

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond
Informaatikainstituut

IAY40LT

Mario Stepanov 134567IAPB

ELEKTROONIKA KONTROLLÜKSUS TUDENGIVORMELILE FEST16

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Peeter Ellervee
Ph.D
Professor

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Mario Stepanov

20.05.16

Lõputöö ülesandepüstitus

Üliõpilane: Mario Stepanov

Martikkel: 134567IAPB

Juhendaja: Peeter Ellersee

Lõputöö teema eesti keeles: Tudengivormeli FEST16 elektroonika kontrollüksuse projekteerimine

Lõputöö teema inglise keeles: Formula student car FEST16 electronics control unit development

Eesmärk: Projekteerida tudengivormelile FEST16 elektronikaplaati, mis kontrollib kogu vormeli tegevust vastavalt loetavatele sisenditele.

Lahendatavad probleemid: Analoog- ja digitaalsisendite lugemine, toidete lülitamine, mootorite juhtimine üle CAN-liidese, suhtlus akuhaldussüsteemi, logimissüsteemi ja muu vormeliga.

Annotatsioon

Tudengivormeli meeskond loodi aastal 2006. Esimesel aastal osaleti võistlusel ainult virtuaalse prototüübiga selleks ette nähtud klassis. Siit edasi on aga projekteeritud vormel ka valmis ehitatud ning sellega ka võisteldud. Toona ehitati sisepõlemismootoritega vormeleid. Kuni aastani 2012 arendati aasta-aastalt vormelit paremaks, olles jõudnud sisepõlemismootoritega tudengivormelite maailma tippu, otsustati edaspidi teha elektrivormeleid. Kui aastatel 2013 ja 2014 ehitati ühe elektrimootoriga toru-raamist vormel, siis aastal 2015 tehti suur hüpe, ehitades süsinikk-monokokk kere ning kasutades nelja elektrimootorit. Kuna uusi süsteeme oli nii palju, kujunes selle testimisperiod väikeseks ning võistlustel erilist edu ei saavutatud. Aastaks 2016 jäeti vormeli kontseptsioon samaks ning loodetakse pikema testperioodi tõttu võistlustel suuremat edu saavutada.

Käesolev lõputöö on valminud koostöös Formula Student Team Tallinn meeskonnaga. Töö eesmärk oli disainida tudengivormelile FEST16 elektroonika kontrollüksus, mis vastavalt vormeli liidestele kontrollib mootori kontrolleri ja kogu vormeli käitumist, et tagada vormeli töötamine, kuid samas silmas pidades ohutust.

Töö koosneb kergest ülevaatest elektroonika kontrollüksustest autotööstuses ning FEST16 elektrisüsteemidest. Pärast seda esitatakse loodavale süsteemile tehnilised nõuded. Nende täitmiseks esitatakse kolm võimalikku kontseptsiooni, millest üks valitakse. Siis valitakse peamised elektroonikakomponendid, mille ümber hakatakse tegema skeeme, jõudes välja reaalse trükkplaadi disainini.

Töö tulemusena projekteeriti ja valmistati trükkplaat, mis täidab elektroonika kontrollüksuse funktsionaalsust tudengivormelil FEST16.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 34 leheküljel, 6 peatükki, 15 joonist, 2 tabelit.

Abstract

Electronics control unit for formula student car FEST16

The goal of the Bachelor's thesis is to design an electronics control unit for formula student car FEST16. The ECU has to implement needed functionality to operate motor controller and whole car according to situation and inputs to the unit.

The thesis talks about different electronics control units in automotive industry. After that a brief overview about formula student car FEST16 systems, which are closely related to the goal of the thesis.

In order the ECU to operate intentionally, we needed to make right presumptions before beginning of design. Presumptions included environment surrounding the ECU – other PCB-s, temperature, vibration and also hardware requirements to achieve needed functionality. According to presumptions some main electronic components were chosen. Schematics were done mainly according to component datasheets. The goal was to get really small physical design while being compatible with other student designed boards.

In result of the thesis a printed circuit board was designed and manufactured that implemented needed functionality.

