 5.3.1 Digitaalisen ulostulon ohjaus sisääntulon mukaan

Digitaalisen ulostulon, esimerkiksi jonkun valon, ohjaaminen lienee yksinkertaisin tapaus (Esimerkkikoodi 3).

```
CANO_FJB1_WRITE_BYTE_0_Bit0 := CANI_FJB2_READ_BYTE_1_Bit0;
```

Esimerkkikoodi 3. Ulostulon muuttaminen sisääntulon funktiona.

Koodissa ladataan FJB2-moduulilta tullut sisääntulon arvo FJB1-moduulin ulostulon muuttujaan, joka lähetetään CAN-väylälle. Ulostuloja voidaan ohjata minkä tahansa bittimuuttujan mukaan ja vastaavasti mitä tahansa bittimuuttujaa voidaan ohjata sisääntulon mukaan.

### 5.3.2 I/O-moduulien analogiatulojen arvon muuttaminen käytettäviksi arvoiksi.

CoDeSys-projektiin tehtiin muutosfunktiot I/O-moduulien 8- ja 10-bittisille analogiatuloille sekä bittiarvoiksi että jännitearvoiksi. 8-bittiset analogiatulojen arvot tulevat CO-4011-BD-moduulista yhden tavun mittaisena siten, että alle 2,5 voltin arvot näytetään negatiivisina (eniten merkitsevä bitti 1) ja yli 2,5 voltin arvot positiivisina (eniten merkitsevä bitti 0) [9, s. 29]. Muutos käytettävämpään bittimuotoon näkyy esimerkkikoodissa 4 ja muutos jännitemuotoon esimerkkikoodissa 5.

```
FUNCTION Conv8BAi : BYTE (*8-bit conversion function*)
VAR_INPUT
  AI_IN : BYTE;
END_VAR

IF AI_IN <= 127 THEN
  Conv8BAi := AI_IN + 128; (*2,5 V and up are increased by 128*)
ELSE
  Conv8BAi := AI_IN - 128; (*less than 2,5 V are decreased by 128*)
END_IF
(*Function returns variable with same name as the function*)
```



Esimerkkikoodi 4. 8-bittisen analogiatulon muutosfunktio.

Funktiossa muutetaan sisään tuleva muuttuja lineaarisesti välillä 0–255, joka vastaa jänniteväliä 0–5 V. Funktio palauttaa arvon tavuna.

```

FUNCTION Conv8BAiV : REAL
VAR_INPUT
    AI_IN : BYTE;
END_VAR
VAR
    INTERNAL0 : BYTE;
    INTERNAL1 : REAL;
END_VAR

IF AI_IN <= 127 THEN
    INTERNAL0 := AI_IN + 128;
ELSE
    INTERNAL0 := AI_IN - 128;
END_IF
INTERNAL1 := BYTE_TO_REAL(INTERNAL0);
Conv8BAiV := INTERNAL1*5/256; (*Multiply value with one ADC-step
voltage*)
(*Function returns variable with same name as the function*)

```

Esimerkkikoodi 5. 8-bittisen analogiatulon muutosfunktio, joka muuttaa tulevan signaalin arvon jännitearvoksi.

Funktiossa ensin linearisoidaan sisään tuleva muuttuja, jonka jälkeen se muutetaan jännitearvoksi (V) ja palautetaan reaalityönä.

10-bittiset analogiatulot lähetetään CO-4017-BD-moduuleilta kahden tavun mittaisina positiivisina arvoina (eniten merkitsevä bitti 0) siten, että ne on siirretty eniten merkitsevän bitin suuntaan [10, s. 23]. Muutos käytettävään bittimuotoon näkyy esimerkkikoodissa 6 ja muutos jännitemuotoon esimerkkikoodissa 7

```

FUNCTION Conv10BAi : WORD
VAR_INPUT
    AI_IN : WORD;
END_VAR

Conv10BAi := SHR(AI_IN, 5);(*Shift data 5 bits right*)
(*Function returns variable with same name as the function*)

```

Esimerkkikoodi 6. 10-bittisen analogiatulon arvon muutosfunktio.

Funktiossa siirretään bittejä oikealle siten, että 0 V vastaa bittiarvoa 0 ja 5 V vastaa bittiarvoa 1023. Arvo palautetaan kahden tavun mittaisena sanana.

```

FUNCTION Conv10BAiV : REAL
VAR_INPUT
    AI_IN : WORD;
END_VAR
VAR
    INTERNAL0 : WORD;
    INTERNAL1 : REAL;
END_VAR

INTERNAL0 := SHR(AI_IN, 5);
INTERNAL1 := WORD_TO_REAL(INTERNAL0);
Conv10BAiV := INTERNAL1*5/1024; (*Multiply value with one ADC step voltage*)
(*Function returns variable with same name as the function*)

```

Esimerkkikoodi 7. 10-bittisen analogiatulon muutosfunktio, joka muuttaa tulevan signaalin arvon jännitearvoksi.

Funktiossa siirretään ensin bittejä, minkä jälkeen arvo muutetaan jännitearvoksi ja palautetaan reaalilukuna.

Funktioiden käyttö on esitetty esimerkkikoodissa 8. Funktioilla voidaan esimerkiksi lukea suoraan anturitietoa jännitetietona tai bittiarvona muuttujiin, joita voidaan käyttää koodissa ohjauksien luomiseen.

```

(*Convert 10 bit analog input to readable binary form(WORD)*)
ANALOGIA_ARVO_10BIT := Conv10BAi(AI_IN := OD_FJB2_READ_AI[1]);

(*Convert 10 bit analog input to voltage value (REAL) *)
ANALOGIA_ARVO_10BIT_V := Conv10BAiV(AI_IN := OD_FJB2_READ_AI[1]);

(*Convert 8 bit analog input to readable binary form (BYTE)*)
ANALOGIA_ARVO_8BIT := Conv10BAi(AI_IN := OD_FJB1_READ_AI[1]);

(*Convert 8 bit analog input to voltage value (REAL)*)
ANALOGIA_ARVO_8BIT_V := Conv10BAiV(AI_IN := OD_FJB1_READ_AI[1]);

```

Esimerkkikoodi 8. Analogiatulojen muutosfunktioiden käyttö.

Funktioiden käyttö on suoraviivaista. Ensin luodaan muuttuja, mihin data halutaan sisällyttää. Muuttujan tyyppin on vastattava funktion muuttujaa. Tämän jälkeen kutsutaan haluttua funktiota, jonka parametriksi annetaan halutun tulon data. Funktion palautus sijoitetaan luotuun muuttujaan.

### 5.3.3 CO-4017-BD-moduulien PWM-lähtöjen ohjaus

PWM-lähtöt aktivoidaan asettamalla CO-4017-BD-moduulin objektikirjaston indeksin 5100h ali-indeksiin 1 arvo 255. PWM-taajuus valitaan muuttamalla indeksin 5402h ali-

indeksin 0 arvoa. Perustaajuus on 24 kHz, jota voidaan jakaa arvovälillä 1–250, jolloin mahdolliseksi taajuusväliksi muodostuu 96–24000 Hz. PWM-lähdöt ovat 10-bittisiä, ja lähtevien viestien arvoja pitää siirtää samaan tapaan kuin 10-bittisissä analogiatuloissa mutta eri suuntaan (Esimerkkikoodi 9). [10, s. 17, 25.]

```
FUNCTION ConvPWM : WORD
VAR_INPUT
    PWM_IN: WORD;
END_VAR

ConvPWM := SHL(5, PWM_IN);
```

Esimerkkikoodi 9. PWM-ulostuloarvon muutosfunktio.

Funktiossa siirretään bittejä siten, että 1023 vastaa arvoa 32767, joka vastaa 100 %:n pulssisuhdetta. Ulostulon arvo skaalautuu lineaarisesti 0–100 prosenttiin sisääntulon ollessa välillä 0–1023. Funktion käyttö on esitetty esimerkkikoodissa 10.

```
(*Convert 10 bit PWM value to IO-module format*)
OD_FJB2_WRITE_PWM[1] := ConvPWM(PWM_IN := PWM_ARVO_10BIT);
```

Esimerkkikoodi 10. PWM-ulostulon arvon muutosfunktion käyttö.

Funktion käyttö noudattaa seuraavaa logiikkaa: Ensin luodaan muuttuja johon sijoitetaan haluttu PWM-arvo väliltä 0-1023. Tämän jälkeen muuttuja syötetään muutosfunktion sisääntuloparametriksi ja funktion palautus sijoitetaan PWM-ulostulomuuttujaan.

## 6 Elektroniikan suunnittelu

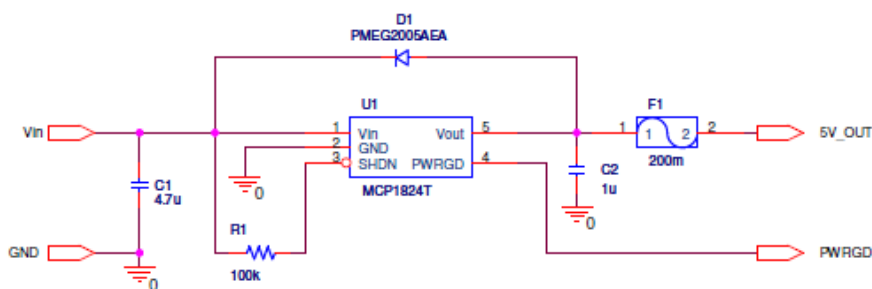
Väyläohjattujen I/O-moduulien kytkentäkaavion suunnittelu jakaantui kahteen osaan. Aluksi suunniteltiin moduulien vaatimat oheistoiminnot: virransyöttö ja CAN-väylä. Lopuksi suunniteltiin tulojen ja lähtöjen puskurointi ja suojaus.

Piirin eri osa-alueista tehtiin suunnittelun aikana testilevyjä Metropolian piirilevyjyrsimellä ominaisuuksien testaamiseksi ja mahdollisten ongelmien löytämiseksi ennen varsinaisen levyn teettämistä. Lopulliset kytkentäkuvat ovat liitteessä 2.

## 6.1 Virransyöttö

I/O-moduulipiirilevyn aikaisemmassa versiossa käytettiin lineaariregulaattoreita. Ne kuitenkin toimivat melko lämpiminä ja hukkasivat tehoa. Uuteen levyversioon suunniteltiin hybridivirransyöttö, jossa kaksikanavaisella buck-tyyppisellä hakkurilla ensin lasketaan molempien kanavien jännite 5,4 volttiin. Toisen kanavan 5,4 voltista jännite lasketaan 5 volttiin MCP1824T 5.0 V-lineaariregulaattorilla, jolloin saadaan erittäin siisti jännite I/O-moduuleille ja sen oheiskomponenteille. Ensimmäisen kanavan 5,4 voltin jännitettä käytetään suoraan digitaalisten puskureiden virransyöttöön, jolloin lineaariregulaattoreita ei turhaan kuormiteta.

Liitettäville antureille tehtiin kolmella lineaariregulaattorilla kahdeksan reguloitua 5 voltin ulostuloa hakkurin ensimmäisestä kanavasta. Lineaariregulaattoreissa on suojaus oikosulun aiheuttamaa ylivirtaa vastaan. MCP1824T:ssä on lisäksi rakennettu suojadiodi sisään ja ulostulon väliin ulostulon ylijännitteitä vastaan. Sen virrankesto ei ole riittävä jatkuvaa 12 voltin oikosulkua vastaan joten ulostuloihin liittyviin lineaariregulaattoreihin lisättiin ulkoiset riittävällä virrankestolla varustetut PMEG2005AEA-schottkydiodit suojadiodeiksi. Ylijännitteen aiheuttama virta rajoitetaan 200 milliampeerin palautuvilla PTC-sulakkeilla. (Kuva 9.) [8, s. 5.]



Kuva 9. Lineaariregulaattorin kytkentä.

C1 on sisääntulokondensaattori ja C2 ulostulokondensaattori. Tyypilliset arvot 4,7  $\mu\text{F}$  ja 1  $\mu\text{F}$ , annetaan datalehdessä. Näillä piirin toiminta pysyy vakaana. Piirin sammutustoimintoa ei käytetä, joten SHDN-pinni vedetään ylös vastuksella R1. PTC-sulake F1 ja suojadiodi D1 muodostavat suojauksen ulostulon ylijännitettä vastaan. Lineaariregulaattori U1 nostaa PWRGD-pinnin ylös kun ulostulon regulointi on

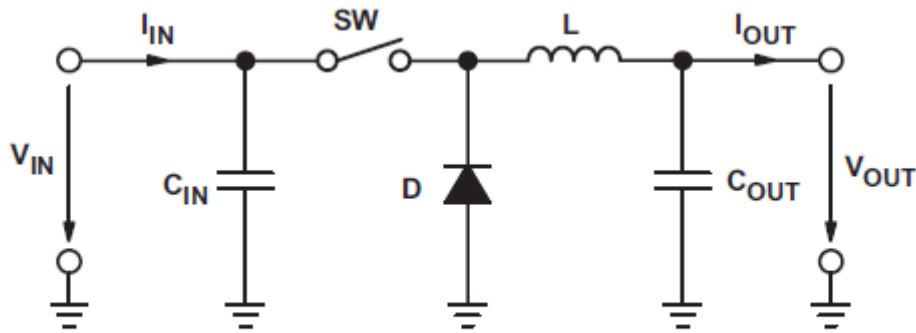
vähintään 92 %. Toimintoa ei ole suoraan kytketty mihinkään, mutta piirilevylle on tehty pädit toiminnon käyttöönottoa ajatellen. [8, s. 1, 3.]

Piirilevy jännitesisääntulo on suojattu jännitetransientteja vastaan metallioksidivaristorilla. Sisääntulon puolella on 15 Vac:n varistori, jonka impedanssi romahtaa 24.5 voltin kohdalla [11, s. 2].

Hakkurista tehdyn testilevyn testaamisen yhteydessä huomattiin sen aiheuttavan kytkentähäiriöitä sisääntuloon. Niiden minimoimiseksi sisääntuloon lisättiin kela, jolloin sisääntuloon muodostuu LC-suodatin, joka suodattaa myös esimerkiksi harjallisten moottoreiden kytkennästä aiheutuvia transientteja auton virransyötön puolelta. (Kuva 15). Virransyötön tulisi myös kestää harvinaisempia vikatilanteita, jolloin virransyötön jännite voi nousta jopa yli 40 voltin useiksi millisekunneiksi. [12, s. 11.] LC-suodattimen yhdessä varistorin kanssa pitäisi aikaansaada riittävä suojaus hakkuripiirille, mutta sopivien testauslaitteiden puuttuessa tätä ei voitu todentaa. Sopiva kelan arvo haettiin testaamalla. Sisääntulojohtoihin kiedottiin vielä ferriitti yhteismuotoisten häiriöiden vaimentamiseksi. Sisääntulo suojataan oikosulun aiheuttamalta ylivirralla johtoon sijoitetulla 5 ampeerin minikoon autosulakkeella ja väärältä jännitteensyötön polariteetilta schottkydiodilla, joka on kytketty estosuuntaan jännitetulon rinnalle.

## 6.2 Hakkurin mitoittaminen

Hakkuri toteutettiin Texas Instrumentsin TPS54386-hakkurivirtalähdepiirillä. Kyseessä on kaksikanavainen maksimissaan 4 ampeerin virran kanavaa kohti syöttävä buck-tyyppinen hakkuripiiri. Vanhasta kokemuksesta virtalähde mitoitetiin puolen ampeerin maksimivirralla CANopen-I/O-moduulien virransyötölle ja ampeerin jatkuvalla virralla toimilaitteiden virransyötölle, mitkä otetaan eri kanavista. Texas Instrumentsin omalla SwitcherPro-ohjelmistolla suunnittelun aloittaminen oli nopeaa ja suoraviivaista. Halutuilla jännitearvoilla ja lähtövirroilla ohjelma antoi tyypilliset komponenttien arvot sekä suositellun komponenttien ladonnan, jota noudatettiin piirilevyä suunnitellessa. [13, s. 1.] Tehokomponenttien mitoittaminen tehtiin myös käsin tulosten varmistamiseksi (Kuva 10).



**Figure 1. Buck Converter Power Stage**

Kuva 10. Buck -tyyppisen hakkurin tehokomponentit [14, s. 1].

Buck-tyyppisen hakkurin tehokomponentteihin kuuluu sisääntulokondensaattori  $C_{IN}$ , kytkinelementti  $SW$ , diodi  $D$ , ulostulokela  $L$  ja ulostulokondensaattori  $C_{OUT}$ . Sisääntulokondensaattorin tehtävä on tasoittaa sisääntulevaa jännitettä siten, että hakkurin toiminta pysyy vakaana. Kytkinelementti katkoo syöttöjännitettä siten, että ulostulon jännite muodostuu halutuksi. Ulostulokelalla ja -kondensaattirilla suodatetaan ulostulojännite tasaisemmaksi. Diodi antaa virralle kulkureitin silloin kun kytkinelementti on suljettuna. Tämä vähentää induktiivisia jännitepiikkejä ulostulossa. [14, s. 3–7.]

### 6.2.1 Kelan mitoitus

Vaadittu kelan minimi-induktanssi  $L$  saadaan seuraavasta yhtälöstä [14, s. 3]:

$$L = \frac{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})}{\Delta I_L \times f_S \times V_{IN}} \quad (1)$$

$V_{OUT}$	Hakkurin ulostulojännite
$V_{IN}$	Hakkurin sisääntulojännite
$\Delta I_L$	Kelan ripple -virta
$f_S$	Hakkurin kytkentätaajuus

josta  $\Delta I_L$  voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä [14, s. 3]:

$$\Delta I_L = \Delta I_L^{\%} \times I_{OUT}^{MAX} \quad (2)$$

$I_{OUT}^{MAX}$  Hakkurin maksimiulostulovirta

$\Delta I_L^{\%}$  Kelan ripple-virran osuus hakkurin ulostulovirrasta, tyypillisesti 0,2–0,4 (20–40 %)

Syöttämällä yhtälöihin 1 ja 2 arvot:

$V_{OUT}$  5,4 V

$V_{IN}$  15 V

$f_S$  600 kHz

$I_{OUT}^{MAX}$  1 A / 0,5 A

$\Delta I_L^{\%}$  0,2

saadaan kelojen minimiarvoiksi 1 A:n virralle 28  $\mu\text{H}$  ja 0,5 A:n virralle 57  $\mu\text{H}$ . SwitcherPro mitoitti näistä seuraavat E12-sarjaan kuuluvat kelat (33  $\mu\text{H}$  ja 68  $\mu\text{H}$ ). Käytännössä virrat varsinkin 0,5 A:n puolella jäävät puolen ampeerin alapuolelle, joten sinne mitoitettiin 100  $\mu\text{H}$  kela, jolloin ripple -virta jää hieman pienemmäksi. 1 A:n puolelle mitoitettiin 68  $\mu\text{H}$  kela. Bourns SRU8043-sarjasta löytyy kaikkia edellä mainittuja keloja samalla piirilevyjalanjäljellä ja noin ampeerin DC- ja saturaatiovirrankestolla, joten kelan vaihtaminen testaamisen jälkeen ei ole vaikeata. [15, s. 1.]

### 6.2.2 Sisääntulokondensaattorin mitoitus

Tyypillisesti sisääntulokondensaattorin arvo annetaan datalehdessä. Sen tehtävänä on taata hakkuriohjaimelle tasainen jännite ja vakauttaa toimintaa [14, s. 4]. Tässä tapauksessa vaadittava minimiarvo 10  $\mu\text{F}$  kanavaa kohden annettiin hakkuriohjaimen datalehdessä [13, s. 37]. Koska autokäytössä virransyöttö on melko häiriöistä, ei ole liioiteltua lisätä sisääntuloon vielä yhtä 100  $\mu\text{F}$ :n elektrolyyttikondensaattoria. SwitcherPro-ohjelma mitoitti sisääntuloon kaksi kappaletta 10  $\mu\text{F}$ :n keraamisia kondensaattoreita.

Sisääntuloon valittiin taulukon 4 mukaiset kondensaattorit:

Taulukko 4. Sisääntuloon valitut kondensaattorit.

Kondensaattori		Tyyppi	Lähde
Panasonic EEETG1V101UP		Elektrolyytti	
<b>Kapasitanssi</b>	<b>Jännitteenkesto</b>	<b>ESR</b>	
100 $\mu\text{F}$	35 V	0,5 $\Omega$ @ 100 kHz	[16, s.3]
<b>Kondensaattori</b>		<b>Tyyppi</b>	
2 kpl MURATA GRM32ER7YA106KA12L		Keraaminen	
<b>Kapasitanssi</b>	<b>Jännitteenkesto</b>	<b>ESR</b>	
10 $\mu\text{F}$	35 V	$\sim$ 0,1 $\Omega$ @ 10 kHz	[17, s.1]

### 6.2.3 Ulostulokondensaattorin mitoitus

Hakkuriipiiri vaatii ulostulokondensaattorin kapasitanssiksi yli 50 mikrofaradia, jotta ulostulojännitteeseen ei muodostu häiriöitä siirryttäessä pehmeästä käynnistyksestä normaaliin toimintatilaan [13, s. 15]. Perinteisellä mitoituksella ulostulon minimikapasitanssi  $C_{OUT}^{MIN}$  saadaan seuraavasta yhtälöstä [14, s. 4]:

$$C_{OUT}^{MIN} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_S \times \Delta V_{OUT}} \quad (3)$$

$\Delta I_L$  Arvioitu kelan ripple-virta

$f_S$  Hakkurin kytkentätaajuus

$\Delta V_{OUT}$  Haluttu ulostulon ripple-jännite

Ulostulon ripple-jännitteen arvona voidaan käyttää esimerkiksi 10:tä millivolttia, joka on jo melko pieni ripple-jännite. Kelan ripple-virta voidaan approksimoida kelan mitoittamiseen käytettävästä yhtälöstä (yhtälö 2), mikäli käytetään liki samalla arvolla olevaa kelaa. Koska kela mitoitettiin hieman suuremmaksi, käytetään ripple-virran  $\Delta I_L$  suuruuden arvioimiseen seuraavaa yhtälöä [14, s. 2]:



$$\Delta I_L = \frac{(V_{IN}^{MAX} - V_{OUT}) \times D}{f_s \times L} \quad (4)$$

$V_{IN}^{MAX}$	Sisääntulon maksimijännite
$V_{OUT}$	Ulostulojännite
$D$	Suurin kytkennän pulssisuhde (Yhtälö 5)
$f_s$	Hakkurin kytkentätaajuus
$L$	Kelan induktanssi

Suurin kytkennän pulssisuhde  $D$  saadaan seuraavasta yhtälöstä [14, s. 1]:

$$D = \frac{V_{OUT} \times \eta}{V_{IN}^{MIN}} \quad (5)$$

$V_{OUT}$	Ulostulojännite
$V_{IN}^{MIN}$	Sisääntulo minimijännite
$\eta$	Hakkurin hyötysuhde, n 90 % [13, s. 38].

Sisääntulon minimijännitettä käytetään, koska silloin kytkentävirrät ovat yleensä suurimmat [14, s. 1]. Minimiarvona voidaan käyttää 9 voltia. Tätä matalammat jännitteet ovat autokäytössä yleensä lyhytkestoisia jolloin pienet häiriöt ulostulojännitteessä ovat hyväksyttäviä. Arvoilla  $V_{OUT} = 5,4 \text{ V}$ ,  $V_{IN}^{MIN} = 9 \text{ V}$ ,  $\eta = 0,9$  saadaan ulostulon pulssisuhteeksi  $D$  0,54. Kun tätä arvoa käytetään yhtälössä 4, saadaan arvoilla  $V_{IN}^{MAX} = 15 \text{ V}$ ,  $V_{OUT} = 5,4 \text{ V}$ ,  $f_s = 600 \text{ kHz}$  kelan ripple-virta  $\Delta I_L$  kun kelan induktanssi on.

$$L = 100 \mu\text{H} \Rightarrow \Delta I_L = 86 \text{ mA}$$

$$L = 68 \mu\text{H} \Rightarrow \Delta I_L = 126 \text{ mA}$$

Näistä arvoista saadaan taas ulostulojen minikapasitanssit  $C_{OUT}^{MIN}$  kun arvot syötetään yhtälöön 3, muiden arvojen ollessa  $f_s = 600 \text{ kHz}$  ja  $\Delta V_{OUT} = 0,02 \text{ V}$ .

$$\Delta I_L = 86 \text{ mA} \Rightarrow C_{OUT}^{MIN} = 2 \text{ } \mu\text{F}$$

$$\Delta I_L = 126 \text{ mA} \Rightarrow C_{OUT}^{MIN} = 3 \text{ } \mu\text{F}$$

Arvot vaikuttavat pieniltä ja pätevätkin vain hakkurin toimiessa normaalissa toimintatilassa. Yleensä joudutaan ottamaan huomioon transienttitilanteet, kun hakkurin sisääntulojännite tai ulostulovirta muuttuu. Lisäksi ulostulon ripple-jännitteeseen vaikuttaa ulostulokondensaattorin sisäinen sarjavastus. Kun ripple-virran suuruus on näinkin pieni ja ulostulon kondensaattoreiden sisäinen sarjavastus hyvin alhainen, voidaan sen aiheuttamaa ripple-jännitettä pitää tässä tapauksessa merkityksettömänä (< 5 mV). Kuorman virran muutosten aiheuttaman ripple-jännitteen kompensoimiseen soveltuvan kondensaattorin minimikapasitanssin  ${}^{OS}C_{OUT}^{MIN}$  arvioimiseen voidaan käyttää seuraavaa yhtälöä [14, s. 5]:

$${}^{OS}C_{OUT}^{MIN} = \frac{\Delta I_{OUT}^2 \times L}{2 \times V_{OUT} \times V_{OS}} \quad (6)$$

$\Delta I_{OUT}$	Hakkurin syöttövirran muutos
$L$	Ulostulokelan induktanssi
$V_{OUT}$	Ulostulojännite
$V_{OS}$	Jännitteen yliammunta

Tilanne on pahempi toimilaitteiden puolella, missä kuormia kytketään ja irrotetaan, joten kondensaattorin minimikapasitanssin laskettiin vain sille puolelle. Syöttövirran muutoksen arvona käytetään 500 milliampeeria, joka vastaa puolta hakkurin suunnitellusta nimellisestä virrasta ja toivottuna jännitteen yliammuntana 50:tä millivolttia joka on vielä kohtuullinen arvo. Seuraavilla arvoilla  $\Delta I_{OUT} = 0,5 \text{ A}$ ,  $L = 68 \text{ } \mu\text{H}$ ,  $V_{OUT} = 5,4 \text{ V}$ ,  $V_{OS} = 0,05 \text{ V}$  saadaan kondensaattorin minimikapasitanssiksi  ${}^{OS}C_{OUT}^{MIN} = 31 \text{ } \mu\text{F}$ , mikä on melko lähellä datalehden suosittelemaa arvoa yli 50  $\mu\text{F}$  sekä SwitcherPro -ohjelman antamaa arvoa 47  $\mu\text{F}$ . Ulostuloon valittiin taulukon 5 mukaiset kondensaattorit kummallekin hakkurin kanavalle.