The thesis is in Estonian and contains 34 pages of text, 6 chapters, 15 figures, 2 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

FEST16	<i>Formula Estonia 2016</i> - Tudengivormel, mis on ehitatud aastal 2016
ECU	<i>Electronics Control Unit</i> – elektroonika kontrollüksus
BMS	<i>Battery Management System</i> – akuhaldussüsteem
CAN	<i>Controller Area Network</i> – sõiduki siini standard, mis võimaldab mikrokontrolleritel omavahel suhelda ka mööda pikka vahemaad
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> – andmevahetuse standard lühimaa suhtluseks
IMD	<i>Insulation Monitoring Device</i> – isolatsiooni mõõtev seade
GPIO	<i>General-Purpose Input/Output</i> – üldotstarbeline sisens-väljund
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> – analoog-digitaalmuundur
LQFP	<i>Low profile Quad Flat Package</i> – elektroonikakomponendi korpuse tüüp
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> – isoleeritud paisuga väljatransistor
TVS-diood	<i>Transient Voltage Suppression</i> – supressordiood impulssvoolude kaitseks
I/O	<i>Input/Output</i> – sisend-väljund

Sisukord

1 Sissejuhatus	11
2 Taust	12
2.1 FEST16 ülevaade.....	13
3 Tehnilised nõuded	16
3.1 Töötingimused	16
3.2 Kokkusobivus	17
3.3 Funktsionaalsus	17
4 Võimalikud lahendused	19
4.1 Mitu väiksemat mikrokontrollerit.....	19
4.2 Väike mikrokontroller koos välise ADC kiibiga.....	20
4.3 Üks suur mikrokontroller.....	20
4.4 Lahenduse valik.....	21
5 Elektroonika	22
5.1 Komponentide valik	22
5.1.1 Mikrokontroller	22
5.1.2 CAN kontrolleri	23
5.1.3 CAN transiiver.....	23
5.1.4 Digitaalväljundite transistor	24
5.2 Skeem	25
5.2.1 Mikrokontroller	25
5.2.2 Sisendid	26
5.2.3 Digitaalväljundid	27
5.2.4 Toitepinged.....	28
5.2.5 CAN.....	29
5.2.6 Muu.....	30
5.3 Trükkplaadi disain	30
6 Kokkuvõte	33
Kasutatud kirjandus	34
Lisa 1 – Akukast koos elektroonikasektsiooniga	36

Lisa 2 – Valminud trükkplaadi altvaate kuvatõmmis.....	37
Lisa 3 – ECU esimene kiht.....	38
Lisa 4 – ECU teine kiht	39
Lisa 5 – ECU kolmas kiht	40
Lisa 6 – ECU neljas kiht.....	41
Lisa 7 – BMS, ECU, SAFETY üksteise peal <i>pin headeritega</i>	42
Lisa 8 –Muud skeemid	43

Jooniste loetelu

Joonis 1. Sisepõlemismootoriga sõiduki kontroll-moodulid.	12
Joonis 2. FEST16 süsteemide ülevaade.....	15
Joonis 3. Kahe väikse mikrokontrolleriga kontseptsioon.....	20
Joonis 4. Väikese mikrokontrolleri ja ADC-ga kontseptsioon.....	20
Joonis 5. Ühe suure mikrokontrolleriga kontseptsioon.	21
Joonis 6. N-MOSFET STD40NF03LT4 [13].....	24
Joonis 7. Reset, väline ostsillaator ja muud skeemid	26
Joonis 8. Mikrokontrolleri siluvad kondensaatorid	26
Joonis 9. Analoo sensori mõõteahel.	27
Joonis 10. Digitaalsisendite mõõteahelad.....	27
Joonis 11. Digitaalväljundite skeem.....	28
Joonis 12. Impulss-stabilisaatori skeem 24V-st 5V tegemiseks.....	28
Joonis 13. Lineaarstabilisaatorite skeem 3.3V analoog- ja digitaaltoite tegemiseks.....	29
Joonis 14. CAN kontrolleri ja CAN transiiveri skeem.....	30
Joonis 15. Projekteeritud ECU pealtvaate kuvatõmmis.	32