Taulukko 5. Valitut ulostulokondensaattorit.

Kondensaattori		Tyyppi	Lähde
TDK C3225X7R1E106K250AC		Keraaminen	
<b>Kapasitanssi</b>	<b>Jännitteenkesto</b>	<b>ESR</b>	
10 $\mu$ F	25 V	0,01 $\Omega$ @ 600 kHz	[18, s. 1]
<b>Kondensaattori</b>		<b>Tyyppi</b>	
VISHAY SPRAGUE 594D476X0016C2T		Tantaali	
<b>Kapasitanssi</b>	<b>Jännitteenkesto</b>	<b>ESR</b>	
47 $\mu$ F	15 V	0,11 $\Omega$ @ 100kHz	[19, s. 3]

#### 6.2.4 Diodin mitoitus

Hakkureissa kannattaa pääsääntöisesti käyttää schottkydiodeja niiden piidiodia pienemmän kynnsjännitteen vuoksi. Tämä vähentää diodin tehohäviötä. Lisäksi schottkydiodeilla huippuvirtojen kesto on paljon suurempi kuin tehollisen virran kesto. [14, s. 3.] Diodin keskimääräisen virran  $I_F$  määrittämiseen voidaan käyttää seuraavaa yhtälöä [14, s. 3]:

$$I_F = I_{OUT}^{MAX} \times (1 - D) \quad (7)$$

$I_F$	Diodin läpi kulkevan virran keskiarvo
$I_{OUT}^{MAX}$	Hakkuriin suurin syöttämä keskimääräinen virta
$D$	Pulssisuhte

Pulssisuhteelle  $D$  laskettiin yhtälössä 5 arvo 0,54. Nyt on syytä käyttää samassa yhtälössä jännitteen maksimiarvoa, jolloin saamme diodin keskimääräiselle virralle suurimman mahdollisen arvon. Arvoilla  $V_{OUT} = 5,4$  V,  $V_{IN}^{MIN} = 15$  V ja  $\eta = 0,9$  saamme pulssisuhteelle  $D$  arvon 0,32. Diodin keskimääräinen virta laskettiin vain hakkurin toimilaitteiden puoleiselle kanavalle, koska sen virta on suurempi. Kun arvot  $I_{OUT}^{MAX} = 1$  A,  $D = 0,32$  syötetään yhtälöön 7 saadaan diodin keskimääräiselle virralle  $I_F$  arvo 0,68 A. Diodin tehonkulutus  $P_D$  saadaan yhtälöstä [14, s. 3]:

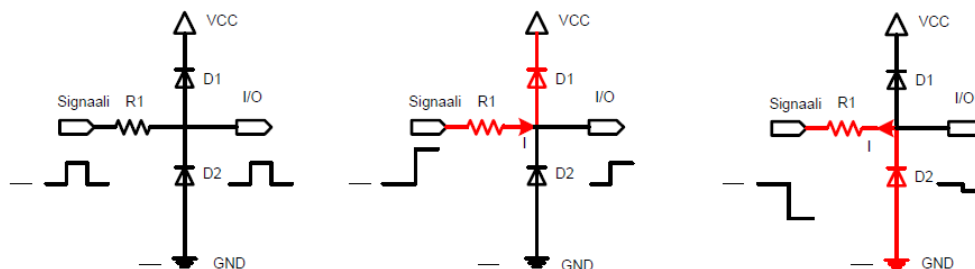
$$P_D = I_F \times V_F \quad (8)$$

$I_F$	Diodin keskimääräinen virta
$V_F$	Diodin kynnyksjännite

Diodin kynnyksjännitteelle  $V_F$  käytetään B240/A schottkydiodin datalehdeltä löytyvää arvoa 0,5 V [20, 2]. Kun tätä arvoa ja edellisessä kohdassa laskettua arvoa  $I_F = 0,7$  A käytetään saadaan diodin tehonkulutukseksi  $P_D = 0,35$  W. Diodiksi valittiin edellä mainittu B240/A-schottkydiodi, sen ominaisuuksien ollessa riittävät.

### 6.3 Tulojen ja lähtöjen suunnittelu

Tulot ja lähdöt on suojattu oikosulkua, positiivisia ja negatiivisia jännitepiikkejä vastaan. Suojaukset on toteutettu samalla perusidealla neljällä eri tavalla sen mukaan, onko kyseessä digitaalinen sisään-tulo, digitaalinen ulostulo, digitaalinen sisään- ulostulo, vai analoginen tulo. Jokaisessa sisään- ja ulostulopinnissä on diodisuojaus maahan ja suojattavan mikropiirin käyttöjännitteeseen (Kuva 11).



Kuva 11. I/O –pinnien suojaus

Sisään tulevan signaalin jännitteen ollessa suojattavan mikropiirin käyttöjännitteiden välissä kummatkin diodit ovat estosuunnassa eivätkä johda. Mikäli signaalin jännite nousee korkeammaksi kuin käyttöjännite ja diodin D1 kynnyksjännite, alkaa diodi D1 johtaa. Mikäli taas signaalin jännite on alle mikropiirin maatasen ja diodin D2 kynnyksjännitteen, alkaa diodi D2 johtaa. Molemmissa tapauksissa sisään-tulovastus R1 rajoittaa kulkevan virran määrän. Pitkäaikaisessa oikosulussa käyttöjännitteiden

ulkopuolella olevaan jännitteeseen rajoittavaksi tekijäksi muodostuu vastuksen  $R_1$  tehonkesto. Vastuksen minimiarvo  $R_{MIN}$  voidaan laskea Ohmin laista  $U = RI$  ja tehon yhtälöstä  $P = UI$  johdetulla yhtälöllä:

$$R_{MIN} > \frac{U_R^2}{P_R} \quad (9)$$

$U_R$  Vastuksen yli vaikuttava jännite

$P_R$  Vastuksen tehonkesto

Vastuksen tehonkesto riippuu käytettävästä vastuksen kotelosta. Sisääntulovastuksina käytetään 1206-kotelolla olevia pintaliitosvastuksia joiden tehonkesto on 250 mW. Vastuksen yli vaikuttava jännite  $U_R$  diodin johtaessa muodostuu yhtälön

$$U_R = U_{IN} - U_{CC} - U_D \quad (10)$$

mukaan, missä  $U_{IN}$  on oikosulkeva jännite,  $U_{CC}$  on suojattavan piirin käyttöjännite ja  $U_D$  on diodin kynnsjännite.

### 6.3.1 Analogiset sisääntulot

I/O-moduulin aikaisemmassa versiossa oli ongelmia analogiatulojen häiriöiden kanssa. Etenkin CO4017-BD-moduulin 10-bittisten analogiatulojen arvo heitteli useita vähiten merkitseviä bittejä. Tähän oli nähdäkseen kaksi syytä: maatasojen suunnittelu ja puskuroimattomat tulot. Nyt suunniteltavassa levyversiossa molempiin asioihin on kiinnitetty huomiota. Analogiatulojen maatasot on erotettu digitaalisesta ja ne on kytketty toisiinsa vain yhdestä pisteestä. Myös digitaalinen maa on erotettu pienten ja suurten virtojen osalta. Analogiatuloihin on lisätty myös AD 8542 -operaatiovahvistimella toteutettu puskuri, johon voidaan lisätä sisään- ja ulostulopuolelle kondensaattorit, jolloin voidaan toteuttaa ensimmäisen tai toisen asteen alipäästösuodatint. Operaatiovahvistimen lisäyksellä saatiin myös sellainen etu, että käyttämättömiä analogiatuloja ei tarvitse enää erikseen kytkeä maahan. Mikäli tulo jäisi kytkemättä ilman lisättyä operaatiovahvistinta, saattaisi se käytetystä CMOS

-teknologiasta johtuen vikaantua oikosulkemalla käyttöjännitteen ja maan piirin sisältä.  
[21, s. 2.]

Lisäksi neljään analogiatuloon lisättiin mahdollisuus juottaa ylösvetovastukset. Sisäänrakennetun ylösvetovastuksen avulla voidaan resistiivisiä antureita, esimerkiksi NTC-tyyppisiä lämpötila-antureita, kytkeä suoraan analogiatulon ja analogiamaan väliin ilman erillistä jännitteensyöttöä.

Analogiset sisääntulot on suunniteltu kestämään  $\pm 24$  V:n oikosulku. Suojadiodina toimii nelikanavainen transienttisuojadiodi Littlefuse SP724. Tällöin sisääntulovastuksen minimivastusarvoksi muodostuu yhtälöiden 9 ja 10 mukaan 2,35 k $\Omega$ . Vastukseksi valittiin E12-sarjasta seuraava arvo eli 2,7 k $\Omega$ . Analogiatuloihin suunniteltujen operaatiovahvistimien sisääntuloimpedanssi on niin suuri ( $>1$  M $\Omega$ ), että tämän kanssa sarjassa olevan 2,7 k $\Omega$  sisääntulovastuksen merkitys on minimaalinen [22, s. 3].

### 6.3.2 Digitaaliset sisääntulot

Digitaaliset sisääntulot on määritelty oletuksena aktiiviseksi, kun tulo on ylhäällä. Moduuleissa ei ole sisäänrakennettuja ylös- eikä alasetovastuksia, joten ne lisättiin käyttämällä yksirivisiä 15k $\Omega$ :n vastusverkkoja joiden yhteinen napa on kytketty maihin. Kahdeksaan tuloon tehtiin mahdollisuus vaihtaa vastusverkon yhteinen napa käyttöjännitteeseen, jolloin se toimii ylösvetovastuksena. Tällöin on mahdollisuus käyttää esimerkiksi kytkimiä kytkemällä ne suoraan tuloon ja maan väliin. Lisäksi tulojen rinnalle lisättiin pieniarvoiset keraamiset kondensaattorit mahdollisten häiriöjännitteiden aiheuttamien virheellisten loogisen tilan muutoksien estämiseksi.

Digitaalisten sisääntulojen suojadiodina toimii sama Littlefuse SP724 kuin analogiatuloissakin. Digitaalisten sisääntulojen impedanssi on sen verran pieni, ettei 2,7 kilo-ohmin sarjavastuksen vaikutusta voida pitää mitättömänä. Tästä johtuen digitaaliset sisääntulot on suojattu kestämään "vain"  $\pm 12$  V:n jatkuva oikosulku, jolloin tarvittavaksi vastukseksi muodostuisi 590  $\Omega$  (yhtälö 9; yhtälö 10). Jatkuvan negatiivisen 12 V:n oikosulun todennäköisyys, jolloin vastuksen läpi kulkeva virta on suurin, on kuitenkin autokäytössä niin pieni että lopulta suunnittelussa päädyttiin 560  $\Omega$  vastukseen. Tällöin ollaan +12 V:n oikosulussa vielä turvallisen puolella.

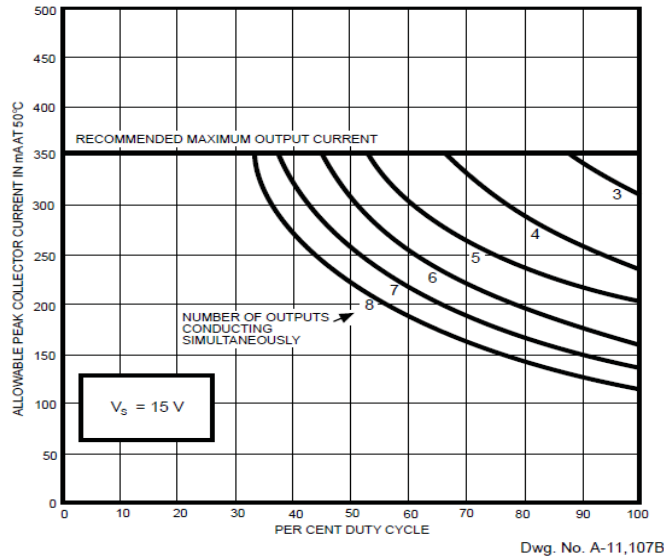
### 6.3.3 Digitaaliset- ja PWM-ulostulot

Ulostulot toimivat syöttävinä, eli ne ovat ylhäällä, kun heräte on päällä. Vanhassa levyversiossa ulostuloista sai ulos muutamia milliampeereja virtaa. Nyt tavoitteena oli saada ulostuloilla ajettua suoraan pieniä toimilaitteita, kuten taustavaloja, releitä tai pieniä moottoreita.

Ulostuloissa käytetään Allegron kahdeksankanavaisia syöttäviä ajureita A2982 joihin on tehty vaihdettavat käyttöjännitteet 12 V tai 5,4 V. Ajurissa on sisäänrakennetut suojadiodit negatiivisia jännitteitä vastaan sekä ulostulojen jännitteenkesto on 50 V [23, s. 2–3]. Sisäänrakennettujen diodien virrankesto on niin pieni, että ne toimivat transienttisuojauksena, mutta oikosulkua negatiiviseen jännitteeseen ne eivät kestä. Suojauksen parantamiseksi suunniteltiin ulostuloihin lisättäväksi kaksikanavaiset riittävällä virrankestolla varustetut schottkydiodit, mutta piirilevyn tilanpuutteen vuoksi niistä jouduttiin luopumaan. Lähtöjen vikasetokykyä suhteessa vian aiheuttavan olosuhteen todennäköisyyteen voidaan pitää riittävänä.

Lähdeajureihin toteutettiin alasvetovastukset vastusverkoilla sekä sisään- että ulostulon puolelle. Lisäksi ulostulon puolelle lisättiin pieniarvoiset kondensaattorit lähtöjen rinnalle, että häiriöjännitteet eivät niin herkästi kytke suuri-impedanssisia kuormia päälle.

Yhdellä lähdeajurilla olisi tarkoitus pystyä ajamaan neljää relettä (100–200 mA/rele) tai pienempiä kuormia, kuten puolijohdekytkimien herätteitä, kahdeksalla kanavalla (Kuvio 1). Suuremmista virroista johtuen sarjavastuksen käyttäminen on käytännössä mahdotonta, joten suunnittelussa päädyttiin 200 milliampeerin palautuviin PTC-sulakkeisiin. Sulakkeiden minimipitovirta on 200 mA ja suurin laukeamisvirta 400 mA. Nimellinen jännitteenkesto on 30 V, joka on riittävä. Sulakkeiden suurin sarjavastus tunti laukeamisen jälkeen on 2,5  $\Omega$ , joka on riittävän alhainen jännitehäviöiden minimoimiseen maksimipitovirralla. [24, s.1.]



Kuvio 1. Allegro A2980:n maksimiulostulovirta johtavien kanavien lukumäärän ja pulssisuhteen funktiona [23, s. 6].

Huomattavaa on se, että on mahdollista ylikuormittaa laite, mikäli jokaista lähtöä kuormitetaan sulakkeen nimellisellä pitovirralla (200 mA). Käyttäjän vastuulle jää jakaa kuormat eri laitteiden kesken siten, ettei yksittäinen ajuri kuormitu liikaa

#### 6.3.4 Digitaaliset sisään-ulostulot

CO-4011-BD -I/O-moduulissa on kahdeksan tuloksi tai lähdeksi konfiguroitavaa kanavaa [21, s. 3]. Konfigurointiominaisuus haluttiin säilyttää joten kanavat toteutettiin käyttämällä kahdeksankanavaista lähetinvastaanotinta SN74ABTH245, jonka suunta on vaihdettavissa piirilevyllä olevalla jumpperilla. Lähetinvastaanottimen virransyöttökyky on vaatimaton, mutta sillä on mahdollista kytkeä esimerkiksi puolijohdekytkimiä, joita järjestelmässä käytetään useimmissa toiminnoissa. [25, s. 3.]

SN74ABTH245:ssä on toteutettu loogisen tilan pito siten, ettei alavetovastuksien käyttäminen ole välttämätöntä [25, s. 1] – ne lisättiin kuitenkin, koska aikaisemmin suunnitellussa piirilevyssä vastaavalla tekniikalla varustetulla piirillä tuli virheellisiä loogisen tilan muutoksia häiriöjännitteistä johtuen, esimerkiksi kytkettäessä viereistä kanavaa.

Suojaus on toteutettu digitaalisen sisääntulon tapaan 560 ohmin sarjavastuksilla. Lähetinvastaanottimessa on lähdössä negatiivisille alijännitteille suojadiodit, joiden



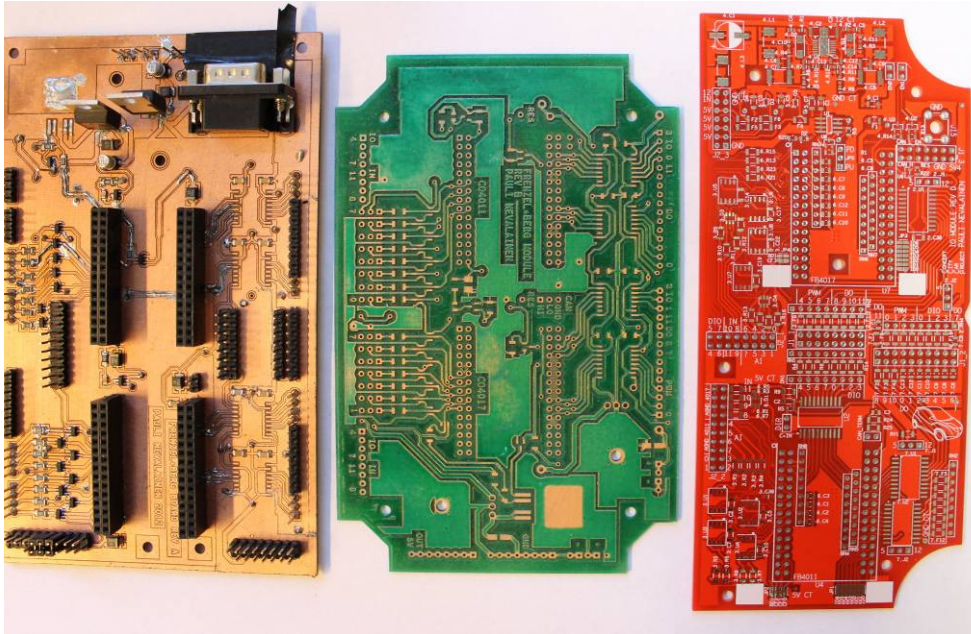
virrankesto on riittävä. Positiivisille ylijännitteille toteutettiin suojadiodit diodiverkolla, jonka yhteinen napa kytkettiin piirin käyttöjännitteeseen.

## 6.4 Piirilevyn suunnittelu

### 6.4.1 Yleistä

KytKentä suunniteltiin Cadencen kehittämällä OrCAD Capture -ohjelmistolla ja piirilevy suunniteltiin Cadencen Allegro PCB Editor -ohjelmistolla. Suunnittelu-yksikkönä käytettiin piirilevysuunnittelussa mil-yksikköä, joka vastaa tuhennesosatuumaa (0,00254 mm).

Piirilevyn nykyinen revisio on D. Ensimmäinen revisio oli karkea testilevy jolla testattiin Frenzel+Berg I/O-moduulien sopivuutta käyttötarkoitukseen noin vuosi ennen insinöörityön aloittamista. Revisio B oli aikaisempi levyversio, josta oli tarkoitus tulla pysyvä ratkaisu. Siinä oli kuitenkin puutteita mm. I/O-pinnien suojauksessa ja virransyötössä, joten levy päätettiin suunnitella kokonaan uudestaan. Revisio C oli suunnitella omaan koteloonsa, mutta ennen piirilevysuunnittelun aloitusta piirilevyn sijoitus muutettiin kytkentärasian sisälle, mikä on osoittautunut hyväksi ratkaisuksi. KytKentä säilyi pääsääntöisesti ennallaan, mutta levyversio päätettiin silti vaihtaa revisio D:ksi. (Kuva 12.)



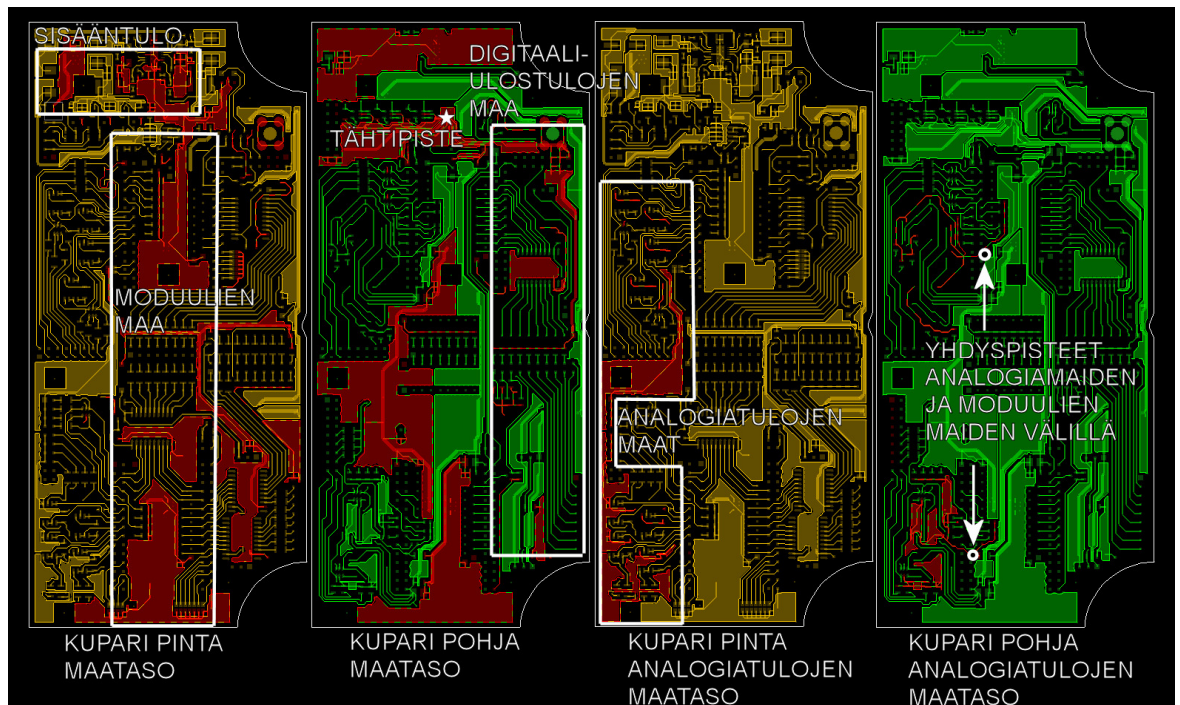
Kuva 12. Levyversiot vasemmalta oikealle A, B, D.

Tämä piirilevyversio suunniteltiin alun perin sillä oletuksella, että se teetetään ulkopuolisella taholla. Aikaisempi levyversio valmistettiin Metropolian piirilevyjyrsimellä ja siihen tehtiin itse JEP, eli juotteenestopinnoite valoherkällä juotteenestopinnoitteella valotusmenetelmällä. Virheestä voidaan sanoa opitun, sillä itse tehtynä vaadittu työmäärä oli melkoinen, eikä jälkikään ollut tyydyttävä, vaikka pinnoite ajoikin asiansa. Ulkopuoliselta taholta tilattuna vetojen minileveytenä ja minimietäisyytenä voitiin pitää 8 mil:ä ilman pelkoa katkoksista tai oikosuluista. Metropolian jyrsimellä saa tehtyä vastaavia vetoja, mutta ne vaativat tarkkaa terän säätöä ja hyväkuntoisen terän. Vedoista olisi valmistustekniikan puolesta voinut tässä tapauksessa tehdä ohuempiakin ja pienemmällä välyksellä, mutta 8 mil on pienin vetojen leveys ja etäisyys, josta suurin osa tutkimistani piirilevyvalmistajista ei peri lisämaksua. Vetojen ohenuksesta ei olisi juuri ollut hyötyä tässä työssä, joten sitä ei suuremmin harkittu. Suurin osa vedoista onkin tehty 20 mil:n tai isommalla leveydellä ja välillä. Myös läpivientien poraukset voitiin tehdä pienemmiksi kokoon 12 mil, eikä niiden määrä ei vaikuttanut työmäärään levyn kasausvaiheessa toisin kuin itse tehtynä. Läpivientien pädi tehtiin kokoon 40 mil. Näillä mitoilla reiän ja pädin reunan välys on 14 mil, joka on minimivälys koko levyssä. Tätä pienemmästä välyksestä suurin osa tutkimistani piirilevyvalmistajista veloittaa lisämaksun.

Piirilevyn koko on 80 mm leveysuunnassa ja 174 mm pituus suunnassa. Kahdessa kulmassa on pyöristykset valitun kotelon reunan mukaan ja yhdellä reunalla pieni kolo

kotelon vahviketta varten. Piirilevy suunniteltiin kaksikerroksiseksi kaksipuolisella ladonnalla. Komponenttien lopulliseksi määräksi tuli 304 (liite 1) ja reikien lukumääräksi 537 läpikuparoitua reikää ja 7 paljasta reikää. Piirilevyn gerber-kuvat löytyvät liitteestä 3.

Piirilevyn suunnittelussa on erityisesti otettu huomioon maatasojen suunnittelu siten, että analogiatulojen maahan syntyä mahdollisimman vähän häiriöitä (Kuva 13).



Kuva 13. Piirilevyn maatasot

Kummankin I/O-moduulin analogiamaat on vedetty erilleen moduulien maasta ja kytketty moduulien analogiatulojen maiden referenssipinneihin. Jotta analogiamaat pysyvät samassa potentiaalissa muun piirin kanssa, ne on kytketty galvaanisesti moduulin maahan yhden pieniohmisen vastuksen läpi. Digitaalisten puskureiden maa, jossa virta ja virran muutokset ovat suurimmat, on kytketty erilleen. Kytkenän tähtipiste löytyy hakkurin ulostulosta, johon I/O-moduulien ja digitaalisten puskureiden maat on kytketty.

Piirilevyllä on levyn luonteesta johtuen melko paljon erinäisiä asetuksia ja sisään- ja ulostulopinnejä, joita on hyvä tarkastella lähemmin. Alla olevia lukuja 6.4.2 ja 6.4.3 voidaan käyttää myöhemmin muistilistana käyttöönoton helpottamiseksi.

## 6.4.2 Liittimet

Piirilevy suunniteltiin aluksi sijoitettavaksi omaan koteloonsa. Tällöin ulostuloliittimiksi valittiin kaksi 48-napaista vesitiivistä liittintä, jotka liittyvät piirilevylle lattakaapeliliittimien avulla. Piirilevysuunnittelun alussa kuitenkin päädyttiin sijoittamaan piirilevy kytkentärasian sisälle, sillä suurin osa kytkentäjohdoista kytketään sinne. Näin helpotetaan johtosarjan suunnittelua. Liitinten nimeäminen kuitenkin jätettiin ennalleen, joten esimerkiksi J1\_1 (Taulukko 6) viittaisi ensimmäiseen 48-napaiseen kytkettävään liittimeen, vaikka kyseessä olevaa liittintä ei enää suunnitelmassa olekaan.

Piirilevyllä on kuusi kappaletta 2,54 mm:n rasterin kaksirivisiä piikkirimoja, joihin sopii joko 2,54 mm:n rasterin lattakaapeliliittimet tai 2,54 mm:n rasterin puristettavat naarspiikkirimaliittimet. Tässä järjestelmässä käytetään puristettavia liittimiä. Piirilevylle lisättiin lisäksi yksi ruuviterminaali, joka on kytketty maihin. Piirilevyn pinnikytkentä näkyy alla olevassa taulukossa 6.

Taulukko 6. Piirilevyn liittimet.

LIITIN	PINNI	TOIMINTO	HUOM
<b>J1_1</b>	1	FB4011 DIO4	Digitaalinen sisään- / ulostulo
	2	FB4011 DIO5	
	3	FB4011 DIO6	
	4	FB4011 DIO7	
	5	FB4011 DIO0	
	6	FB4011 DIO1	
	7	FB4011 DIO2	
	8	FB4011 DIO3	
	9	FB4017 DO11	Digitaalinen ulostulo
	10	FB4017 DO10	
	11	FB4017 DO9	
	12	FB4017 DO8	
	13	FB4017 PWM7	PWM ulostulo
	14	FB4017 PWM6	
	15	FB4017 PWM5	
	16	FB4017 PWM4	

<b>J1_2</b>	1	FB4011 DO10	Digitaalinen ulostulo
	2	FB4011 DO9	
	3	FB4011 DO8	
	4	FB4011 DO0	
	5	FB4011 DO1	
	6	FB4011 DO2	
	7	FB4011 DO3	
	8	FB4011 DO4	

	9	FB4011 DO5	
	10	FB4011 DO6	
	11	FB4011 DO7	
	12	FB4017 DIO3	Digitaalinen ulostulo
	13	FB4017 DIO2	
	14	FB4017 DIO1	
	15	FB4017 DIO0	
	16	FB4017 PWM3	PWM ulostulo
	17	FB4017 PWM2	
	18	FB4017 PWM1	
	19	FB4017 PWM0	
	20	FB4011 DO11	Digitaalinen ulostulo

<b>J1_3</b>	1	GND	
	2	GND	
	3	GND	
	4	5V4_CTRL	Moduulien 5,4 V virransyötön ohitus
	5	EN_CTRL	Moduulien virransyötön heräte
	6	CAN-L	CAN -väylän sisääntulo
	7	CAN-L	
	8	CAN-H	CAN -väylän sisääntulo
	9	CAN-H	
	10	Reset FB4011	FB4011 moduulin uudelleenkäynnistys.
	11	Reset FB4017	FB4017 moduulin uudelleenkäynnistys.
	12	GND	
	13	GND	
	14	5V4_IF	Toimilaitteiden 5,4 V virransyötön ohitus

<b>J2_1</b>	1	FB4017 DIO4	Digitaalinen sisääntulo
	2	FB4017 DIO5	
	3	FB4017 IN11	Digitaalinen sisääntulo
	4	FB4017 IN9	
	5	FB4017 AI7	10 bit Analoginen sisääntulo
	6	FB4017 AI5	
	7	FB4017 AI3	
	8	FB4017 AI1	
	9	FB4017 AI0	
	10	FB4017 AI2	
	11	FB4017 AI4	
	12	FB4017 AI6	
	13	FB4017 IN8	Digitaalinen sisääntulo
	14	FB4017 IN10	
	15	FB4017 DIO7	Digitaalinen sisääntulo
	16	FB4017 DIO5	

<b>J2_2</b>	1	FB4017 Analog GND	Maa analogisille antureille
	2	FB4017 Analog GND	
	3	FB4017 Analog GND	
	4	FB4017 Analog GND	
	5	FB4011 Analog GND	
	6	FB4011 Analog GND	

	7	FB4011 Analog GND	
	8	FB4011 Analog GND	
	9	FB4011 AI0	8 bit analoginen sisääntulo
	10	FB4011 AI1	
	11	FB4011 AI2	
	12	FB4011 AI3	
	13	FB4011 AI7	
	14	FB4011 AI6	
	15	FB4011 AI5	
	16	FB4011 AI4	
	17	FB4011 IN8	Digitaalinen sisääntulo
	18	FB4011 IN9	
	19	FB4011 IN10	
	20	FB4011 IN11	

<b>J2_3</b>	1	GND	
	2	5V OUT	5,0 V reguloitu ulostulo, 150 mA
	3	5V OUT	5,0 V reguloitu ulostulo, 150 mA
	4	5V OUT	5,0 V reguloitu ulostulo, 150 mA
	5	5V OUT	5,0 V reguloitu ulostulo, 150 mA
	6	GND INPUT	Syöttövirran maa
	7	GND INPUT	
	8	12 V INPUT	Syöttövirta, suojattava sulakkeella
	9	12 V INPUT	
	10	5V OUT	5,0 V reguloitu ulostulo, 150 mA
	11	5V OUT	5,0 V reguloitu ulostulo, 150 mA
	12	5V OUT	5,0 V reguloitu ulostulo, 150 mA
	13	5V OUT	5,0 V reguloitu ulostulo, 150 mA
	14	GND	

<b>J15</b>	1	GND	
------------	---	-----	--

Taulukoissa FB4017 viittaa CO-4017-BD-I/O-moduuliin, ja FB4011 viittaa CO-4011-BD-I/O-moduuliin. Liitimet on pyritty täyttämään samankaltaisilla toimintoilla siten, että mahdollisuuksien mukaan tulot ja lähdöt ovat loogisessa järjestyksessä. CO-FB4011-I/O-moduulin DIO-pinnit ovat konfiguroitavissa joko sisään- tai ulostuloiksi. CO-FB4017-I/O-moduulin DIO -pinneistä 0–3 toimivat aina ulostuloina ja 47 sisääntuloina.

#### 6.4.3 Jumperit

Moduulien CANopen Node-ID, CAN-väylän siirtonopeus ja konfigurointi ovat valittavissa piirilevyllä ja moduuleissa sijaitsevilla juotettavilla jumppereilla. Kun jumperi on juotettu kiinni, on se loogisessa tilassa 0. Piirilevyn jumpperit löytyvät taulukosta 7.

Taulukko 7. Piirilevyn juotettavat jumpperit.

Jumpperi	Toiminto	Huom
<b>JP1</b>	FB4011 NODE-ID	Taulukko 8
<b>JP2</b>	FB4011 BAUDRATE & KONFIGUROINTI	Taulukko 9
<b>JP3</b>	FB4017 NODE-ID	Taulukko 8
<b>JP4</b>	FB4017 BAUDRATE & KONFIGUROINTI	

Molempien moduulien NODE-ID:n asetus noudattaa taulukon 8 logiikkaa. Molempien moduulien siirtonopeus on oletuksena 1000 kbps. Siirtonopeus voidaan laskea 500 kilobittiin sekunnissa juottamalla nasta BD1 jumppereista JP2 ja JP4. Muita nopeuksia ei tässä piirilevyssä tueta sillä korisähköjärjestelmän suunniteltu siirtonopeus on 1000 kbps. 500 kbps jätettiin varalle, mikäli nopeutta jouduttaisiin laskemaan verkon pituuden kasvaessa tai verkon sivuhaarojen pituuden kasvaessa [1, s. 1].

CO-4017-BD-I/O-moduulista valitaan sisään- ja ulostulojen polariteetti juottamalla nasta CF3 jumpperista JP4. Järjestelmässä oletuksena käytetään ylhäällä aktiivista konfigurointia, jolloin jumpperi juotetaan kiinni. CO-4011-BD-I/O-moduulista sisään- ja ulostulojen polariteetti valitaan CAN-väylän yli lähetettävällä SDO-viestillä.

Moduulien NODE-ID valitaan jumppereista JP1 ja JP3 alla olevan taulukon 8 mukaan.

Taulukko 8. NODE-ID konfigurointitaulukko [21, s. 6].

ID6	ID5	ID4	ID3	ID2	ID1	ID0	CAN-Identifler
1	1	1	1	1	1	1	Programmable ID
1	1	1	1	1	1	0	1 = 0x01
1	1	1	1	1	0	1	2 = 0x02
1	1	1	1	1	0	0	3 = 0x03
1	1	1	1	0	1	1	4 = 0x04
			....				....
1	0	0	0	0	0	0	63 = 0x3F
0	1	1	1	1	1	1	64 = 0x40
0	1	1	1	1	1	0	65 = 0x41
			....				....
0	0	0	0	0	1	0	125 = 0x7C
0	0	0	0	0	0	1	126 = 0x7E
0	0	0	0	0	0	0	127 = 0x7F

NODE-ID noudattaa logiikkaa jossa 127:stä vähennetään ykköstilassa olevia jumppereita vastaavien binäärilukujen summa (ID0 = 1, ID1 = 2 ID2 = 4 jne.).

CO-4011-BD-I/O-moduulin toimintatila valitaan alla olevan taulukon 9 mukaan.

Taulukko 9. Frenzel+Berg CO-4011-BD-I/O-moduulin konfigurointi [21, s. 6].

CF				Mode	Description
3	2	1	0		
1	1	1	1	0	20 digital In / 12 dig. Out
1	1	1	0	1 *2)	12 dig. In / 12 dig. Out. 8 analog In 8 bit
1	1	0	1	2	16 dig. In / 12 dig. Out. 4 analog In 16 bit
1	1	0	0	3	reserved *1)
1	0	1	1	4	12 digital In / 20 dig. Out
1	0	1	0	5 *2)	4 dig. In / 20 dig. Out. 8 analog In 8 bit
1	0	0	1	6	8 dig. In / 20 dig. Out. 4 analog In 16 bit
1	0	0	0	7	reserved *1)
0	x	x	X		reserved *1)

Piirilevyllä on mahdollista käyttää kaikkia mahdollisia toimintatiloja (MODE), mutta korisähköjärjestelmässä käytetään oletuksena vain toimintatiloja 1 ja 5 mahdollisten konfigurointimahdollisuuksien ja siitä seuraavan uudelleenohjelmoinnin vähentämiseksi.

Piirilevyllä on jumbpereilla asetettavia ominaisuuksia, jotka on esitelty taulukossa 10.

Taulukko 10. Piirilevyn jumbperit ja niiden selitteet

Jumbperi	Toiminto	Huom
<b>EN1</b>	Toimilaitteiden virransyötön herätteen ohitus	Kiinni = heräte aina päällä
<b>EN2</b>	Moduulien virransyötön herätteen ohitus	Kiinni = heräte aina päällä
<b>CAN_TERM</b>	CAN -väylän 120 ohmin terminointi	Kiinni = terminointi päällä
<b>DIR</b>	FB4011 DIO pinnien puskurin suunnanvalinta	Kiinni = pinnit sisääntuloja, suunta oltava sama kuin moduulin suunta,
<b>JP5</b>	FB4017 sisääntulojen vastusten vetosuunta	PD = Alasveto, PU = Ylös veto
<b>2.J1</b>	FB4017 DO 8-11 & PWM 4-7 käyttöjännitteen valinta	5 = 5,4 V, 12 = 12 V
<b>2.J2</b>	FB4017 DIO 0-3 & PWM 0-3 käyttöjännitteen valinta	5 = 5,4 V, 12 = 12 V
<b>7.J1</b>	FB4011 DO 6 - 11 käyttöjännitteen valinta	5 = 5,4 V, 12 = 12 V
<b>7.J2</b>	FB4011 DO 0 - 5 käyttöjännitteen valinta	5 = 5,4 V, 12 = 12 V

Jumbperilla EN1 voidaan ohittaa toimilaitteiden virransyötön heräte, jolloin CO-4011-BD- ja CO-4017-BD-I/O-moduuleihin liittyvät oheispiirit saavat aina käyttöjännitteen kun piirilevyn sisääntuloon on kytketty käyttöjännite. Muutoin toimilaitteiden heräte on



kytketty CO-4017-BD-I/O-moduulin ulostulopinniin DIO3. Vastaavasti jumpperilla EN2 voidaan moduulien virransyötön heräte ohittaa, jolloin I/O-moduulit saavat käyttöjännitteen aina kun levyn sisääntuloon on kytketty käyttöjännite. Jumpperit EN1 ja EN2 on tarkoitettu käytettäväksi testausvaiheessa ja vianhaun yhteydessä.

Jumpperilla CAN\_TERM voidaan kytkeä CAN-verkon 120 ohmin päätevastus päälle. Päätevastus on toteutettu kahdella 60 ohmin 1206-kantaisella vastuksella, jotka on juotettu sarjaan. Lisäksi vastusten väliin on kytketty häiriöiden vaimentamiseksi ja aaltomuodon siistimiseksi 10 nanofaradin kondensaattori [1, s. 3]. Päätevastukset kytketään päälle etumaisesta ja takimmaisesta kytkentärasiasista jolloin ne sijaitsevat verkon päissä.

DIR-jumpperilla valitaan CO-4011-BD-I/O-moduulin sisään-ulostulopinnien puskurin suunta. Suunta on valittava samaksi kuin I/O-moduulin konfigurointi. Väärä suunta saattaa vikaannuttaa moduulin.

Jumpperilla JP5 on mahdollista valita CO-4017-BD-I/O-moduulin vetovastusten suunta joko ylös- tai alavetovastuksiksi. Oletuksena käytetään alavetovastuksia.

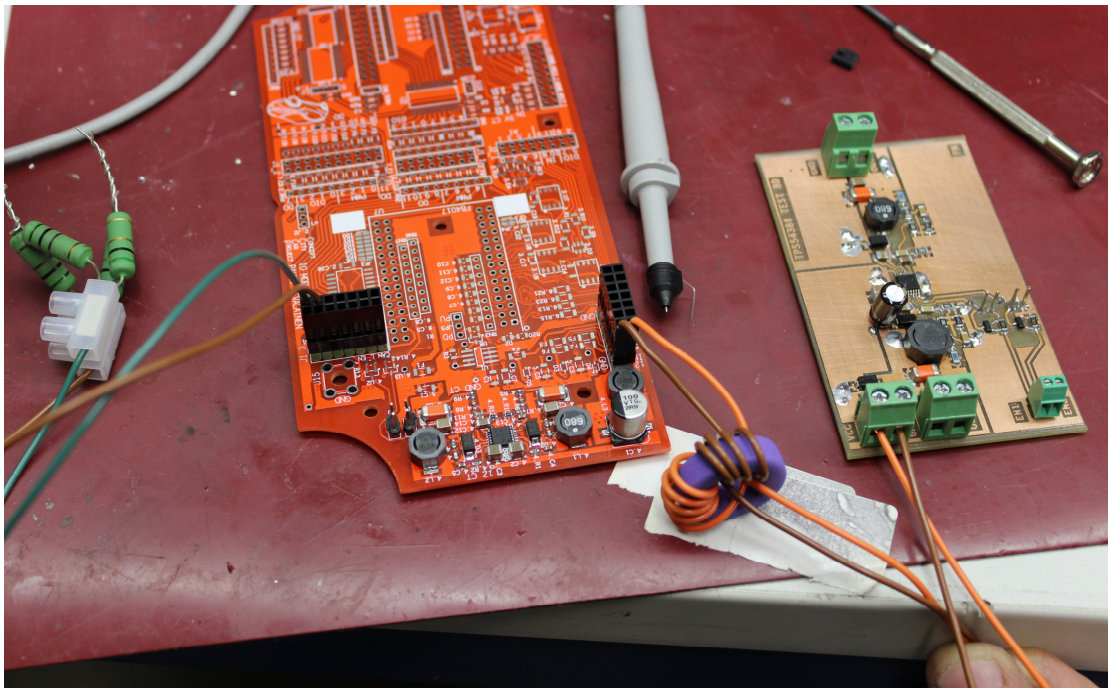
Jumppereilla 2.J1, 2.J2, 7.J1 ja 7.J2 valitaan digitaalisten ulostulojen puskurien käyttöjännitteet 5,4 V:n ja 12 V:n väliltä. Käyttämättömien puskurien jumpperit voidaan ottaa irti.

## 6.5 Piirilevyn testaus ja tulokset

Mittauksia tehtiin ennen piirilevysuunnittelua virtalähteen (Kuva 14) ja analogiatulojen osalta. Näiden pohjalta tehtiin korjauksia piirilevyyn. Myös tulojen ja lähtöjen suojaukset testattiin, mutta niistä ei tehty oskilloskooppimittauksia raporttiin, vaan todettiin suojaus joko toimivaksi tai ei. Piirilevylle päätyneet suojaukset on todettu toimiviksi. Aika näyttää, saako viisas insinööri suojattavat piirit rikottua – todennäköisesti saa. Todelliset käytännön testit alkavat insinööriyön päättyessä, kun kytkentärasioita sijoitetaan autoon ja toimilaitteita lisätään.

Piirilevyt saapuivat valmistajalta hieman ennen insinööriyön palautusta, joten testaaminen ja varsinkin kenttätestaaminen jäi melko pintaluontoiseksi. Levyt todettiin toimiviksi eikä vakavia virheitä löydetty.

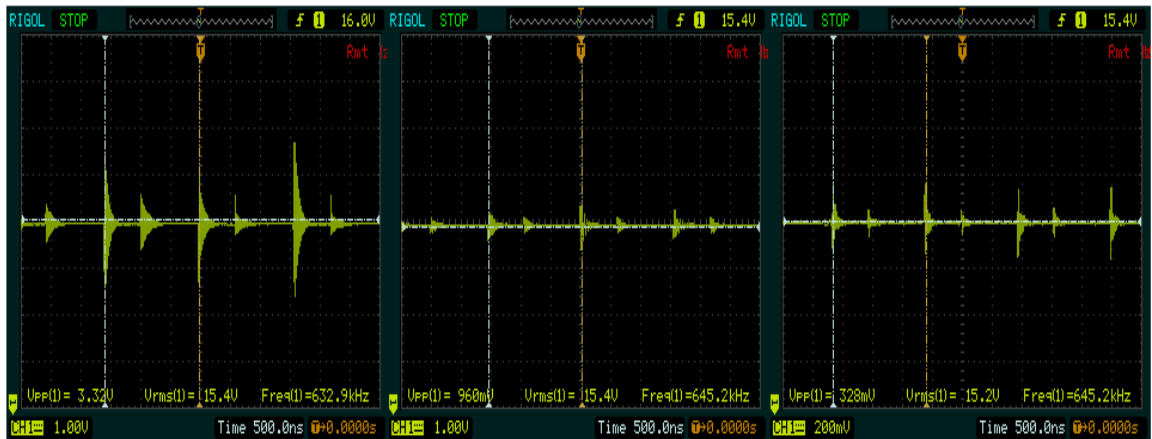
Piirilevyn tarkastus- ja kokoamisvaiheessa huomattiin seuraavat virheet piirilevyllä: CO-4011-BD-moduulin digitaaliulostulopinnien tekstit ”8” ja ”10” ovat menneet silkkitekstissä keskenään sekaisin ja transienttisuojadiodin 3.D3 silkkitekstistä puuttuu ykköspinnan merkintä. Muuten merkinnät piirilevyllä pitävät paikkansa.



Kuva 14. Virtalähteen testausjärjestely. Virtalähteenä toimi Mascotin valmistama säädettävä virtalähde.

### 6.5.1 Virtalähde

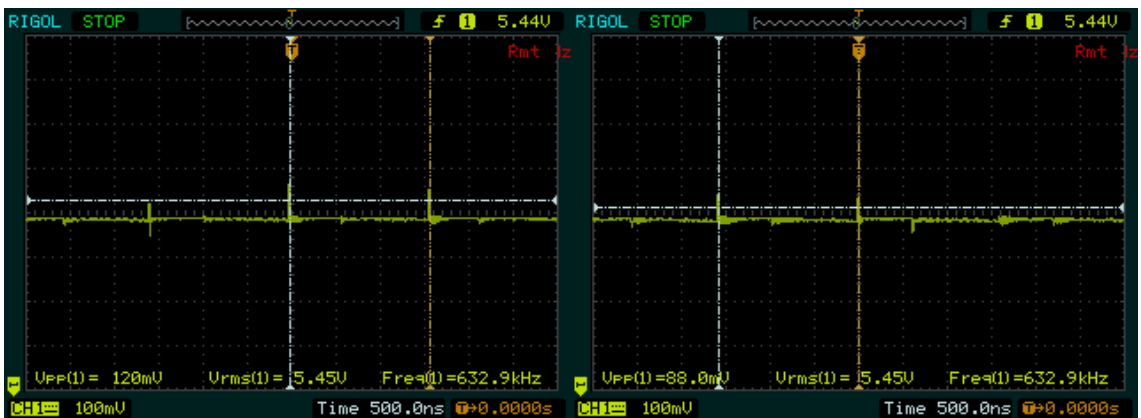
Ensimmäisen piirilevyn kasausvaiheessa testattiin aluksi virtalähteen toiminta ennen muiden piirien juottamista. Hakkurista mitattiin ulos- ja sisääntulohäiriöt oskilloskoopilla. Sisääntulon häiriöt mitattiin yhden ampeerin virralla ja sitä verrattiin testilevystä saatuun tulokseen samalla virralla (Kuva 15).



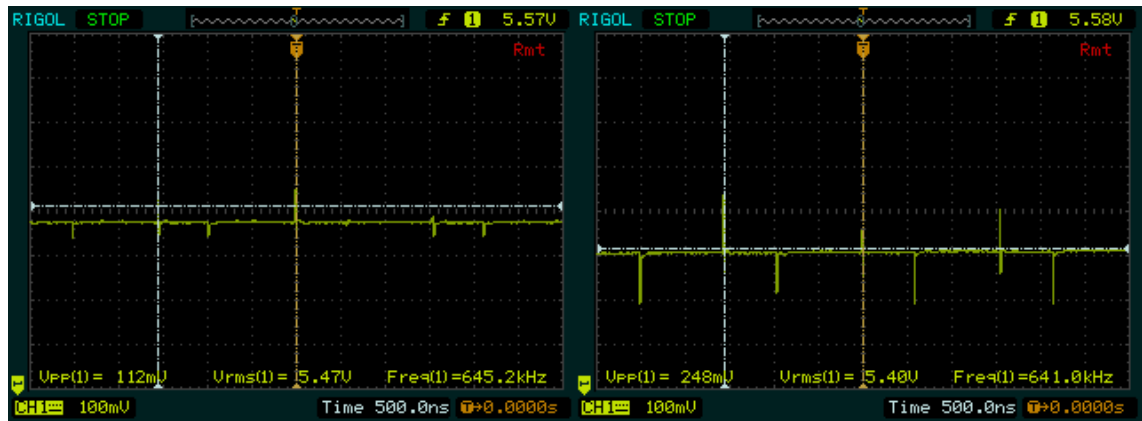
Kuva 15. Sisääntulon häiriömittaus. Vasemmalta oikealle: testilevy, suunniteltu piirilevy lisätyn sisääntulokelan takaa ja suunniteltu piirilevy johtoon lisätyn ferriitin takaa. (Huom. viimeisen kuvan pystyakseli pienemmällä skaalalla.)

Tuloksista huomataan, että virtalähteelle näkyvä häiriö on vähentynyt noin kymmenesosaan testilevyn häiriöstä. 10  $\mu$ H:n sisääntulokela suodattaa hakkurin aiheuttaman kytkentähäiriöt noin kolmasosaan ja ferriitti vähentää häiriötä vastaavalla suhteella.

Ulostulohäiriöt mitattiin toimilaitteita ajavasta kanavasta 1 500:n ja 1000 milliampeerin virroilla testilevystä (Kuva 16) ja suunnitellusta piirilevystä (Kuva 17).