Tabelite loetelu

Tabel 1. Vajalike infoobjektide kirjeldus.	17
Tabel 2. Vajalikud lülitatavad väljundid.	18

1 Sissejuhatus

Tudengivormeli Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli ühismeeskond hakkas peale sise põlemismootoritega vormelite ehitamist elektrivormeleid ehitama aastal 2013. Juba aastal 2014 saavutati Itaalias elektrivormelite seas esimene koht. Peale seda vahetati kontseptsiooni minnes ühe mootoriga tagaveolise kontseptsioonilt nelja mootoriga nelikveolise peale. Sellega tekkis palju probleeme, mistõttu vormeli potentsiaali ei suudetud võistlustel ära kasutada. Seepärast jäeti FEST16 puhul kontseptsioon samaks ning loodetakse võistlustel oma potentsiaal ära kasutada.

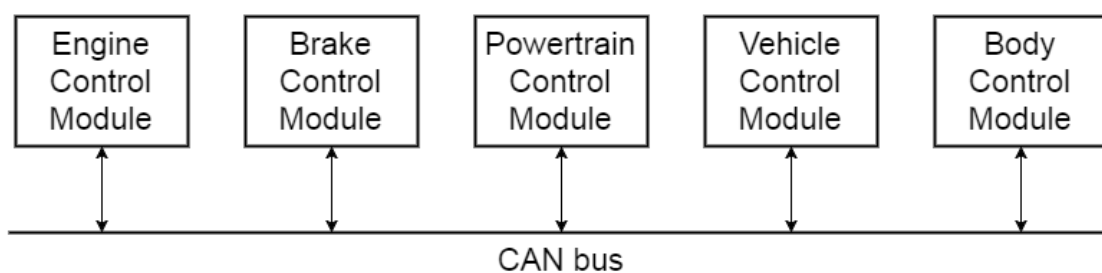
Bakalaurusetöö eesmärk on projekteerida ja valmistada tudengivormelile FEST16 elektroonika kontrollüksus (ECU), mis tagab vormeli toimimise lähtudes hetkeolukorrast ja piloodi sisenditest vormeli liidestele. Meeskonna soovidest lähtudes, peab ECU suutma lugeda analoog- ja digitaalsisendeid, suhtlema mootori kontrolleri ja BMS-ga üle CAN-võrgu ning lülitama digitaalväljundeid. Suur infohulk ja sage andmete töötlemiskiirus seavad tehtavale süsteemile kõrged piirangud.

Töö algosa kirjeldab erinevaid elektroonika kontrollüksuseid autotööstuses ning annab ülevaate FEST16 elektrisüsteemidest. Järgnevalt seatakse paika valmiva süsteemi tehnilised nõuded ja funktsionaalus. Siis pakutakse välja võimalikud lahendused ning valitakse neist üks. Peale seda valitakse põhilised elektroonikakomponendid ning tehakse nende juurde skeemid. Viimases osas paigutatakse komponendid reaalsele trükkplaadile.

Kuna loodav süsteem peab ühilduma ka teiste tudengite tehtud trükkplaatidega, tuli projekteerida trükkplaat ise. Erinevate pakutud kontseptsioonilahenduste hulgast valiti ühe suure mikrokontrolleriga kontseptsioon, kus kogu sisendite töötlus toimub ühe mikrokontrolleri peal. Siis tuli valida põhilised elektroonika komponendid vastavalt plaadi töötingimustele ning teha skeemid, mis ühendavad elektroonikakomponente. Trükkplaadi disainis tuli komponendid paigutada realselt plaadil asuvatele kohtadele ning nad ära ühendada. Siin seadsin eesmärgiks teha võimalikult väike füüsiline disain, kuid teised tudengite trükkplaadid seadsid sellele suured piirangud.