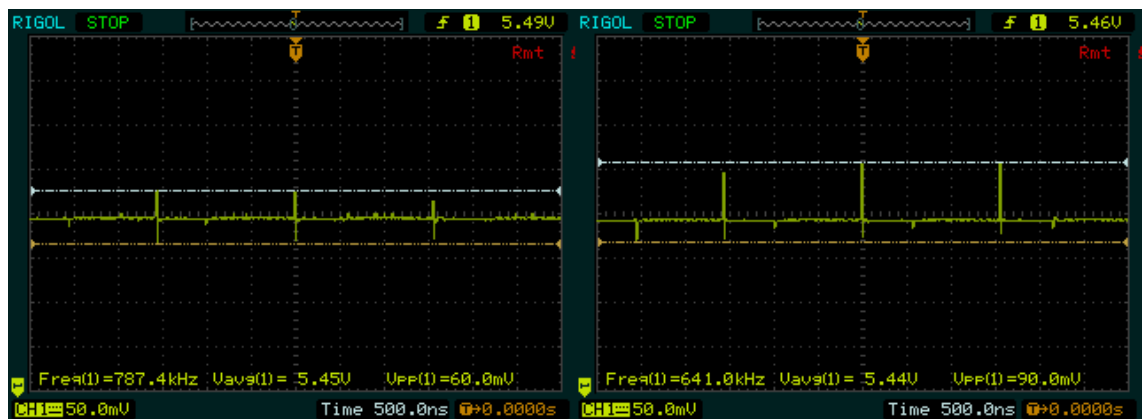
Kuva 16. Testilevyn ulostulosta mitatut häiriöt 500 ja 1000 mA virroilla.



Kuva 17. Suunnitellusta piirilevystä mitatut ulostulon häiriöt hakkurin kanavasta yksi 500:n ja 1000 mA:n virroilla.

Molemmassa mittauksissa ulostulon komponenttiarvot ovat samat (luku 6.2), mutta komponenttien sijoittelu ja kotelokoot ovat eri. Valmiin piirilevyn jännite on tasaisempaa, mutta hakkurin kytkentähäiriöt näkyvät selkeämmin. Sisääntuloon lisätyt suodatuskomponentit saattavat vaikuttaa ulostulojännitteen eroihin, mutta kummassakin tapauksessa jännitettä voidaan pitää riittävän siistinä.

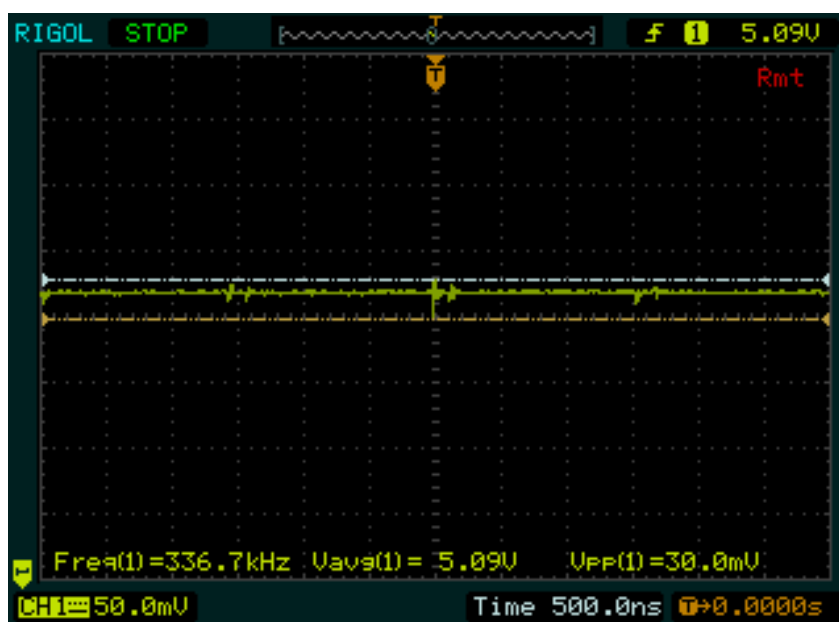
Myös I/O-moduuleja syöttävän kanavan 2 ulostulohäiriöt mitattiin (Kuva 18). Mittaukset toteutettiin 250:n ja 500 milliampeerin virroilla.



Kuva 18. Suunnitellusta piirilevystä mitatut ulostulon häiriöt hakkurin kanavasta kaksi 250:n ja 500 mA:n virroilla.

Kanavan 2 häiriöt ovat samankaltaiset kanavaan 1 verrattuna, mutta amplitudiltaan hieman pienemmät. Jännitettä voidaan pitää riittävän siistinä.

Myös lineaariregulaattorin häiriöjännitteet mitattiin (Kuva 19).

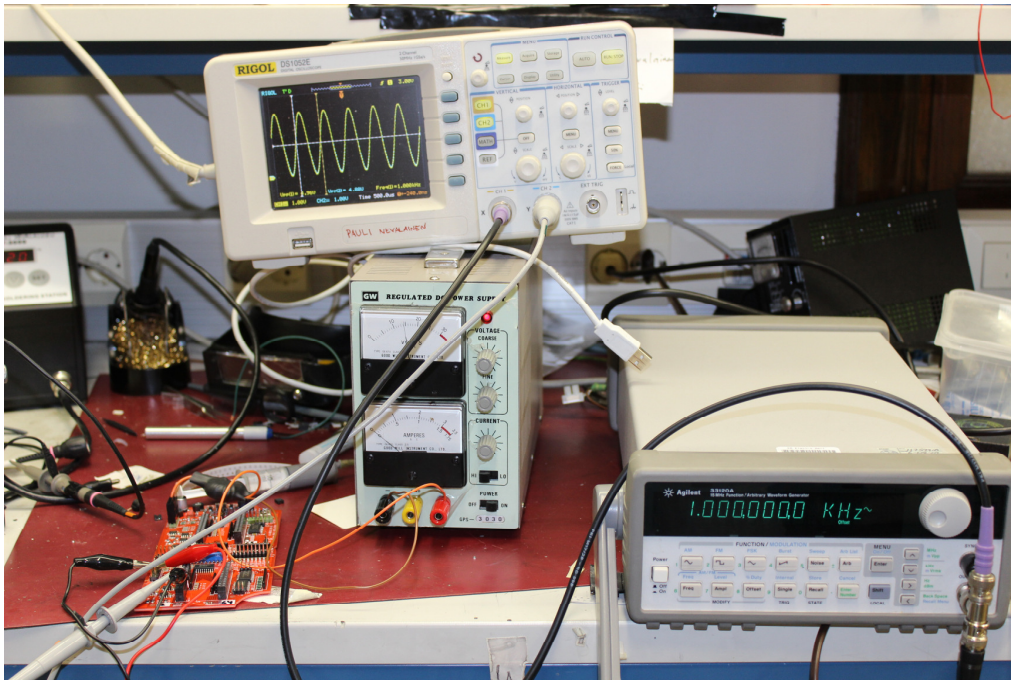


Kuva 19. Lineaariregulaattorin ulostulosta mitattu häiriö.

Lineaariregulaattorin häiriöjännitteen amplitudi on jo sen verran pieni, että jännitettä voidaan pitää I/O-moduuleille ja antureille riittävän hyvänä.

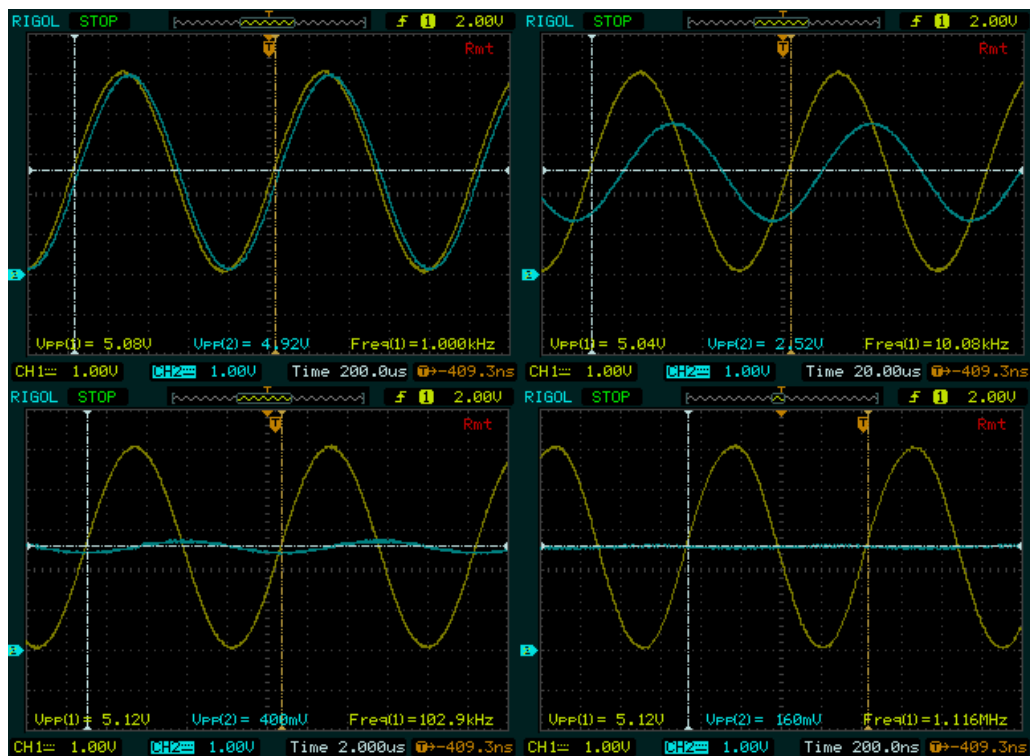
### 6.5.2 Analogiatulojen mittaukset

Analogiatuloihin suunniteltiin testilevyssä ensimmäisen asteen RC-alipäästösuodatin jonka rajataajuus on 5800 Hz. Testausjärjestely näkyy kuvassa 20. Testilevyn aaltomuoto taajuuden funktiona näkyy kuvassa 21.



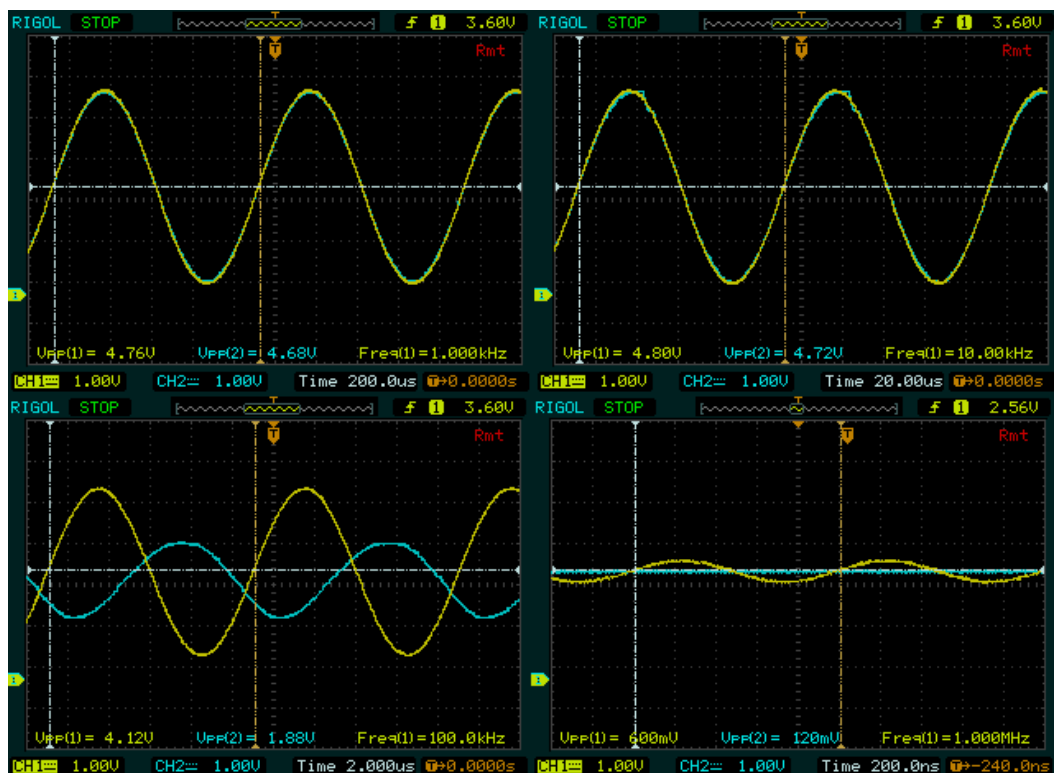
Kuva 20. Testijärjestely.

Funktiogeneraattori on kytketty suoraan oskilloskoopin tuloon 1 ja suodattimen tuloon. Suodattimen lähtö on kytketty oskilloskoopin tuloon 2.



Kuva 21. Testilevyllä mitatut analogiatulon aaltomuodot.

Mittauksen perusteella rajataajuutta oli tarkoitus laskea kasvattamalla sisääntulokondensaattorin arvoa, ja myös ulostulon puolelle lisättiin 33 nF:n kondensaattori mahdollisten suuritaajuuksisten häiriöiden poistamiseksi. Suunniteltua piirilevyä testatessa kuitenkin huomattiin, että ensimmäisen asteen RC-suodattimen kondensaattori on päätenyt kytkentäkaavioon ennen sisääntulovastusta. Tämä aiheuttaa sen, että ensimmäisen asteen suodattimen rajataajuus riippuu täysin signaalia syöttävän laitteen ulostuloimpedanssista. Funktiogeneraattorin ulostulon impedanssi on  $50 \Omega$ , joten ensimmäisen asteenrajataajuus nousee melko korkeaksi 10 nanofaradin sisääntulokondensaattorilla. Antureiden ulostuloimpedanssi on yleensä korkeampi, joten rajataajuuskin laskee. Mikäli rajataajuutta halutaan säätää alemmaksi, tulee signaalijohtoon lisätä sarjavastus. Operaatiovahvistimen ulostuloimpedanssi on myös  $50 \Omega$ , joten ulostulokondensaattoreiden arvoksi mitoitettiin 33 nF, jotta toisen asteen rajataajuutta saadaan hieman alemmaksi. Mittauksen tulokset näkyvät kuvassa 22.

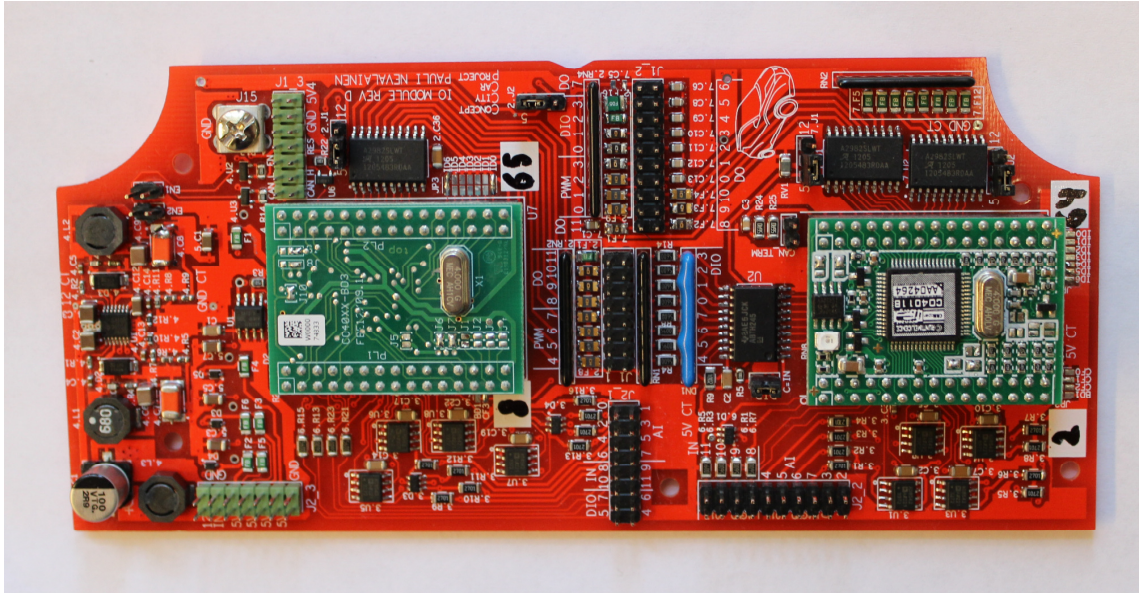


Kuva 22. Suunnitellulta levytä mitatut analogiatulon aaltomuodot.

Koska sisääntulokondensaattorit ovat ennen sisääntulon sarjavastusta, näkyy aaltomuodon ensimmäisen asteen suodatus suoraan funktiogeneraattorin lähdeissä. Toisen asteen suodatus näkyy kanavassa kaksi. Suodatus ei tällaisenaan ole riittävä,

mikäli signaalia lähettävän laitteen ulostuloimpedanssi on pieni kuten funktiogeneraattorissa. Tällöin tulee signaalijohtoon lisätä sarjavastus, jotta signaali saadaan suodatettua.

Alla on kuva kasatusta piirilevystä (Kuva 23).



Kuva 23. Koottu piirilevy.

Levyn kokoamisvaiheessa kävi sellainen vahinko, että 200 milliampeerin PTC-sulakkeet pääsivät loppumaan kuten niitä korvaamaan juotetut 100 milliampeerin PTC-sulakkeetkin, joten levyllä on myös yksi 50 milliampeerin PTC-sulake (kuvassa keskellä ylhäällä).

## 7 Yhteenveto ja päätelmät

Insinööriyössä suunniteltiin korisähköjärjestelmän runko niin ohjelman kuin ohjattavan I/O-piirilevynkin osalta. Testausvaiheessa jouduttiin ohjelmakoodia hieman muokkaamaan, jotta toiminta olisi haluttua. Myös piirilevyn komponenttitarvoja jouduttiin muokkaamaan, jotta saatiin mm. PWM-lähdöstä oikeanlainen aaltomuoto. Tulokset varmistettiin mittaamalla ja olemassa olevassa testiseinässä testaamalla. Järjestelmä saatiin toimimaan halutulla tavalla, ja uusien toimilaitteiden lisääminen on vaivatonta. Tehdyt testit ja mittaukset onnistuivat hyvin siinä määrin kuin niitä ehdittiin toteuttaa. Suuria ongelmia järjestelmästä ei löydetty, eikä niitä ole odotettavissa.



Pieniä ongelmia sen sijaan oli pitkin suunnitteluprosessia. Epec päivitti 2024-ohjainlaitteen ohjelmakirjastot ja laiteohjelmiston puolivälissä projektia. Niitä haluttiin käyttää, koska ne olivat paljon paremmin toteutetut ja dokumentoidut kuin vanhat. Näin ohjelman perusrungon toteutus jouduttiin aloittamaan käytännössä alusta. 2024-ohjainlaite on toiminut moitteetta, mutta se vaatii 24 V:n virransyötön.

Piirilevysuunnittelussa oli pieniä ongelmia tilankäytön kanssa eikä aivan kaikkia haluttuja ominaisuuksia voitu toteuttaa täydessä laajuudessa. Myös kytkentään tuli virhe analogiatulojen osalta kun sisääntulokondensaattori sijoitettiin ennen sisääntulovastusta, jolloin suunniteltu alipäästösuodatin ei toiminut suunnitellulla tavalla. Piirilevyn silkkitekstiin tuli myös muutama pieni virhe.

CANopen-protokollaperheen käyttämistä voidaan pitää onnistuneena ratkaisuna ajoneuvokäytössä, sillä se on robusti protokolla, joka mahdollistaa kaikkien laitteiden tilan valvonnan luotettavasti. Lisäksi standardimuotoiset viestit helpottavat käyttöönottoa, sillä kaikki viestien lukemiseen ja lähettämiseen tarvittavat tiedot löytyvät helposti.

Jatkokehitystä voisi toteuttaa korvaamalla toisen tai molemmat I/O-moduulit esimerkiksi at90can128-mikrokontrollerilla toteutetuksi ohjainpiiriksi. Tällöin saadaan suoraan geneerinen CAN ohjainlaite, jolla on helpompi toteuttaa reaaliaikaisia säätöjä, sillä siihen saa ohjelmoitua suoraan suorittavaa koodia. At90can128 tukee myös CanFestival CANopen-protokollaperhettä, jolloin siihen voidaan ohjelmoida suoraan nykyisen I/O-moduulin tilalle sopiva CANopen-I/O-moduuli, joka voi sisältää myös suorittavaa koodia.

## Lähteet

- 1 Saha, Heikki. 2005. CAN-väylä. Verkkoartikkeli. FLUID Finland 5-2005. <<http://www.canopen.fi/artikkelit/CAN.pdf>>. Luettu 17.4.2013.
- 2 Pfeiffer, O., Ayre, A., & Keydel, C. 2003. Embedded Networking with CAN and CANopen. San Clemente: RTC Books.
- 3 Saha, Heikki. 2006. CANopen perusteet. Verkkoartikkeli. FLUID Finland 1-2006. <<http://www.canopen.fi/artikkelit/CANopen.pdf>>. Luettu 17.4.2013.
- 4 Epec MultiTool User Manual. MultiTool-ohjelman ohje. Epec Oy. Päivitetty 10.10.2012.
- 5 John, K-H., Tiegelkamp, M. 2001. IEC-61131-3: Programming Industrial Automation Systems. Berlin: Springer-Verlag.
- 6 Suhonen, Leo. 2011. IFM-näytön sovittaminen CAN-väylällä dieselmoottoriin Codesys-kehitysympäristön avulla. Opinnäytetyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu.
- 7 Epec Programming and Libraries Manual. Ohjelmointiopas. Epec Oy. <<http://epec.planeetta.com>>. Päivitetty 21.12.2012. Luettu 19.4.2013.
- 8 MCP1824 Datasheet. 2007. Datalehti. Microchip Technology Inc. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22070a.pdf>>. Luettu 10.4.2013
- 9 CO4011B-FL. 2007. Datalehti. Frenzel + Berg electronic GmbH & Co. <[http://www.frenzel-berg.com/fileadmin/FrenzelBerg/Datenblaetter/CANopen\\_Chip/ds\\_co4011b\\_v141r160\\_dt.pdf](http://www.frenzel-berg.com/fileadmin/FrenzelBerg/Datenblaetter/CANopen_Chip/ds_co4011b_v141r160_dt.pdf)>. Luettu 10.4.2013.
- 10 CO4017A-FL. 2012. Datalehti. Frenzel + Berg electronic GmbH & Co. <[http://www.frenzel-berg.com/fileadmin/FrenzelBerg/Datenblaetter/CANopen\\_Chip/ds\\_co4017a\\_v1720r02\\_en.pdf](http://www.frenzel-berg.com/fileadmin/FrenzelBerg/Datenblaetter/CANopen_Chip/ds_co4017a_v1720r02_en.pdf)>.
- 11 Glass Encapsulated SMD Varistor MLV . Datalehti. AVX. <<http://www.farnell.com/datasheets/1480011.pdf>>. Luettu 8.4.2013.
- 12 Canfield, John. 2013. 2.7 to 40 V Monolithic Buck-Boost DC/DC Expands Input Capabilities, Regulates Seamlessly through Automotive Cold-Crank and Load-Dump Transients. LT Journal of Analog Innovation. Tammikuu 2013, s. 9-16.

- 13 SLUS774B. 2007. Datalehti. Texas Instruments.  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54386.pdf>>. Luettu 8.4.2013.
- 14 Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage. 2012. Application Report. Texas Instruments. <<http://www.ti.com/lit/an/slva477a/slva477a.pdf>>. Luettu 8.4.2013.
- 15 SRU8043 Series - Shielded SMD Power Inductors. 2003. Datalehti. Bourns.  
<<http://www.farnell.com/datasheets/70887.pdf>>. Luettu 8.4.2013.
- 16 Aluminum Electrolytic Capacitors/TG. 2011. Datalehti. Panasonic.  
<<http://www.farnell.com/datasheets/1521266.pdf>>. Luettu 8.4.2013.
- 17 Electrical Characteristics Data. 2005. Datalehti. Murata Manufacturing Co., Ltd. <  
<http://www.farnell.com/datasheets/415302.pdf>>. Luettu 8.4.2013.
- 18 C3225X7R1E106K250AC Characterization sheet. 2012. Datalehti. TDK.  
<<http://product.tdk.com/capacitor/mlcc/en/documents/C3225X7R1E106K250AC.pdf>>. Luettu 8.4.2013
- 19 594D Datasheet. 2013. Datalehti. Vishay Sprague,  
<<http://www.vishay.com/docs/40006/594d.pdf>>. Luettu 8.4.2013.
- 20 B220/A - B260/A. 2012. Datalehti. Diodes Incorporated.  
<<http://www.diodes.com/datasheets/ds13004.pdf>>. Luettu 8.4.2013.
- 21 CO4011B-FL. 2007. Datalehti. Frenzel + Berg electronic GmbH & Co.  
<[http://www.frenzel-berg.com/fileadmin/FrenzelBerg/Datenblaetter/CANopen\\_Chip/ds\\_co4011b\\_v141r160\\_dt.pdf](http://www.frenzel-berg.com/fileadmin/FrenzelBerg/Datenblaetter/CANopen_Chip/ds_co4011b_v141r160_dt.pdf)>. Luettu 8.4.2013.
- 22 AD8541/AD8542/AD8544. Datalehti. Analog Devices Inc.  
<[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8541\\_8542\\_8544.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8541_8542_8544.pdf)>. Luettu 8.4.2013.
- 23 A2982. 2012. Datalehti. Allegro MicroSystems, Inc.  
<<http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A2981-2-Datasheet.ashx>>. Luettu 8.4.2013
- 24 Resettable Fuse. 2012. Datalehti. Multicomp.  
<<http://www.farnell.com/datasheets/1678471.pdf>>. Luettu 8.4.2013
- 25 SCBS663D. 1999. Datalehti. Texas Instruments.  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54abth245.pdf>>. Luettu 8.4.2013.