2 Taust

Autotööstuses kasutatakse lühendit ECU kirjeldamaks ükskõik millist sardsüsteemi, mis loeb sensoritelt tulevaid signaale, mis võivad tulla üle terve auto ja lähtuvalt saadud infole kontrollib paljusid tähtsaid komponente nagu mootor, kojamehed või tuled [1]. Erinevaid ECU-sid nimetatakse sõltuvalt nende funktsioonist erinevateks mooduliteks. Moodulid on ühendatud CAN-võrku. Ohutuse mõttes on tihti kriitilised ja vähemolulisemad süsteemid eraldi CAN-võrgus. Sisepõlemismootoriga autodel teeb ECU tohutult arvutusi, et leida parim süüte- ja kütusepihusti ajastus, saavutamaks võimalikult vähene saaste ja võimalikult suur läbisõit. Samuti tegeleb ECU ohutuse ja hooldatavuse tagamiseks veatuvastusega, et vigadele oleks kiiresti võimalik jälile saada. Tüüpiline sisepõlemismootoriga sõiduki erinevad kontroll-moodulid on nähtavad joonisel 1.



Joonis 1. Sisepõlemismootoriga sõiduki kontroll-moodulid.

Elektrisõidukitel on sisepõlemismootori asemel elektrimootor(id), mille pöördemomenti ja pöörlemiskiirust kontrollib eraldi mootori kontrolleri. Lisaks on juures akuhaldussüsteem, mis jälgib akude hetkeolukut, andes infot akude laetuse kohta. Elektrimootori suur eelis on regeneratiivne pidurdamine. Seda aga ei ole võimalik teha kogu aeg. Mootori kontrolleri juhtiv süsteem peab regenereerival pidurdusel arvestama akude laetuse taset, piduripedaali asendit ja mootori võimekust antud kiiruse juures pidurdada, et seda teha ohutult ja efektiivselt [2]. Selliste probleemidega tegelemiseks peab juhtsüsteemini jõudma info kogu sõiduki tähtsatest komponentidest, mille põhjal tehtav arvutuste maht ei jää sugugi alla sisepõlemismootoriga sõiduki juhtsüsteemile.

2.1 FEST16 ülevaade

FEST16 on elektrivormel, mis on ehitatud osalemaks rahusvahelisel tootearendusvõistlusel. Seepärast peab see ka vastama Formula Student reeglitele [3]. FEST16-l on 4 elektrimootorit, millest igaüks suudab välja anda 35kW. Nende juhtimiseks kasutatakse sama firma mootori kontrolleri, mis suhtleb ECU-ga üle CAN liidese. Liikumiseks vajalik energia on talletatud 8.4kWh suuruses akupakis, mille maksimumpinge on 588V ja maksimum tühjakslaadmisvool 300A. Kuna tegemist on liitiumioon akuelementidega, on elementide pingete ja temperatuuride jälgimine kriitilise tähtsusega, sellepärast on ohutuse tagamiseks akupaki moodulitel 10 BMS alamat, mis mõõdavad elementide pingeid ja temperatuure. BMS alamad saadavad pinged ja temperatuurid üle isoleeritud SPI liidese BMS ülemale, mis infot töötleb ja liiga madala või kõrge pinge korral ning liialt kõrge temperatuuri korral ei luba enam sõidul jätkata andes välja errori signaali.

Lisaks akude äärmuslike juhtumite ohtlikkusele on ohtlik ka kõrgepinge lekkimine vormeli maandatud madalpingesüsteemi. Selle avastamiseks on reeglitega nõutud IMD, mis pidevalt saadab impulsse kõrgepingeahelasse. Kui impulss leiab otsema tee kui lubatud maandatud madalpingesüsteemi, on tegemist üliohtliku olukorraga ja IMD annab välja isolatsiooni errori signaali [4].

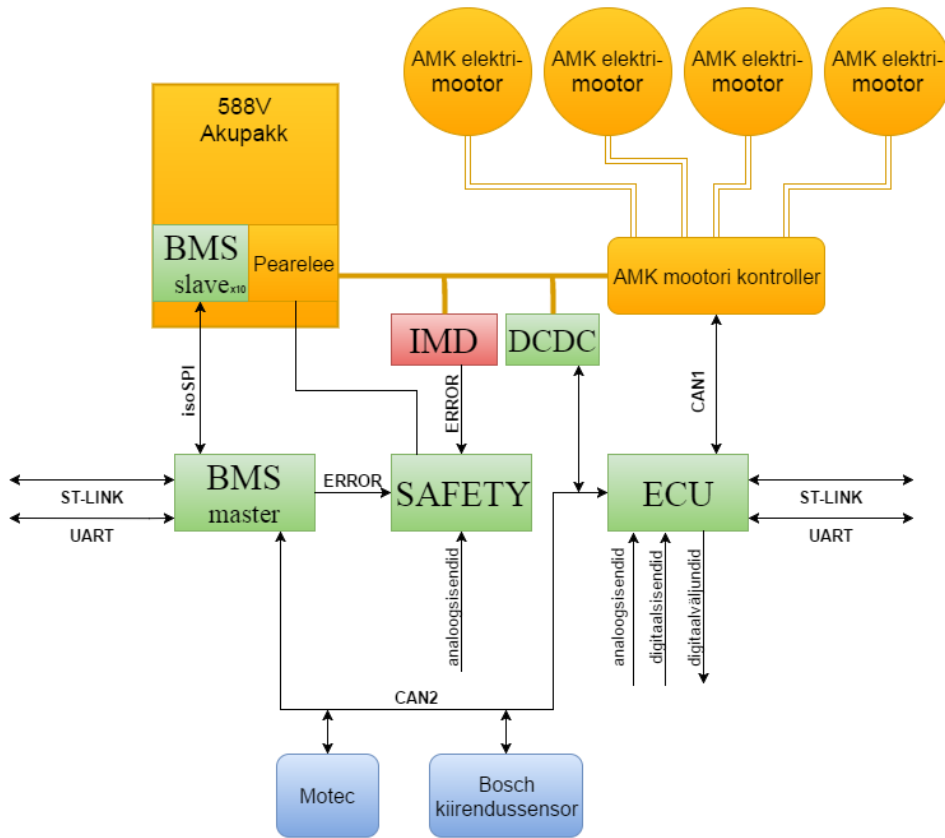
Kõiki neid error signaale töötleb SAFETY plaat. SAFETY plaat katkestab ohtliku olukorra korral akupaki ja mootori kontrolleri ühenduse peareleede lahti ühendamisega, mistõttu ei jõua enam kõrgepinge mootori kontrolleri ja mootoriteni ning vormel on võimetu liikuma. Reeglite tõttu ei tohi siin ahelas kasutada programmeeritavaid seadmeid, seega töötab see ainult analoogahelate baasil. Lisaks eelnimetatud error signaalidele ühendatakse releed lahti ka olukorras, kus tarbitakse üle 5 kilovati energiat ja piduripedaali vajutatakse samaaegselt üle teatud määra üle poole sekundi. See väldib ohtlikku olukorda, kus näiteks juhtmestiku vea tõttu on jäänud kiirenduspedaal peale ja piloot vajutab ohtliku olukorra vältimiseks piduripedaali, siis poole sekundi pärast on kõik errori kriteeriumid täidetud ja kõrgepinge lülitatakse välja.

Kogu vormeli närvivõrgustiku töötamist ja vastavalt sellele mootori kontrolleri juhtimist realiseerib ECU plaat. Võidusõidumaailmas on vaja olla kursis kogu sõiduki käitumisega ja seda mõjutavate teguritega. Seetõttu tuleb üle kogu vormeli ECU-sse

analoog- ja digitaalsisendeid ning üle CAN-liidese infot, mis annavad vormeli hetkeolukorra ja soovitud olukorra kohta väärtuslikku informatsiooni. Kuna meil on iga ratta jaoks oma mootor, on võimalik iga ratast eraldi kiirusega juhtida. Selle omaduse maksimaalseks ära kasutamiseks on tehtud teise tudengi poolt Matlab-is keerukas juhtimissüsteem. See võimaldab vormelil saavutada parimat haarduvust ja juhitavust ning efektiivsemat energiatarvet.