## Materiaaliluettelo

Alla on lista suunnitellussa I/O-moduulien piirilevyssä käytetyistä komponenteista. Komponenttien nimeäminen noudattaa käytäntöä, jossa jokaisen komponentin referenssin alku viittaa siihen kytkentäkaavion schematic-blokkiin, mihin se on sijoitettu. Jos alku on tyhjä, se viittaa ensimmäiseen kytkentäkaavion sivuun.

Taulukko 11. Suunnitellun piirilevyn materiaalilista.

Item Number	Part Reference	Value	Description / PCB Footprint
1	2.C1	100p	Ceramic capacitor 0805
2	2.C2	100p	Ceramic capacitor 0805
3	2.C3	100p	Ceramic capacitor 0805
4	2.C4	100p	Ceramic capacitor 0805
5	2.C5	100p	Ceramic capacitor 0805
6	2.C6	100p	Ceramic capacitor 0805
7	2.C7	100p	Ceramic capacitor 0805
8	2.C8	100p	Ceramic capacitor 0805
9	2.C9	100p	Ceramic capacitor 0805
10	2.C10	100p	Ceramic capacitor 0805
11	2.C11	100p	Ceramic capacitor 0805
12	2.C12	100p	Ceramic capacitor 0805
13	2.C13	100p	Ceramic capacitor 0805
14	2.C14	100p	Ceramic capacitor 0805
15	2.C15	100p	Ceramic capacitor 0805
16	2.C16	100p	Ceramic capacitor 0805
17	2.C36	100n	Ceramic capacitor 1206
18	2.C37	100n	Ceramic capacitor 1206
19	2.F1	200m	PTC fuse 1206
20	2.F2	200m	PTC fuse 1206
21	2.F3	200m	PTC fuse 1206
22	2.F4	200m	PTC fuse 1206
23	2.F5	200m	PTC fuse 1206
24	2.F6	200m	PTC fuse 1206
25	2.F7	200m	PTC fuse 1206
26	2.F8	200m	PTC fuse 1206
27	2.F9	200m	PTC fuse 1206
28	2.F10	200m	PTC fuse 1206
29	2.F11	200m	PTC fuse 1206
30	2.F12	200m	PTC fuse 1206
31	2.F13	200m	PTC fuse 1206
32	2.F14	200m	PTC fuse 1206
33	2.F15	200m	PTC fuse 1206
34	2.F16	200m	PTC fuse 1206
35	2.J1	HEADER 3	2,54 mm 3 p header
36	2.J2	HEADER 3	2,54 mm 3 p header
37	2.RN2	ResNW8 15k	2,54 mm resistor network 8 parallel

38	2.RN4	ResNW8 15k	2,54 mm resistor network 8 parallel
39	2.U1	A-2981	Source Driver SOIC-20W
40	2.U2	A-2981	Source Driver SOIC-20W
41	3.C1	10n	Ceramic capacitor 0805
42	3.C2	100n	Ceramic capacitor 1206
43	3.C3	10n	Ceramic capacitor 0805
44	3.C4	10n	Ceramic capacitor 0805
45	3.C5	100n	Ceramic capacitor 1206
46	3.C6	10n	Ceramic capacitor 0805
47	3.C7	100n	Ceramic capacitor 1206
48	3.C8	10n	Ceramic capacitor 0805
49	3.C9	10n	Ceramic capacitor 0805
50	3.C10	100n	Ceramic capacitor 1206
51	3.C11	10n	Ceramic capacitor 0805
52	3.C12	10n	Ceramic capacitor 0805
53	3.C13	10n	Ceramic capacitor 0805
54	3.C14	100n	Ceramic capacitor 1206
55	3.C15	10n	Ceramic capacitor 0805
56	3.C16	10n	Ceramic capacitor 0805
57	3.C17	100n	Ceramic capacitor 1206
58	3.C18	10n	Ceramic capacitor 0805
59	3.C19	100n	Ceramic capacitor 1206
60	3.C20	10n	Ceramic capacitor 0805
61	3.C21	10n	Ceramic capacitor 0805
62	3.C22	100n	Ceramic capacitor 1206
63	3.C23	10n	Ceramic capacitor 0805
64	3.C24	10n	Ceramic capacitor 0805
65	3.C25	33n	Ceramic capacitor 0603
66	3.C26	33n	Ceramic capacitor 0603
67	3.C27	33n	Ceramic capacitor 0603
68	3.C28	33n	Ceramic capacitor 0603
69	3.C29	33n	Ceramic capacitor 0603
70	3.C30	33n	Ceramic capacitor 0603
71	3.C31	33n	Ceramic capacitor 0603
72	3.C32	33n	Ceramic capacitor 0603
73	3.C33	33n	Ceramic capacitor 0603
74	3.C34	33n	Ceramic capacitor 0603
75	3.C35	33n	Ceramic capacitor 0603
76	3.C36	33n	Ceramic capacitor 0603
77	3.C37	33n	Ceramic capacitor 0603
78	3.C38	33n	Ceramic capacitor 0603
79	3.C39	33n	Ceramic capacitor 0603
80	3.C40	33n	Ceramic capacitor 0603
81	3.D1	SP724	Transient protection diode SOT23-6
82	3.D2	SP724	Transient protection diode SOT23-6
83	3.D3	SP724	Transient protection diode SOT23-6
84	3.D4	SP724	Transient protection diode SOT23-6
85	3.R1	2.7k	Resistor 1206
86	3.R2	2.7k	Resistor 1206
87	3.R3	2.7k	Resistor 1206
88	3.R4	2.7k	Resistor 1206
89	3.R5	2.7k	Resistor 1206

90	3.R6	2.7k	Resistor 1206
91	3.R7	2.7k	Resistor 1206
92	3.R8	2.7k	Resistor 1206
93	3.R9	2.7k	Resistor 1206
94	3.R10	2.7k	Resistor 1206
95	3.R11	2.7k	Resistor 1206
96	3.R12	2.7k	Resistor 1206
97	3.R13	2.7k	Resistor 1206
98	3.R14	2.7k	Resistor 1206
99	3.R15	2.7k	Resistor 1206
100	3.R16	2.7k	Resistor 1206
101	3.U1	AD8542	Operational amplifier SO-8
102	3.U2	AD8542	Operational amplifier SO-8
103	3.U3	AD8542	Operational amplifier SO-8
104	3.U4	AD8542	Operational amplifier SO-8
105	3.U5	AD8542	Operational amplifier SO-8
106	3.U6	AD8542	Operational amplifier SO-8
107	3.U7	AD8542	Operational amplifier SO-8
108	3.U8	AD8542	Operational amplifier SO-8
109	4.C1	100u	SMD electrolytic capacitor F-CASE
110	4.C2	10u	Ceramic capacitor 1210
111	4.C3	10u	Ceramic capacitor 1210
112	4.C4	0.047u	Ceramic capacitor 0603
113	4.C5	0.047u	Ceramic capacitor 0603
114	4.C6	10u	Ceramic capacitor 1210
115	4.C7	47u	Tantalum capacitor CASE-C
116	4.C8	47u	Tantalum capacitor CASE-C
117	4.C9	10u	Ceramic capacitor 1210
118	4.C10	470p	Ceramic capacitor 0603
119	4.C11	470p	Ceramic capacitor 0603
120	4.C12	4.7u	Ceramic capacitor 1206
121	4.C13	33n	Ceramic capacitor 0603
122	4.C14	33n	Ceramic capacitor 0603
123	4.C15	470p	Ceramic capacitor 0603
124	4.D1	B240/A	Schottky diode SMA
125	4.D2	B240/A	Schottky diode SMA
126	4.D3	B240/A	Schottky diode SMA
127	4.L1	100u	Inductor SRU8043 Series
128	4.L2	68u	Inductor SRU8043 Series
129	4.L3	10u	Inductor SRU8043 Series
130	4.R1	3	Resistor 0603
131	4.R2	3	Resistor 0603
132	4.R3	10	Resistor 0603
133	4.R4	10	Resistor 0603
134	4.R5	390	Resistor 0603
135	4.R6	10k	Resistor 0603
136	4.R7	1.8k	Resistor 0603
137	4.R8	10k	Resistor 0603
138	4.R9	390	Resistor 0603
139	4.R10	1.54K	Resistor 0603
140	4.R11	1.8k	Resistor 0603
141	4.R12	1.54K	Resistor 0603

142	4.R13	100k	Resistor 0805
143	4.R14	100k	Resistor 0805
144	4.R15	10	Resistor 0603
145	4.RV1	14VAC	Resistor 1206
146	4.U1	TPS54386	Buck controller PowerPad-14
147	4.U2	Si2306DS	Logic level N-Channel Fet SOT23-3
148	4.U3	Si2306DS	Logic level N-Channel Fet SOT23-3
149	5.C1	4.7u	Ceramic capacitor 1206
150	5.C2	1u	Ceramic capacitor 1206
151	5.C3	4.7u	Ceramic capacitor 1206
152	5.C4	1u	Ceramic capacitor 1206
153	5.C5	4.7u	Ceramic capacitor 1206
154	5.C6	1u	Ceramic capacitor 1206
155	5.C7	4.7u	Ceramic capacitor 1206
156	5.C8	1u	Ceramic capacitor 1206
157	5.R1	100k	Resistor 0805
158	5.R2	100k	Resistor 0805
159	5.R3	100k	Resistor 0805
160	5.R4	100k	Resistor 0805
161	5.U1	MCP1824T	5V0 LDO SOT23-5
162	5.U2	MCP1824T	5V0 LDO SOT23-5
163	5.U3	MCP1824T	5V0 LDO SOT23-5
164	5.U4	MCP1824T	5V0 LDO SOT23-5
165	6.C1	100p	Ceramic capacitor 0805
166	6.C2	100p	Ceramic capacitor 0805
167	6.C3	100p	Ceramic capacitor 0805
168	6.C4	100p	Ceramic capacitor 0805
169	6.C5	100p	Ceramic capacitor 0805
170	6.C6	100p	Ceramic capacitor 0805
171	6.C7	100p	Ceramic capacitor 0805
172	6.C8	100p	Ceramic capacitor 0805
173	6.C9	100p	Ceramic capacitor 0805
174	6.C10	100p	Ceramic capacitor 0805
175	6.C11	100p	Ceramic capacitor 0805
176	6.C12	100p	Ceramic capacitor 0805
177	6.D1	SP724	Transient protection diode SOT23-6
178	6.D2	SP724	Transient protection diode SOT23-6
179	6.D3	SP724	Transient protection diode SOT23-6
180	6.R1	560	Resistor 1206
181	6.R3	560	Resistor 1206
182	6.R5	560	Resistor 1206
183	6.R7	560	Resistor 1206
184	6.R9	560	Resistor 1206
185	6.R11	560	Resistor 1206
186	6.R13	560	Resistor 1206
187	6.R15	560	Resistor 1206
188	6.R17	560	Resistor 1206
189	6.R19	560	Resistor 1206
190	6.R21	560	Resistor 1206
191	6.R23	560	Resistor 1206
192	7.C1	100p	Ceramic capacitor 0805
193	7.C2	100p	Ceramic capacitor 0805

194	7.C3	100p	Ceramic capacitor 0805
195	7.C4	100p	Ceramic capacitor 0805
196	7.C5	100p	Ceramic capacitor 0805
197	7.C6	100p	Ceramic capacitor 0805
198	7.C7	100n	Ceramic capacitor 1206
199	7.C8	100p	Ceramic capacitor 0805
200	7.C9	100p	Ceramic capacitor 0805
201	7.C10	100p	Ceramic capacitor 0805
202	7.C11	100p	Ceramic capacitor 0805
203	7.C12	100p	Ceramic capacitor 0805
204	7.C13	100p	Ceramic capacitor 0805
205	7.C14	100n	Ceramic capacitor 1206
206	7.F1	200m	PTC fuse 1206
207	7.F2	200m	PTC fuse 1206
208	7.F3	200m	PTC fuse 1206
209	7.F4	200m	PTC fuse 1206
210	7.F5	200m	PTC fuse 1206
211	7.F6	200m	PTC fuse 1206
212	7.F7	200m	PTC fuse 1206
213	7.F8	200m	PTC fuse 1206
214	7.F9	200m	PTC fuse 1206
215	7.F10	200m	PTC fuse 1206
216	7.F11	200m	PTC fuse 1206
217	7.F12	200m	PTC fuse 1206
218	7.J1	HEADER 3	2,54 mm 3 p header
219	7.J2	HEADER 3	2,54 mm 3 p header
220	7.U1	A-2981	Source Driver SOIC-20W
221	7.U2	A-2981	Source Driver SOIC-20W
222	C1	100n	Ceramic capacitor 1206
223	C2	100n	Ceramic capacitor 1206
224	C3	10n	Ceramic capacitor 0805
225	C4	10u	Tantalum capacitor CASE-B
226	C5	100n	Ceramic capacitor 1206
227	C6	10u	Tantalum capacitor CASE-B
228	C7	100n	Ceramic capacitor 1206
229	C8	100n	Ceramic capacitor 1206
230	C9	10u	Tantalum capacitor CASE-B
231	C10	10u	Tantalum capacitor CASE-B
232	C11	100n	Ceramic capacitor 1206
233	CAN_TERM	Jumper100x2	2,54 mm 2 p header
234	D2	LED	LED 0805
235	D3	PMEG2005AEA	Schottky diode SOD-323
236	D4	PMEG2005AEA	Schottky diode SOD-323
237	D5	PMEG2005AEA	Schottky diode SOD-323
238	DIR	Jumper100x2	2,54 mm 2 p header
239	DN1	Diode Network	2,54 diode network 8 parallel
240	EN1	Header100x2	2,54 mm 2 p header
241	EN2	Header100x2	2,54 mm 2 p header
242	F1	200m	PTC fuse 1206
243	F2	200m	PTC fuse 1206
244	F3	200m	PTC fuse 1206
245	F4	200m	PTC fuse 1206

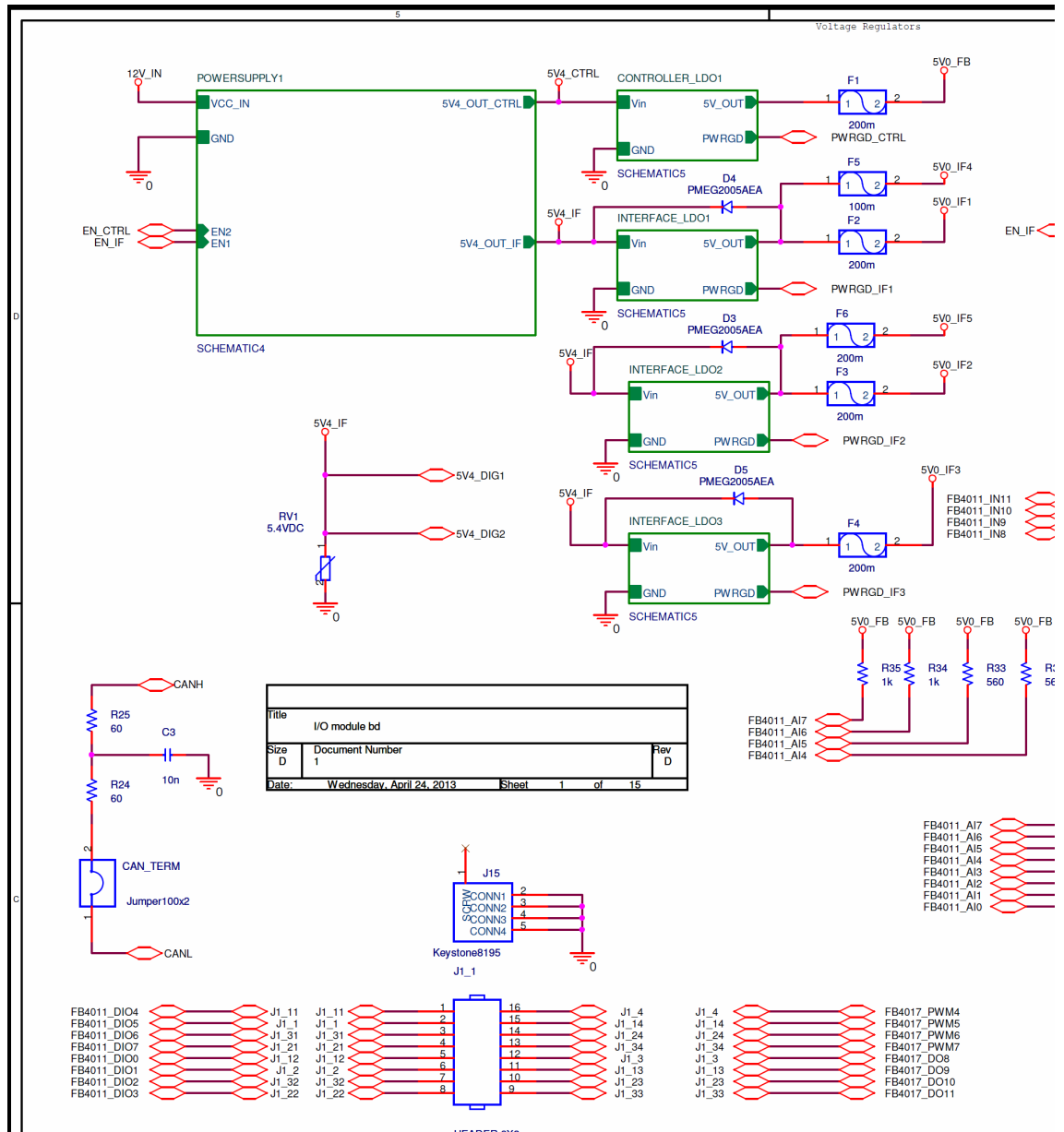


246	F5	200m	PTC fuse 1206
247	F6	200m	PTC fuse 1206
248	J15	Keystone8195	Screw terminal
249	J1_1	HEADER 8X2	2,54 mm 2X8 p header
250	J1_2	HEADER 10X2	2,54 mm 2X10 p header
251	J1_3	HEADER 7X2	2,54 mm 2X7 p header
252	J2_1	HEADER 8X2	2,54 mm 2X8 p header
253	J2_2	HEADER 10X2	2,54 mm 2X10 p header
254	J2_3	HEADER 7X2	2,54 mm 2X7 p header
255	JP1	JUMPER7	Solderable jumper
256	JP2	JUMPER4	Solderable jumper
257	JP3	JUMPER7	Solderable jumper
258	JP4	JUMPER2	Solderable jumper
259	JP5	HEADER 3	2,54 mm 3 p header
260	R1	100k	Resistor 0805
261	R3	1k5	Resistor 0805
262	R4	560	Resistor 1206
263	R5	100k	Resistor 0805
264	R6	560	Resistor 1206
265	R7	560	Resistor 1206
266	R8	560	Resistor 1206
267	R9	10k	Resistor 1206
268	R10	1	Resistor 1206
269	R11	560	Resistor 1206
270	R12	560	Resistor 1206
271	R13	560	Resistor 1206
272	R14	560	Resistor 1206
273	R15	10k	Resistor 0805
274	R16	15k	Resistor 0805
275	R17	15k	Resistor 0805
276	R18	15k	Resistor 0805
277	R19	15k	Resistor 0805
278	R20	390	Resistor 0805
279	R21	100k	Resistor 0805
280	R22	10k	Resistor 0805
281	R23	1	Resistor 1206
282	R24	60	Resistor 1206
283	R25	60	Resistor 1206
284	R32	560	Resistor 1206
285	R33	560	Resistor 1206
286	R34	1k	Resistor 1206
287	R35	1k	Resistor 1206
288	RN1	ResNW8 4k7	2,54 mm resistor network 8 parallel
289	RN2	ResNW8 15k	2,54 mm resistor network 8 parallel
290	RN3	ResNW8 15k	2,54 mm resistor network 8 parallel
291	RN4	ResNW8 220k	2,54 mm resistor network 8 parallel
292	RN5	ResNW8 220k	2,54 mm resistor network 8 parallel
293	RN6	ResNW8 220k	2,54 mm resistor network 8 parallel
294	RN7	ResNW8 220k	2,54 mm resistor network 8 parallel
295	RN8	ResNW8 15k	2,54 mm resistor network 8 parallel
296	RV1	5.4 VDC	Resistor 1206
297	U1	AUIPS_71411G	High side switch SO-8

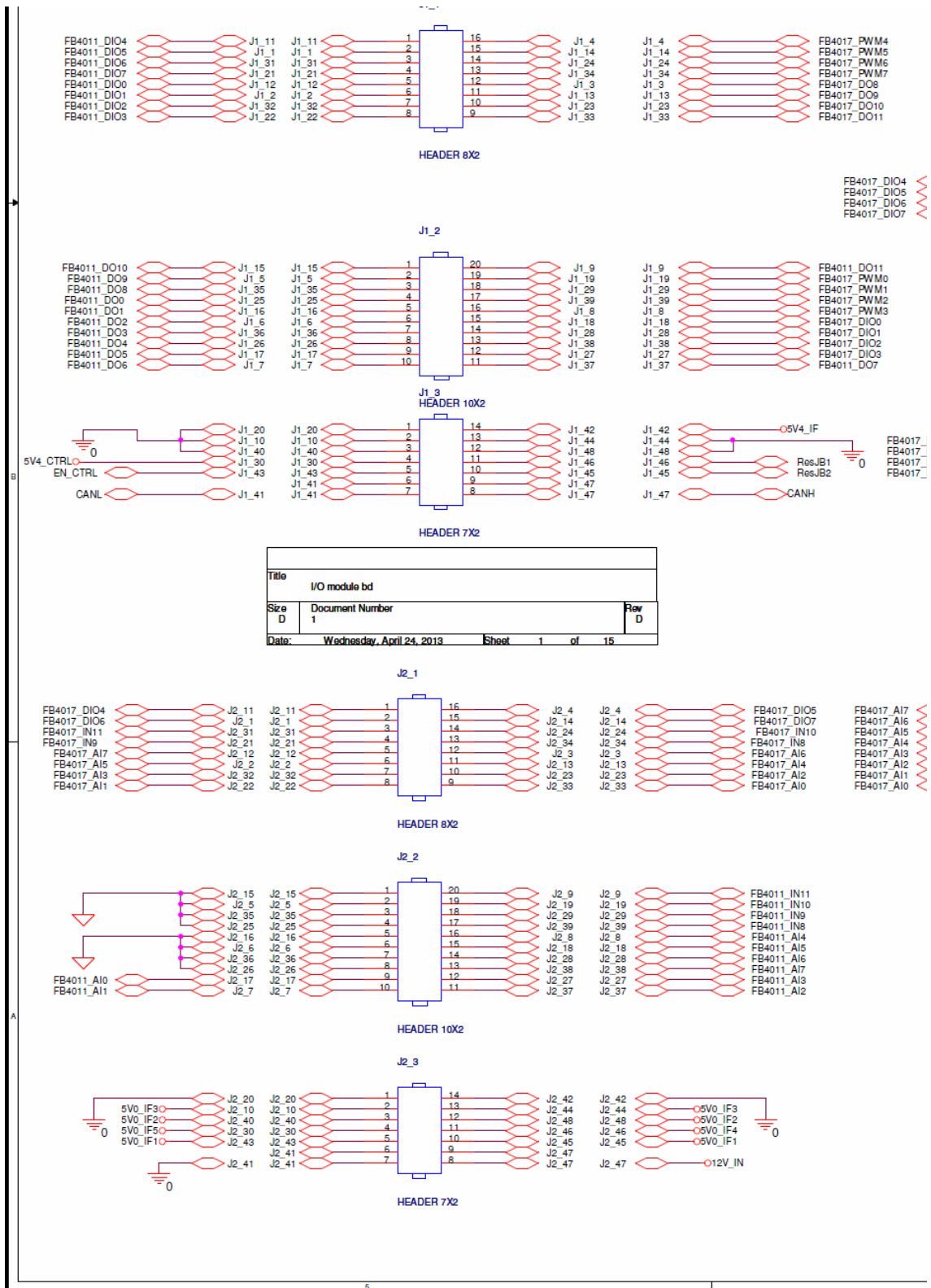
298	U2	SN74ABTH245DW	Digital Transreceiver SOIC-20
299	U3	Si2306DS	Logic level N-Channel Fet SOT23-3
300	U4	FrenzelBerg4011	Frenzel+Berg CO-4011-BD
301	U5	Si2306DS	Logic level N-Channel Fet SOT23-3
302	U6	Si2306DS	Logic level N-Channel Fet SOT23-3
303	U7	FrenzelBerg4017	Frenzel+Berg CO-4017-BD
304	U8	Si2306DS	Logic level N-Channel Fet SOT23-3

## Piirilevyn kytkentäkaaviot

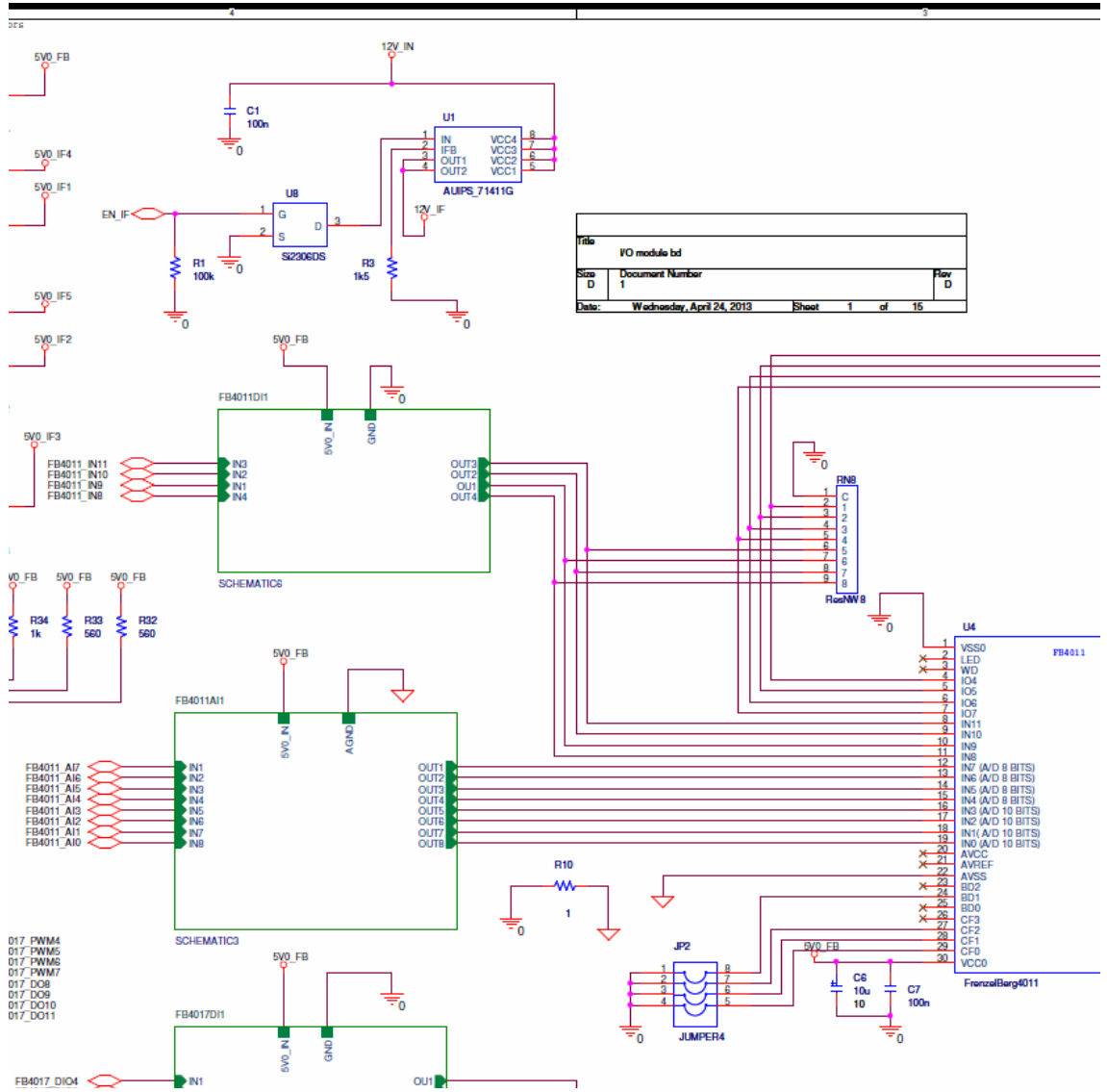
Alla on suunnitellun I/O-moduulien piirilevyn kytkentäkuvat. Kytkentäkuvan ensimmäinen sivu on jaettu kuuteen osaan sen suuren koon vuoksi, muut 14 sivua ovat yksittäisiä kuvia. Mikäli komponenttiarvot eroavat materiaalilistan arvoista, on materiaalilistan arvo pätevä.