Läbi aastate on tudengivormelite edukus võistlustel olnud otseses sõltuvuses vormeli testperioodi pikkusega. Et testperiood oleks võimalikult pikk ja efektiivne, on oluline vigu võimalikult kiiresti leida. Selleks on FEST16-l kasutusel Motec C125, mis on logimis- ja displeiseade, mis saab infot läbi CAN-liidese [5]. Peale logi alla laadimist Motecist on tarkvaras võimalik vaadata graafiliselt iga näidu muutumist ajas ja neid teiste näitudega samal ajal võrrelda. See on hea viis vigade leidmiseks ja ka piloodi analüüsimiseks. Vigade leidmiseks seisva vormeli juures reaalajas on kasutusel UART-liides, mis võimaldab UART USB konverteri abil mõnest terminal emulaator programmist plaadiga suhelda. Suhtlus toimub mõlemat pidi. Nii on võimalik ECU-ga perioodiliselt sõnumeid saata kui ka emulaatorist käskke anda, mis võimaldab veelgi paremini hetkeolukorda uurida.

Joonisel 2 on kujutatud FEST16 süsteemide ülevaade. Rohelisena on tähistatud tudengite poolt tehtavad trükkplaadid, oranžiga kõrgepingesüsteemid. Joonte peal on märgitud vastav suhtlusliides.



Joonis 2. FEST16 süsteemide ülevaade.

3 Tehnilised nõuded

Selleks, et valmiv süsteem vastaks tudengivormeli vajadustele, tuleb paika panna valmiva süsteemi eeldused. See koosneb töötingimustest, kus süsteem tööle hakkab, kokkusobivusest teiste tudengite süsteemidega ja funktsionaalsusest, mida süsteem peab sisaldama.

3.1 Töötingimused

ECU asub koos kahe teise elektroonikplaadiga akukasti elektroonikasektsioonis. Akukast koos elektroonikasektsiooniga on näha lisas 1. Akukast asub süsinik-monokokk kere sees ja on suures osas kaitstud niiskuse eest. Elektroonikasektsioon on akukastist eraldi ära käiv osa, mis võimaldab elektroonikat lihtsalt eemaldada ja vajadusel muudatusi teha.

Selleks, et elektroonika kehtaks võimalikult kaua, on oluline hoida seda lubatud töötemperatuuril. ECU plaadil ei asu ühtki komponenti millest läheb läbi väga suur vool ja tekitab seeläbi palju soojust. Trükkplaadi tootja Brandner PCB kasutatud dielektriku R-1755V temperatuur, millal see muutub elastseks on 170 °C [6]. Plaadi eluea maksimeerimiseks tasuks siiski hoiduda sellest võimalikult kaugelt.

Kuna trükkplaat asub akukastis ja akuelementide lubatud maksimumtemperatuur vastavalt võistluste reeglitele on piiratud 60 kraadi Celsiusega, siis trükkplaadi temperatuur ei saa nagunii piiravaks teguriks. Pigem on kriitilisem valitud komponentide lubatud temperatuur. Valitud komponendid taluvad vähemalt 90 °C temperatuuri, jättes piisava varu ja tagades võimalikult pika elektroonika eluea.

Kõige ohtlikumaks teguriks elektroonikale on vormeli juures vibratsioon. See võib pika peale tekitada komponentides pingeid ja halvemal juhul võib mõni komponent plaadi küljest murduda. Selle vältimiseks on valitud suuremad komponendid läbiviik-komponendid, tagades suurema mehaanilise töökindluse [7].

3.2 Kokkusbivus

Kuna elektroonikaseksioonis on 3 elektroonikaplaati laotud *pin headeritega* üksteise peale, siis on ECU füüsilise suuruse ja komponendi paigutusel eelkõige lähtunud kokkusbivusest teiste plaatidega. Kõige all asub BMS ülema plaat, ECU on selle peal ja kõige pealmine on SAFETY. ECU projekteerimisel on lähtunud sellest, et BMS ülema pistikud ei oleks ECU poolt varjatud ja valgusdiodid oleksid pealt vaadates nähtavad.

3.3 Funktsionaalsus

Selleks, et vormel oleks võimeline liikuma vastavalt piloodi soovidele, peab ECU olema kursis vormeli hetkeolekuga. Selleks on vaja lugeda ja töödelda sissetulevat infot vähemalt sagedusega 100Hz. Töödeldav info on esitatud järgmises tabelis.

Tabel 1. Vajalike infoobjektide kirjeldus.

Arv	Nimi	Liides	Märkused	Sagedus(Hz)
15	Erinevad analoogsensid	Analoog	Vormeli dünaamikat mõjutavad sisendid.	100
9	Erinevad analoogsensid	Analoog	Vormeli dünaamikat mitte mõjutavad sisendid.	1
5	Boschi kiirendussensor	CAN2	Kiirendused x-, y- ja z teljes, yaw- ja roll rate.	100
32	Mootori kontroller	CAN1	Mootorite pöörlemiskiirused, temperatuurid, voolud. Inverterite temperatuurid, olekud, errorid.	100
3	BMS	CAN2	Akupaki kõige väiksema ja suurema elemendi	1

			pinge, kogupinge.	
1	DCDC konverter	CAN2	Kogupinge	100
15	Digitaalsensorid	Digitaal	Erinevad nupud ja muud digitaallülitused.	1

Lisaks sissetulevale infole peab ECU suutma lülitada nelja väljundit, mis on toodud järgmises tabelis.

Tabel 2. Vajalikud lülitatavad väljundid.

Nimi	Pinge	Vool(A)
Veepump	12V	2
Pidurituli	24V	0,2
Sireen	24V	0,2
Mootori kontrolleri	24V	2

Sellest lähtuvalt saame paika panna ECU riistvaralised nõuded:

- 24 ADC kanalit analoogsisendite lugemiseks
- 15 GPIO-d digitaalsisendite lugemiseks
- 2 CAN siini
- 4 GPIO-d lülitavate väljundite transistorite lülitamiseks

4 Võimalikud lahendused

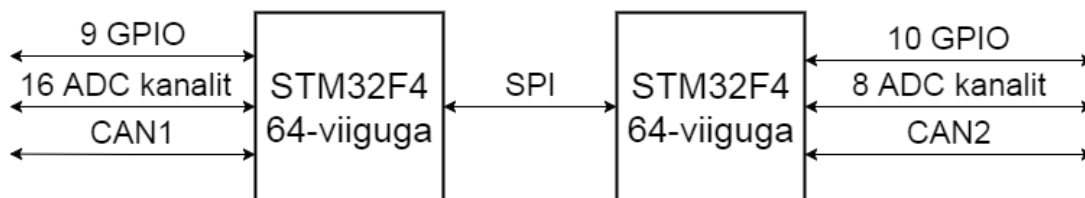
Kuna eesmärk on saavutada võimalikult väike trükkplaat, mis ühildub ka teiste süsteemidega, siis on välistatud mõne ostutoote kasutamine ja tuleb ise projekteerida trükkplaat. Trükkplaadi põhiline komponent on mikrokontroller, millest sõltuvad ka muud komponendid. Seetõttu tuleks esmalt paika panna trükkplaadi kontseptsioon.

Meeskonnal on eelnevalt palju kogemust STMicroelectronicsi STM32 mikrokontrolleritega [8]. Selle käigus on kogunenud väga palju teeke, mille ise kirjutamine võtaks tohutult aega. Seega on loogiline jätkata STM32 kasutamist ja järgnevad lahendused piirduvad STM32 kasutamisega. STM32 pakub väga erineva suunitlusega mikrokontrollerid: kõrge jõudlusega, keskmise jõudlusega ja energiasäästlikud. Mikrokontrolleri poolt kasutatav energia ei ole meie akupaki energiaga võrreldes märkimisväärne, seega ei oma mikrokontrolleri valikul energiasääst tähtsust. Kuna arvutusi tehakse suhteliselt palju ja sageli, valime oma mikrokontrolleri kõrge jõudlusega seeriast. STM32F4 seerias varieeruvad pakutavad mikrokontrollerid jalgade arvult, taksageduselt, välgmälu suuruselt, ADC-kanalite arvult ja muude liideste arvult. 64-viiguga ja 100-viiguga STM32F4-1 on 16 ADC kanalit, mis ei ole nõutud funktsionaalsuse rahuldamiseks piisav. Samas on 144-viiguga mikrokontrolleril täpselt 24 ADC kanalit. Neid kombineerides on võimalik teha erinevaid lahendusi.