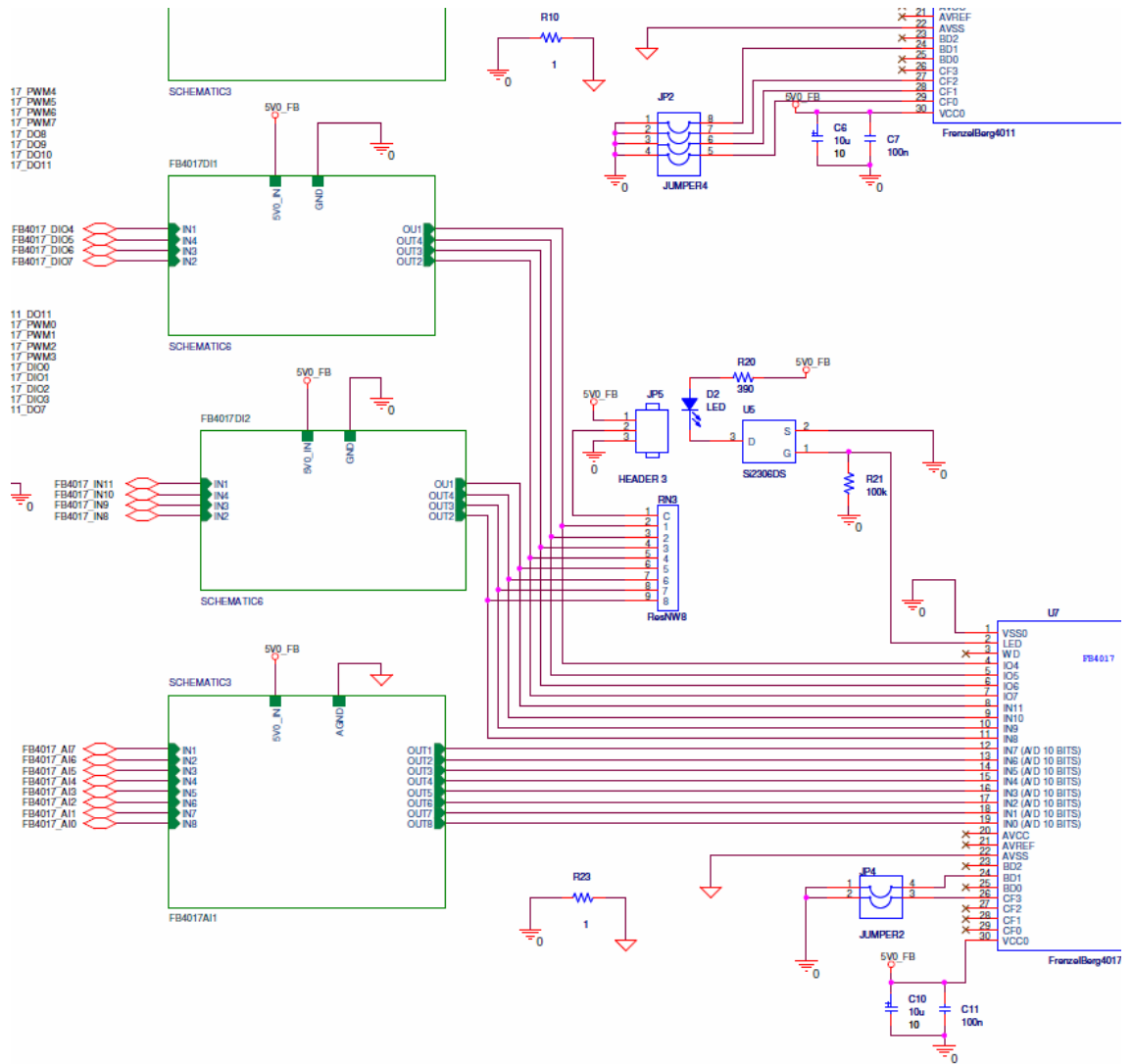
Kuva 24. Sivun 1 osa 1 (SCHEMATIC 1).



Kuva 25. Siivu 1 osa 2 (SCHEMATIC 1).

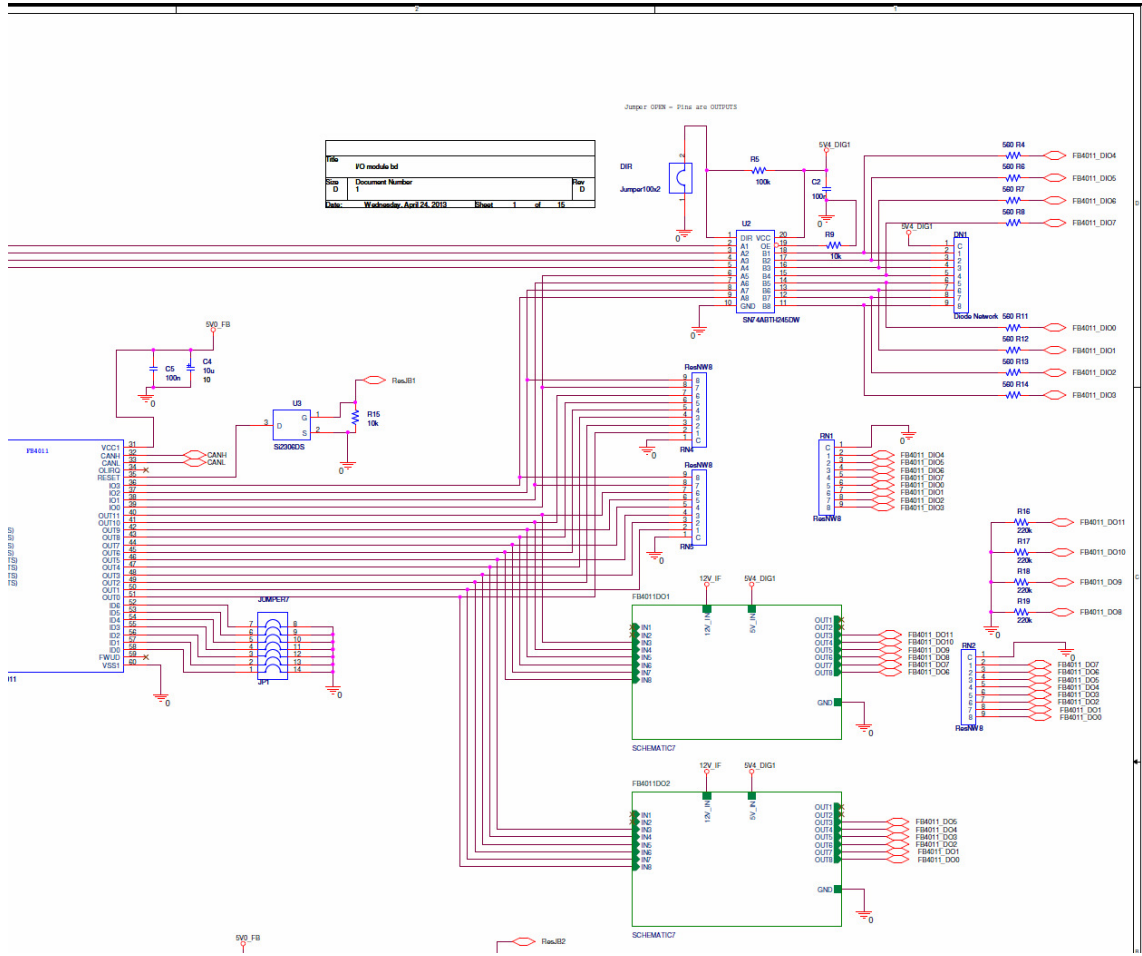


Kuva 26. Sivu 1 osa 3 (SCHEMATIC 1).

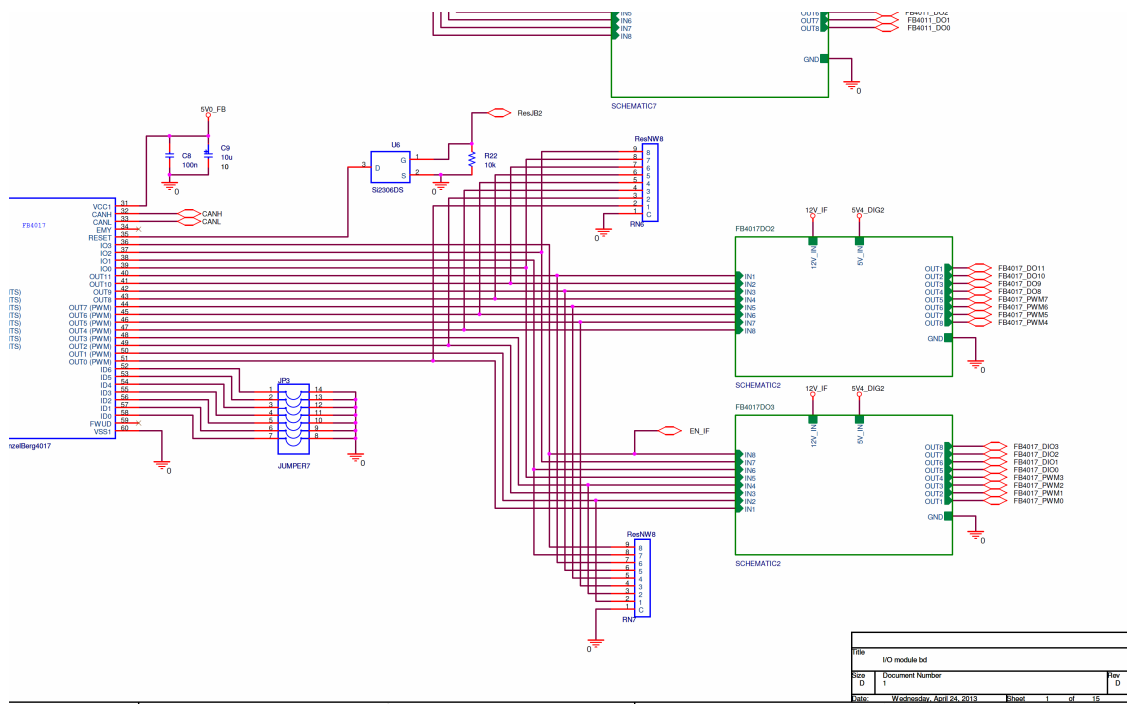


Title		
I/O module bd		
Size	Document Number	Rev D
D	1	
Date: Wednesday, April 24, 2013 Sheet 1 of 15		

Kuva 27. Sivu 1 osa 4 (SCHEMATIC 1).

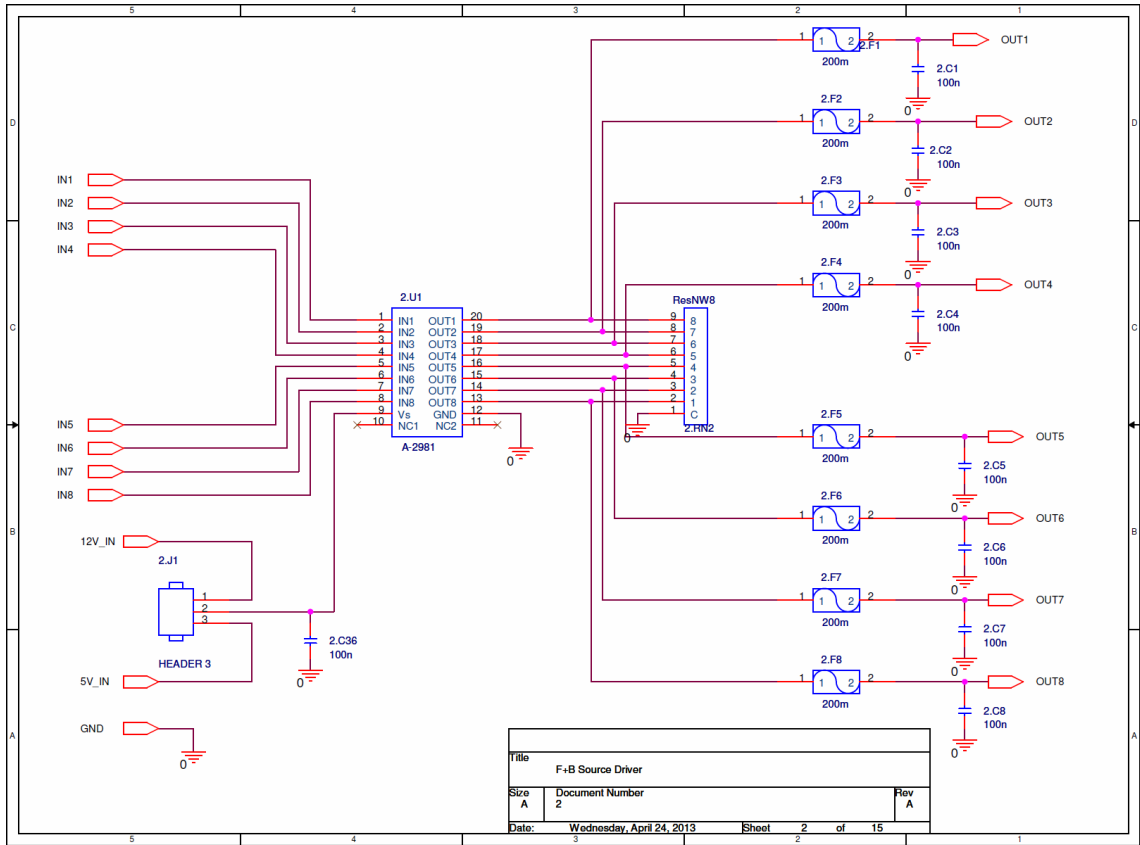


Kuva 28. Sivu 1 osa 5 (SCHEMATIC 1).

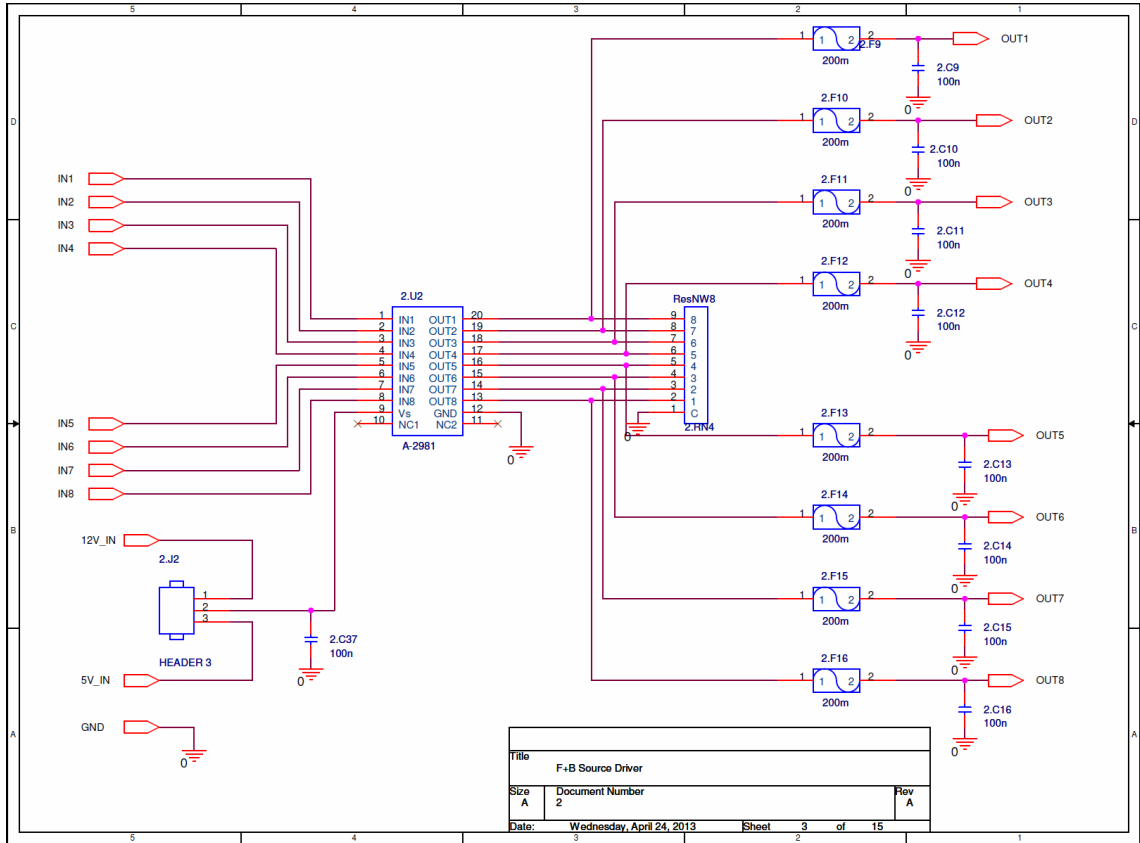


Kuva 29. Sivu 1 osa 6 (SCHEMATIC 1).

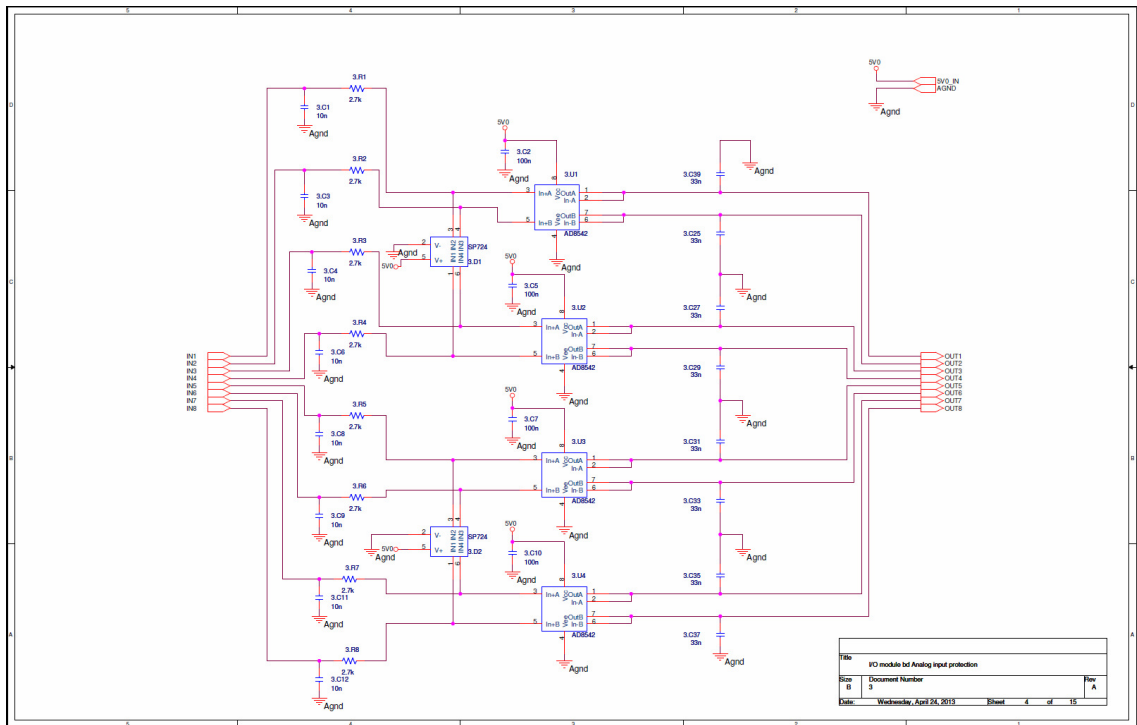




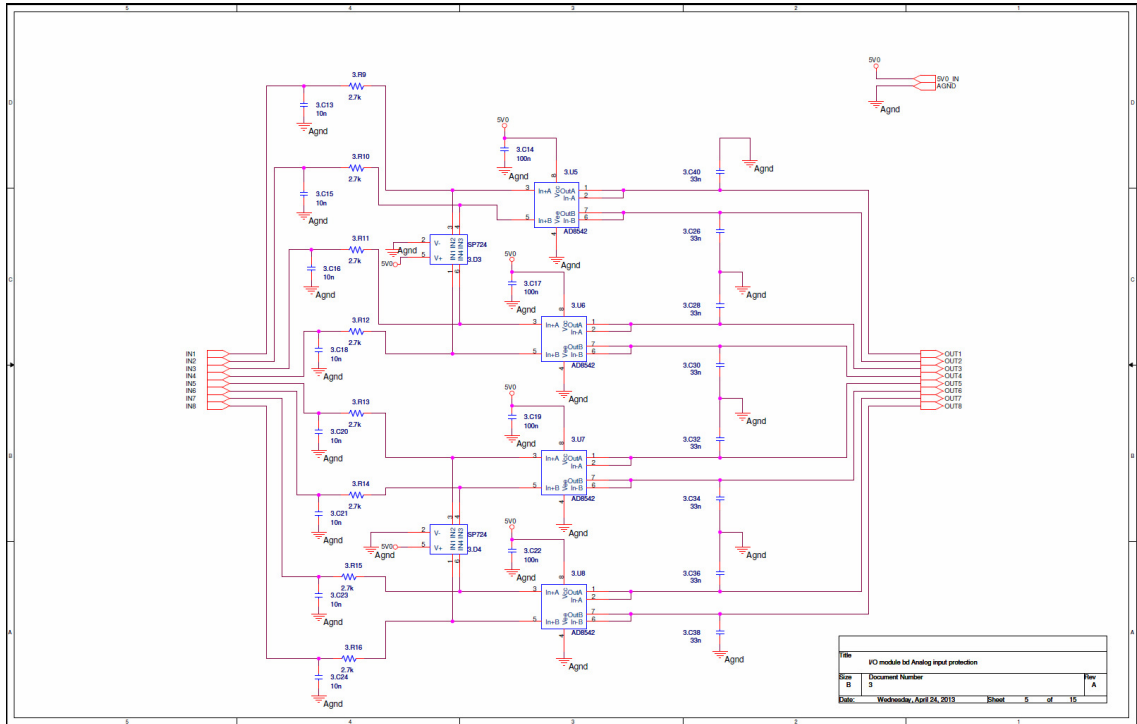
Kuva 30. Sivu 2 (SCHEMATIC 2).



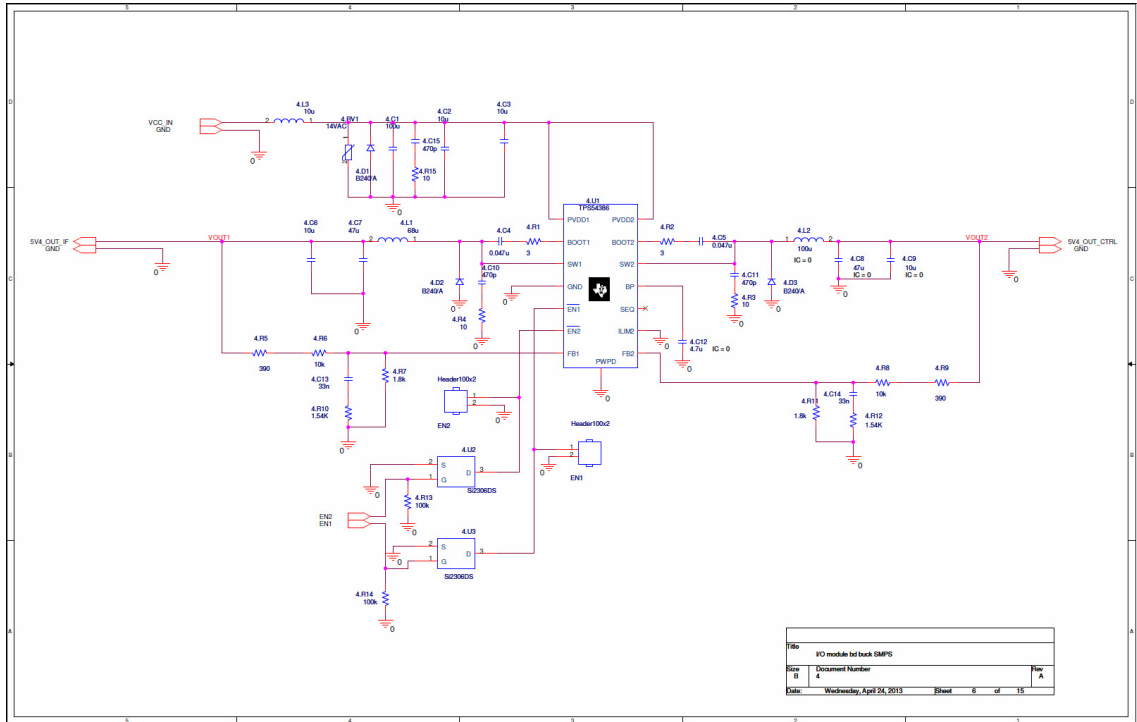
Kuva 31. Sivu 3 (SCHEMATIC 2).



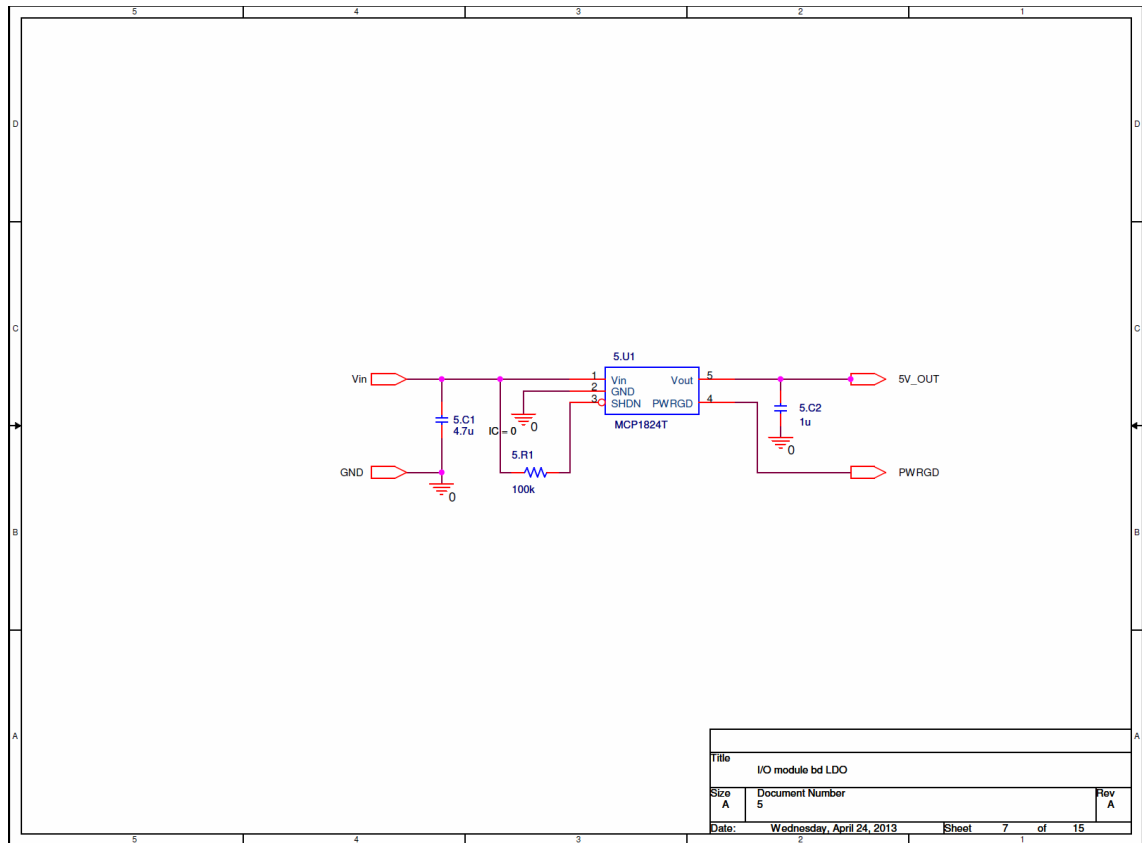
Kuva 32. Sivun 4 (SCHEMATIC 3).



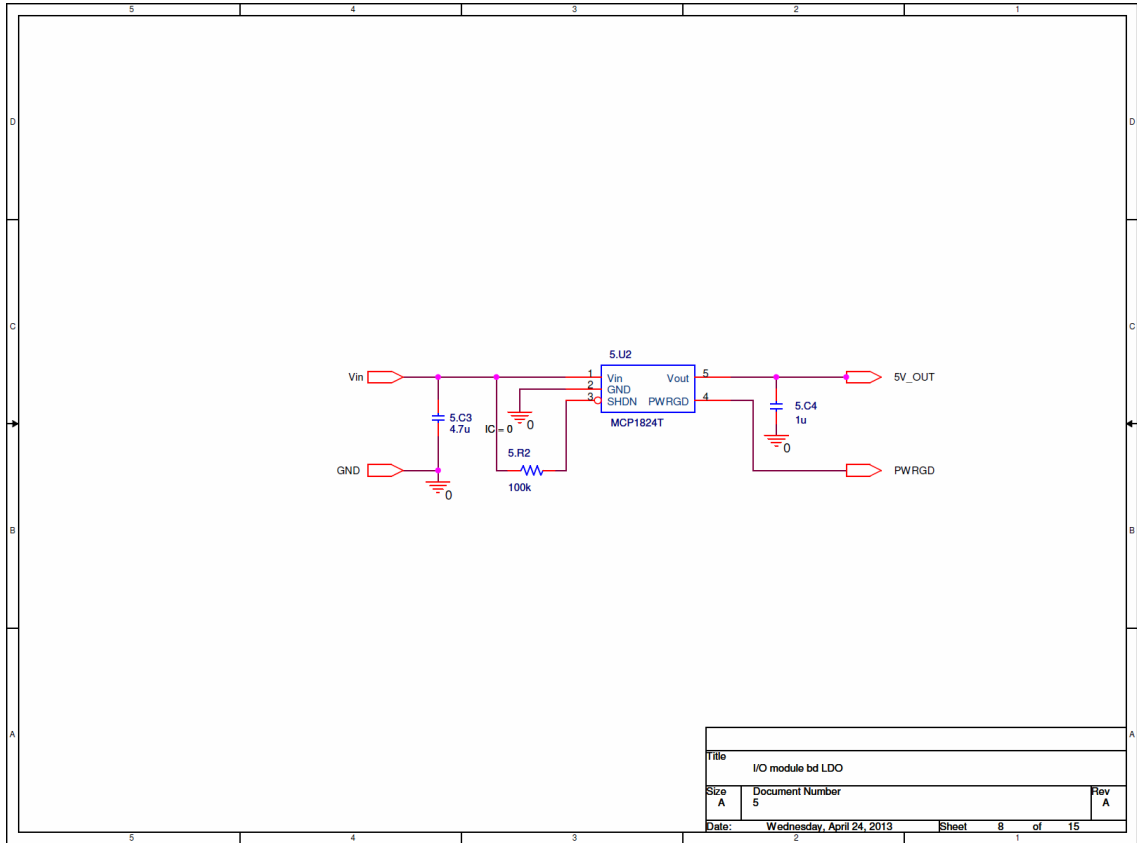
Kuva 33. Sivu 5 (SCHEMATIC 3).



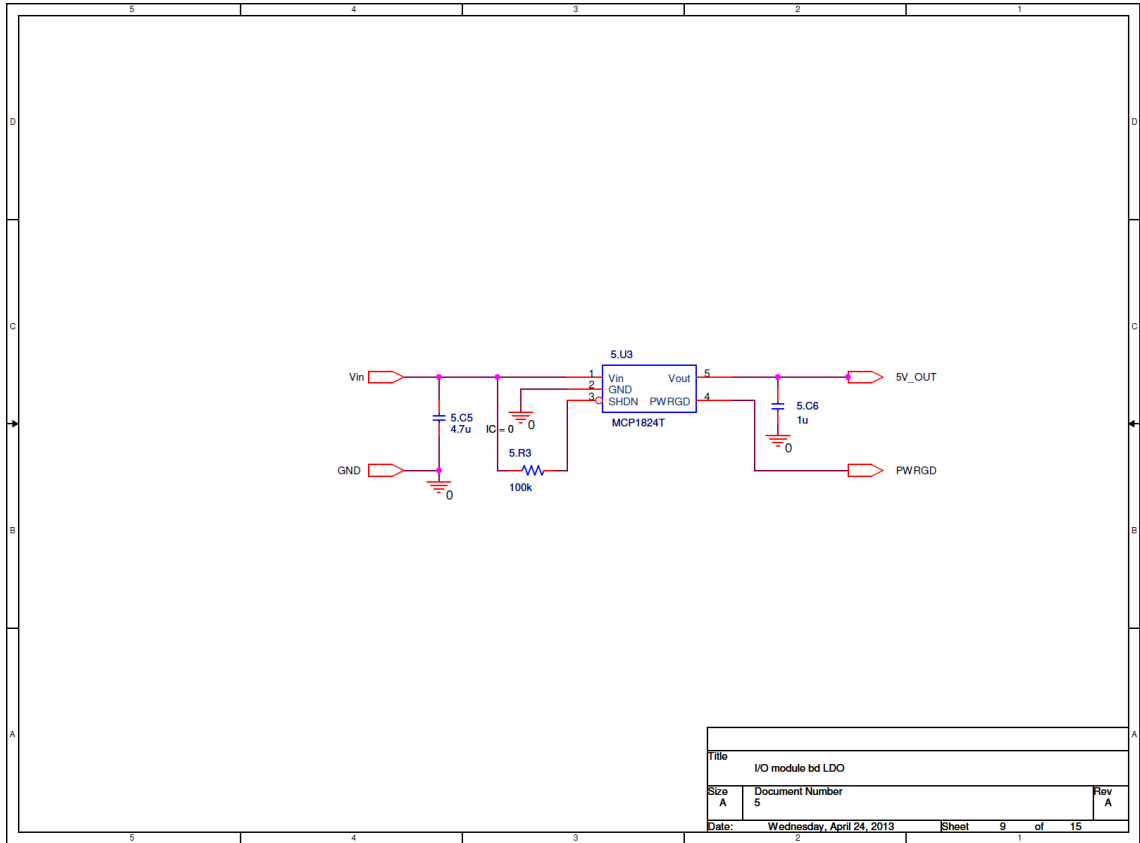
Kuva 34. Sivu 6 (SCHEMATIC 4).



Kuva 35. Sivu 7 (SCHEMATIC 5).

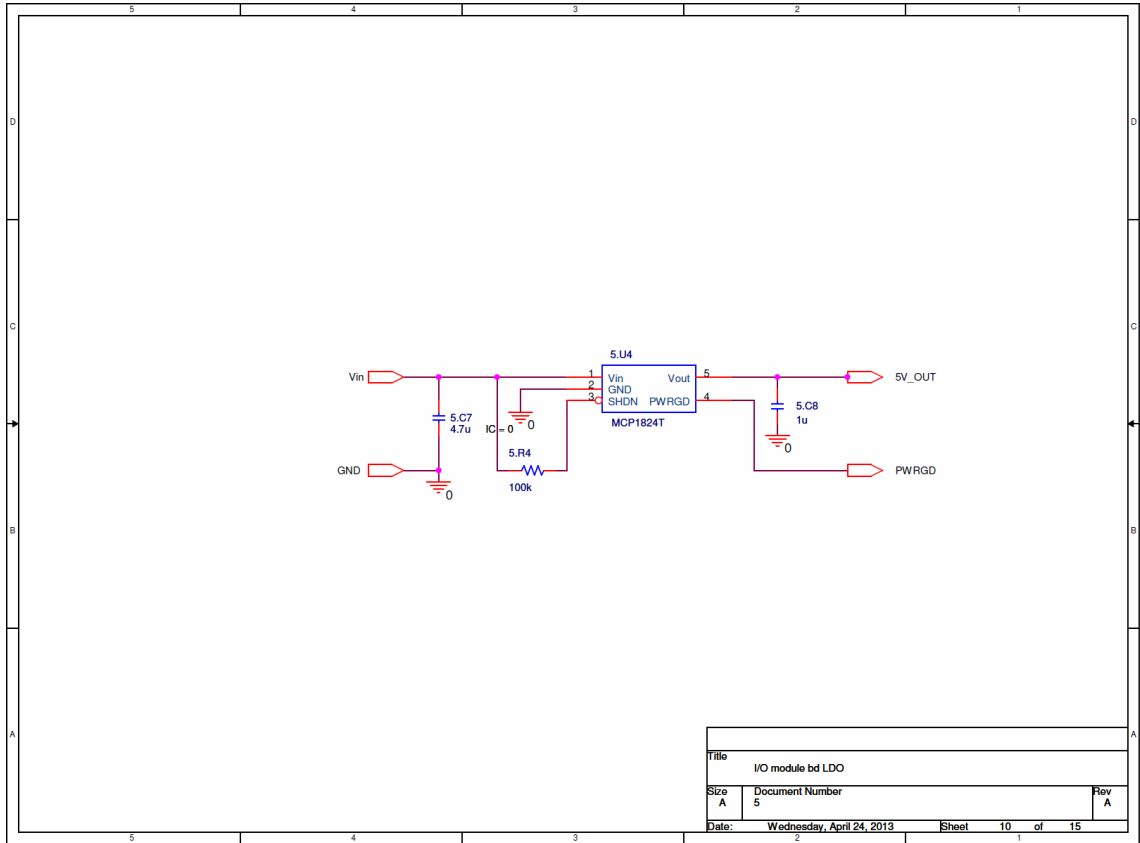


Kuva 36. Sivu 8. (SCHEMATIC 5).

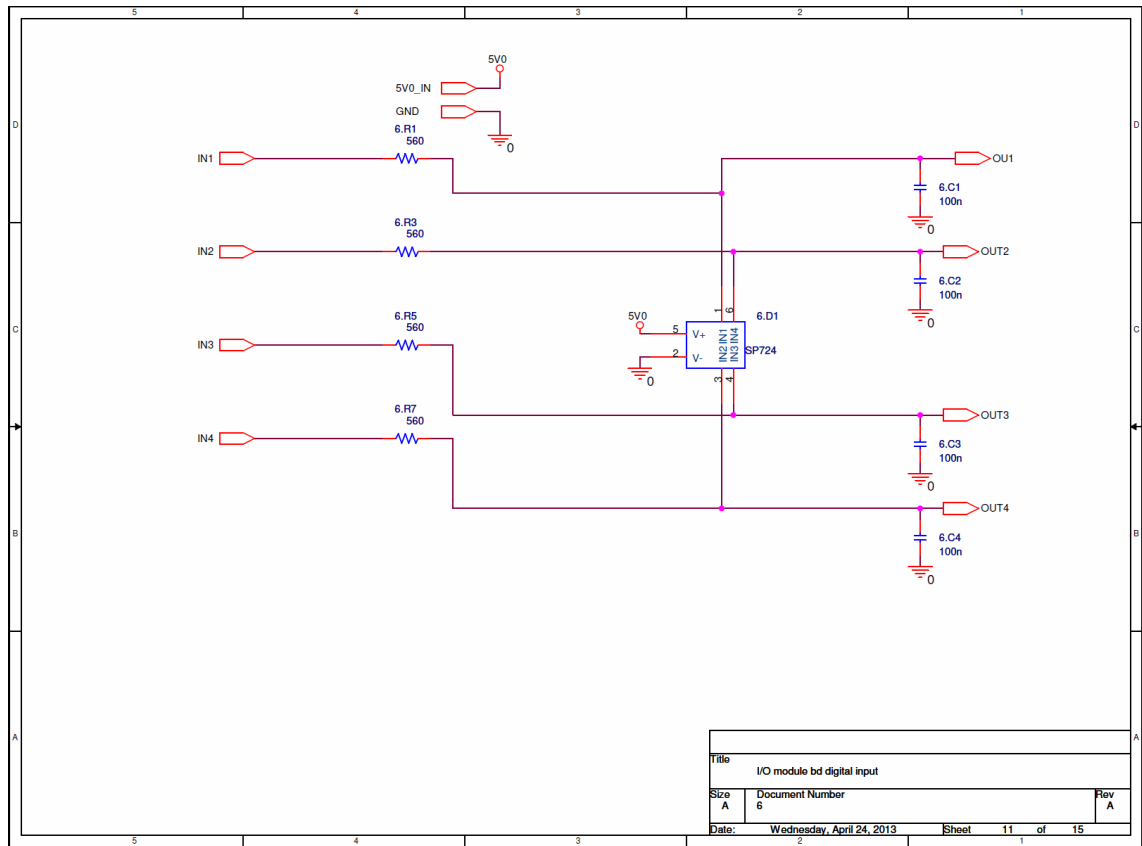


Kuva 37. Sivu 9 (SCHEMATIC 5).

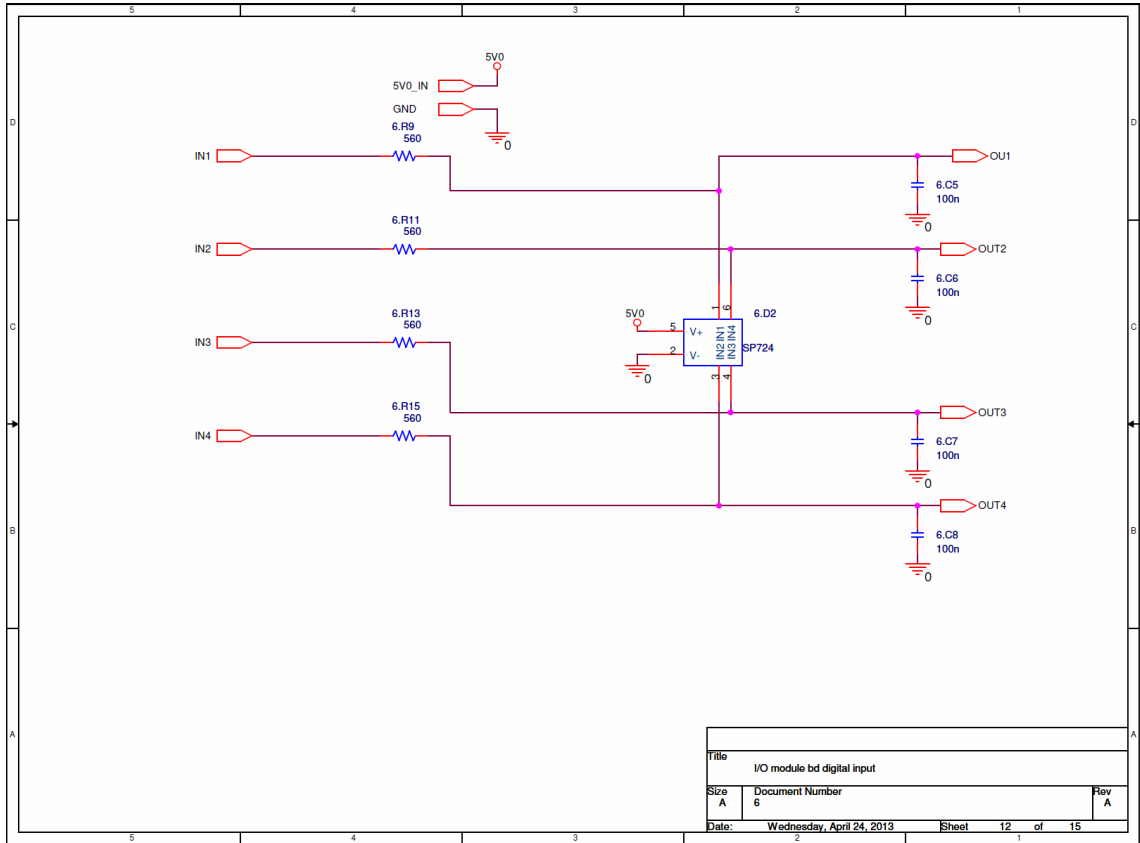




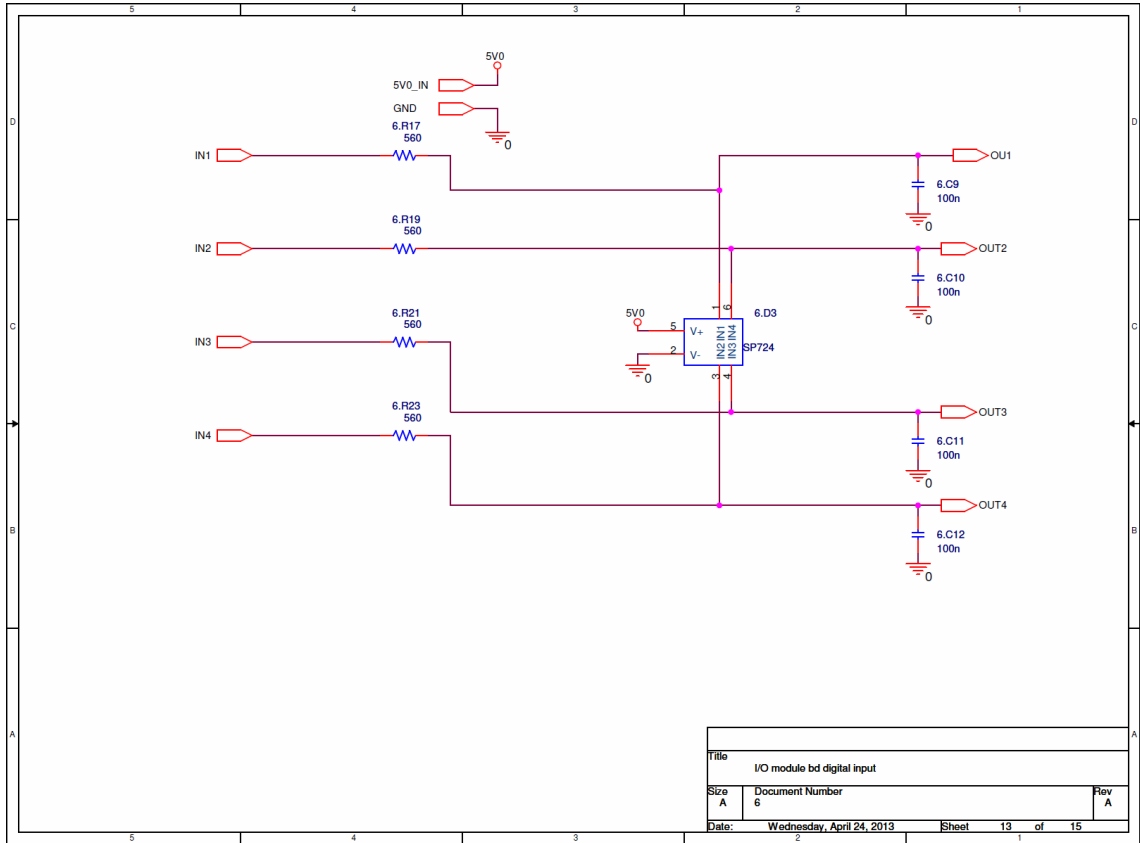
Kuva 38. Sivu 10 (SCHEMATIC 5).



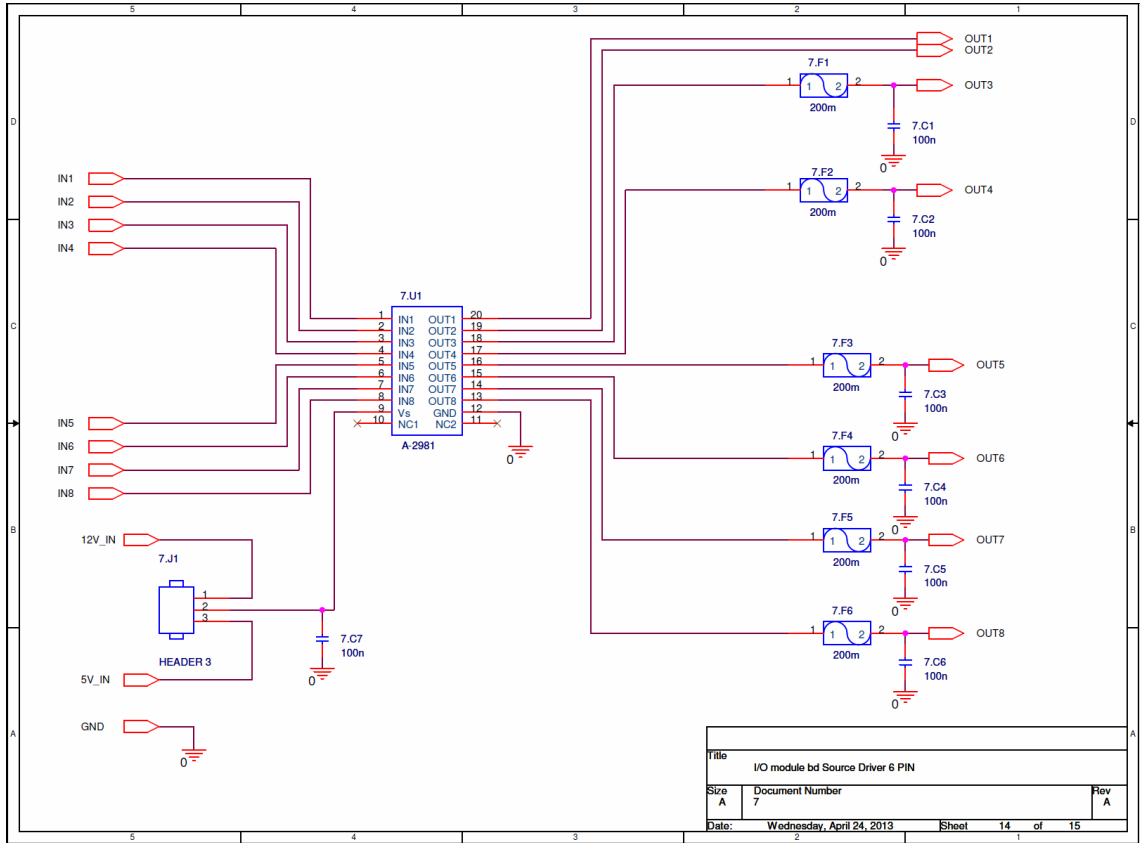
Kuva 39. Sivu 11 (SCHEMATIC 6).



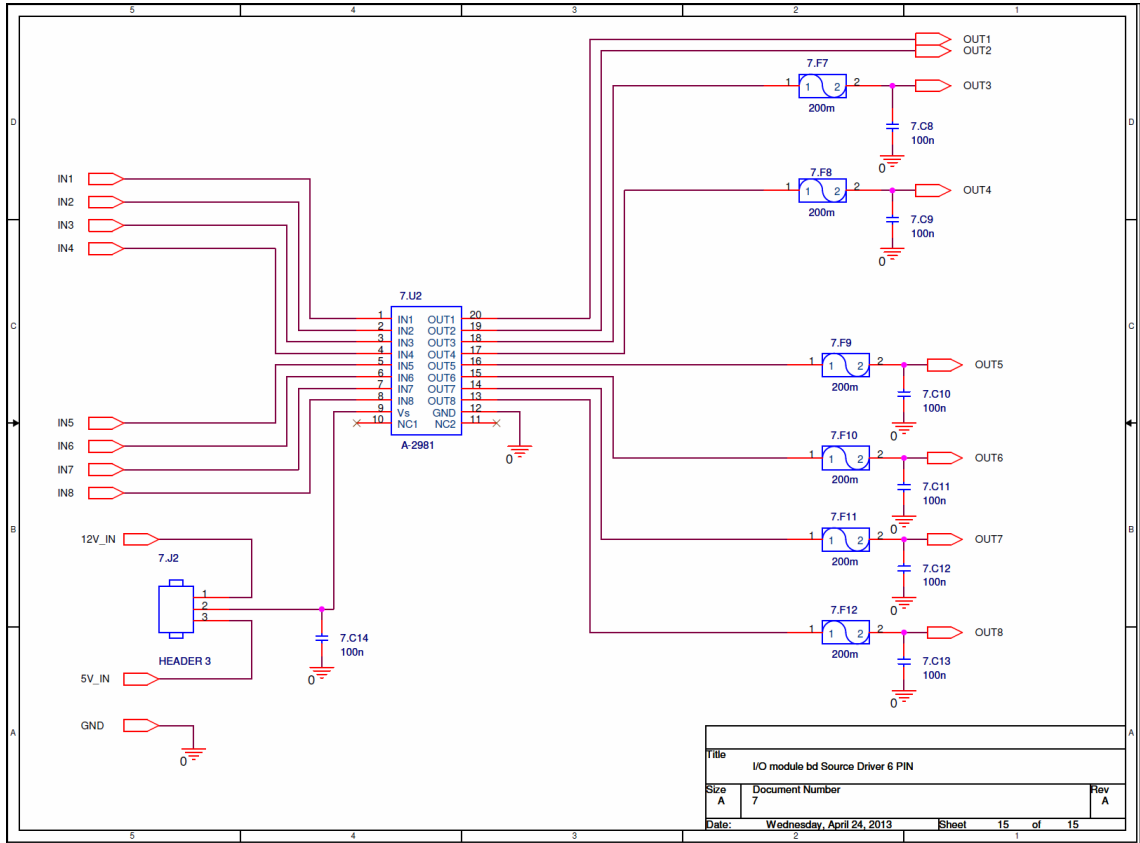
Kuva 40. Sivu 12 (SCHEMATIC 6).



Kuva 41. Sivu 13 (SCHEMATIC 6).



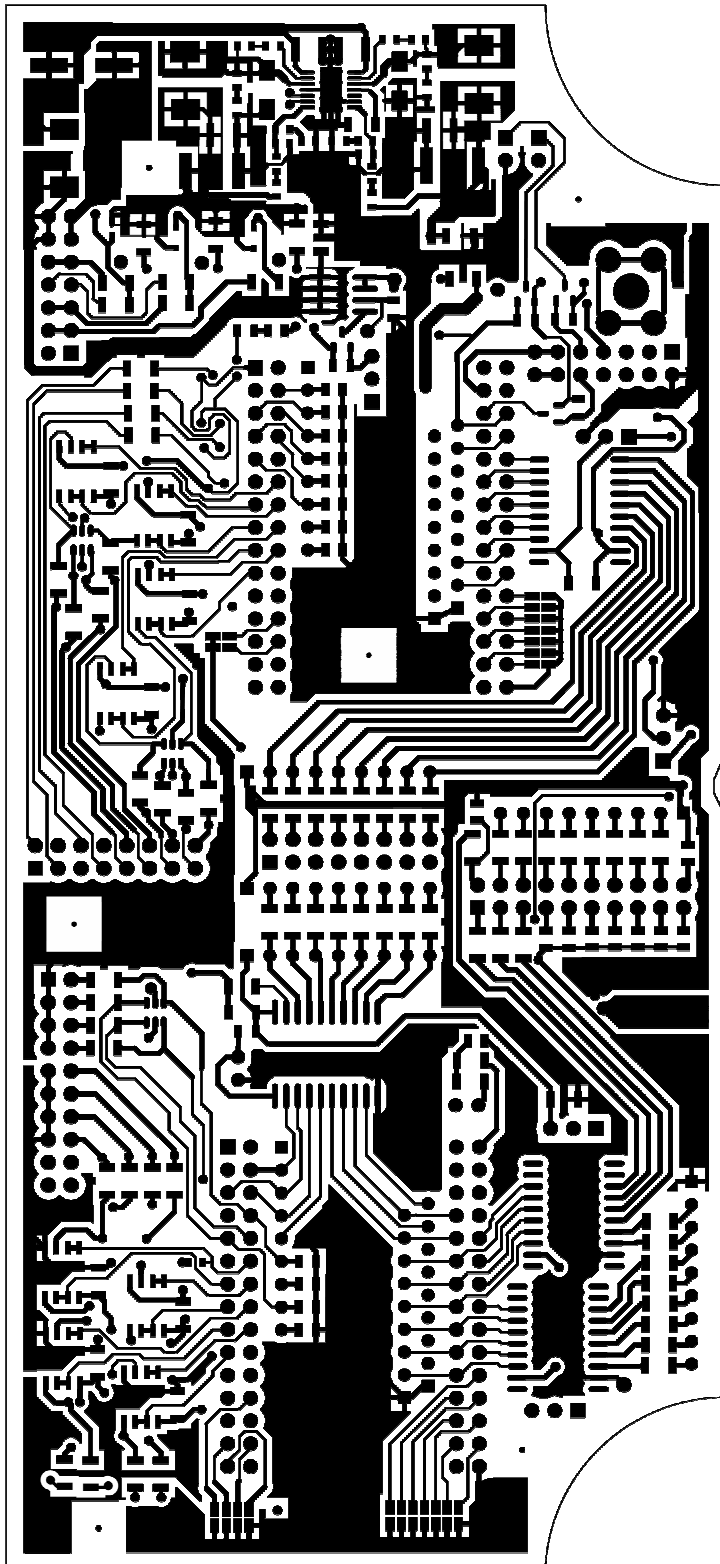
Kuva 42. Sivu 14 (SCHEMATIC 7).



Kuva 43. Sivu 15 (SCHEMATIC 7).

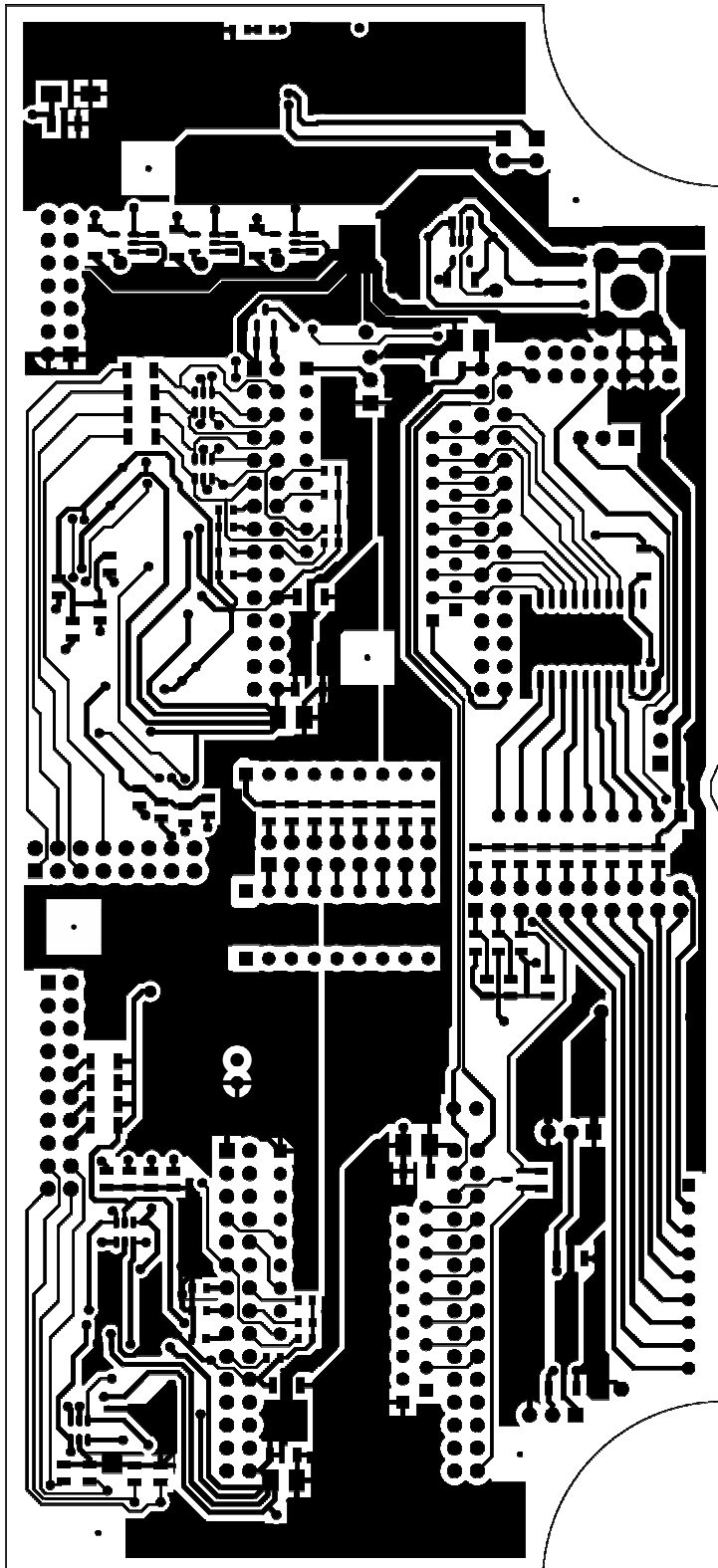
## **Piirilevyjen gerber-kuvat**

Alla on suunnitellun piirilevyn gerber-tiedostoista tehdyt kuvat.

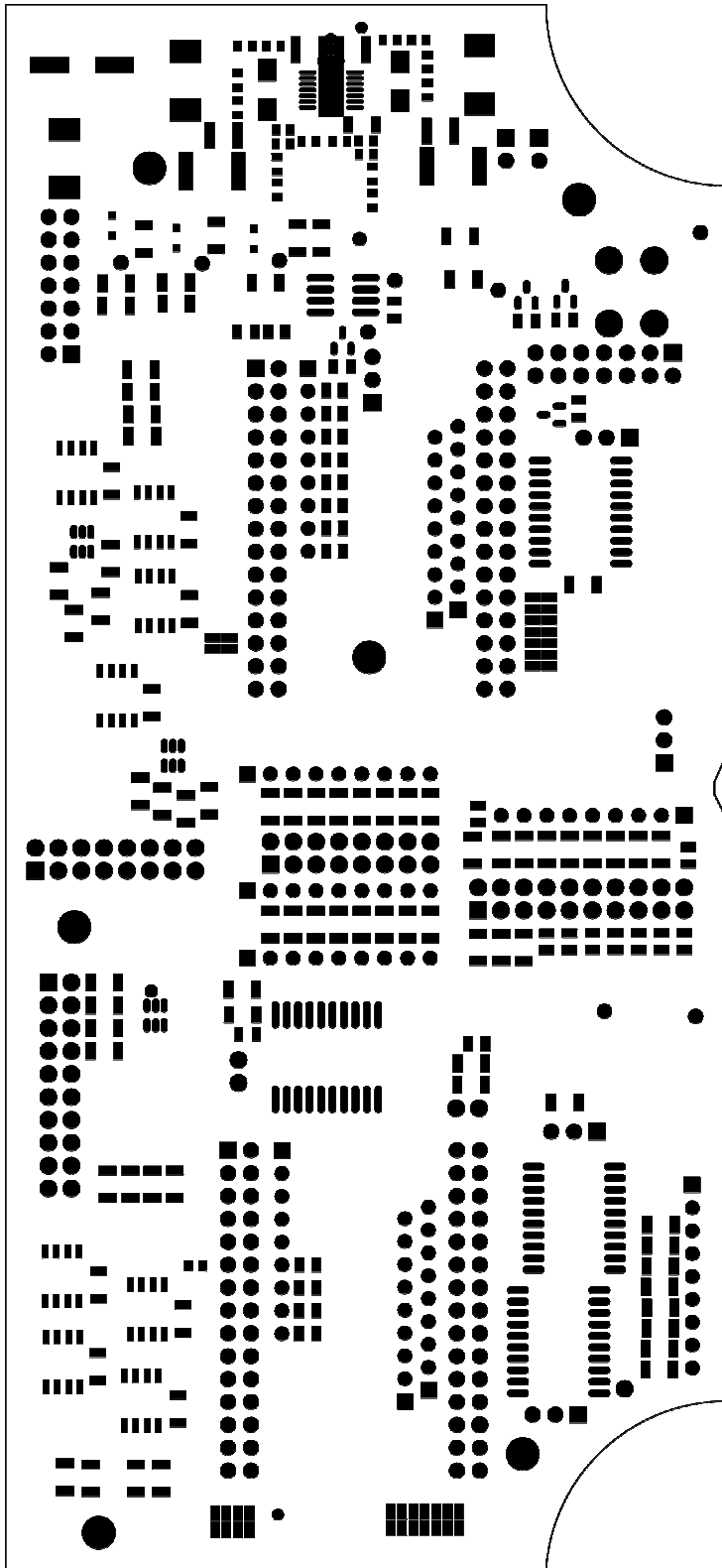


Kuva 44. Kupari pinta.

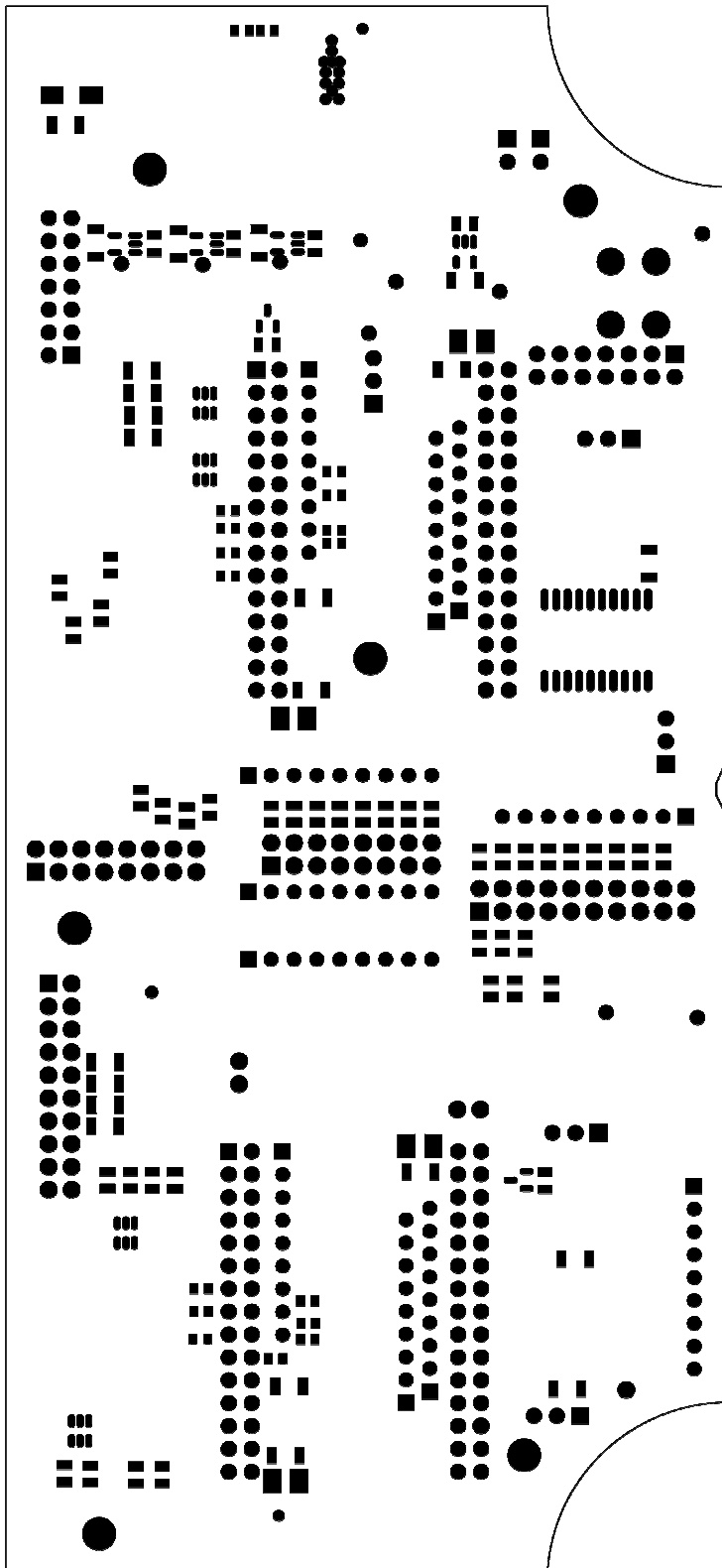




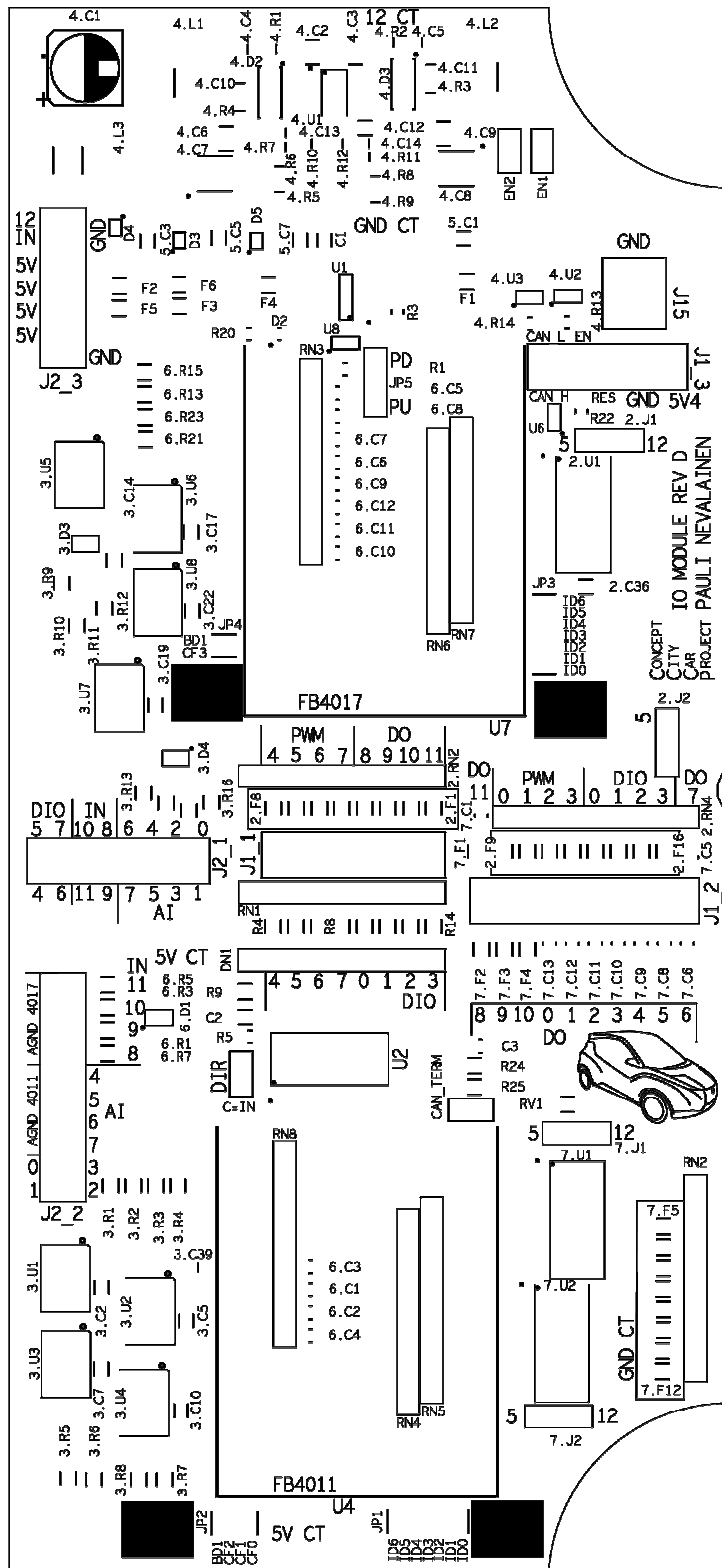
Kuva 45. Kupari pohja.



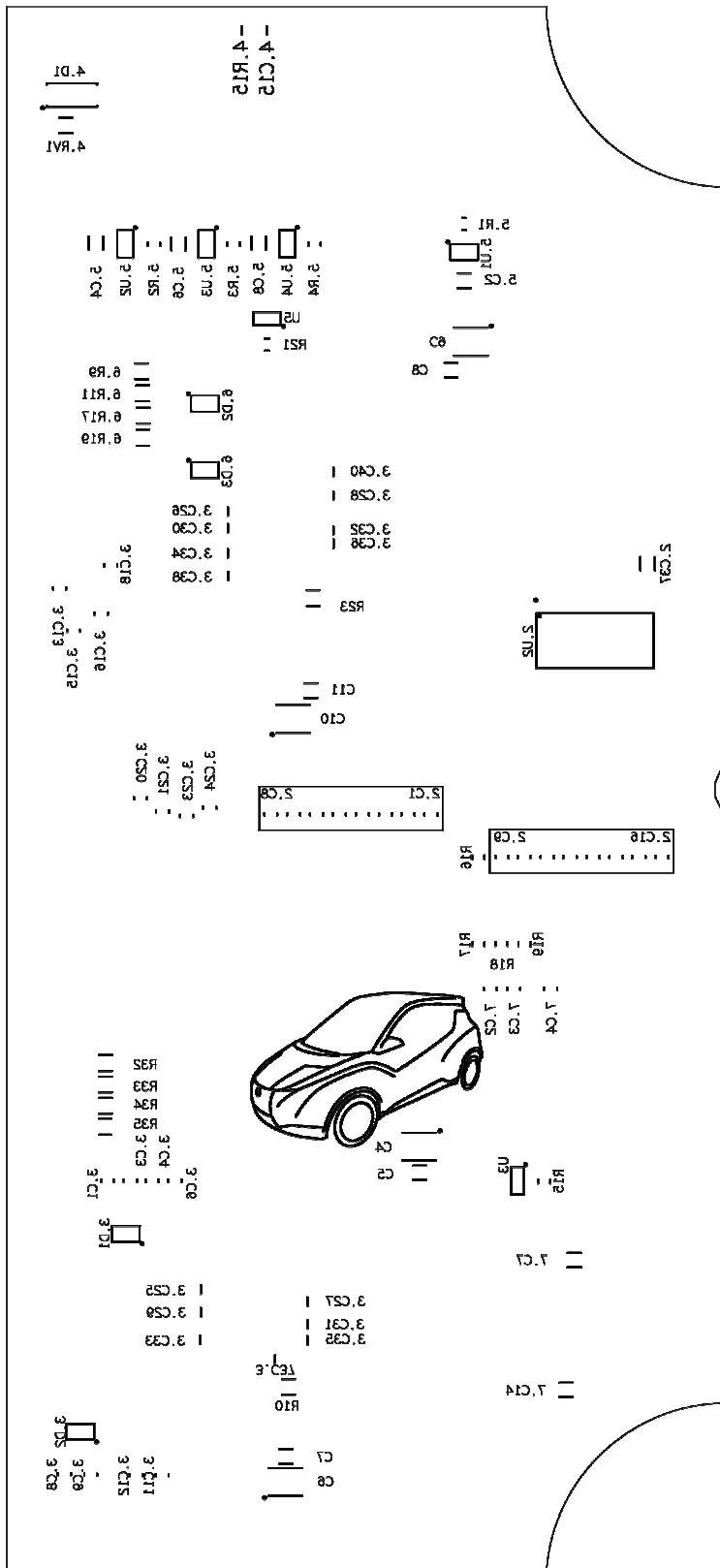
Kuva 46. JEP pinta.



Kuva 47. JEP pohja.



Kuva 48. Silkkiteksti pinta.



Kuva 49. Silkiteksti pohja.