4.1 Mitu väiksemat mikrokontrollerit

Kuna 64-jalalisel STM32F4-1 pole piisavalt ADC kanaleid ECU funktsionaalse rahuldamiseks, on võimalus kasutada kahte 64-jalalist STM32F4 mikrokontrollerit, millel mõlemal on 16 ADC kanalit. Joonisel 3 on kujutatud vastav kontseptsioon.

Analoogsisendite lugemine toimub kahes eraldi mikrokontrolleris, mis suhtlevad omavahel SPI-liidese kaudu. On olemas ka 4 GPIO viiku digitaalväljundite transistorite lülitamiseks ning 15 GPIO viiku digitaalsisendite lugemiseks.

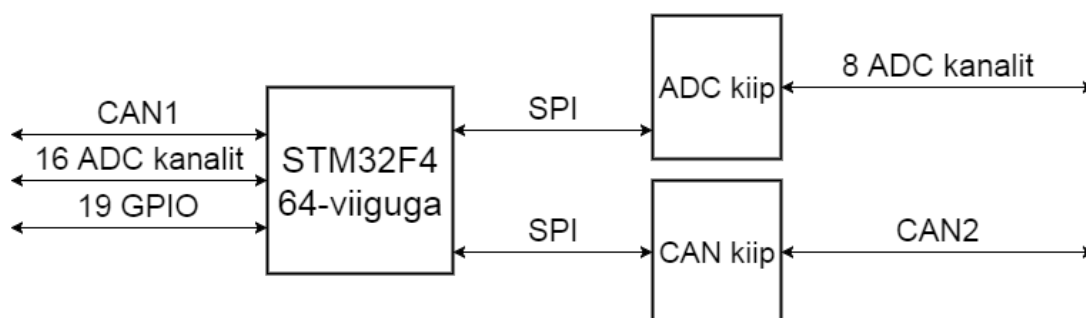


Joonis 3. Kahe väikse mikrokontrolleriga kontseptsioon.

4.2 Väike mikrokontroller koos välise ADC kiibiga

Teine võimalus on kasutada 64-jalalist STM32F4-ja ja lisada sinna mõni väline ADC kiip, millel on vähemalt 8 ADC kanalit. Joonisel 4 on kujutatud vastav kontseptsioon.

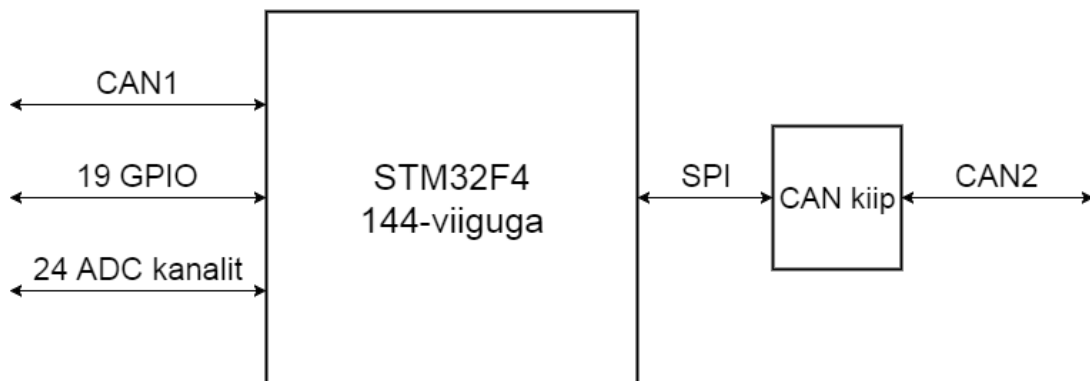
64-jalalisel STM32F4-l on küll 2 CAN-i, kuid teine kasutab siiski esimese ressursse ja mõlemad ei ole seega täisjõudlusega kasutatavad [9]. Sellepärast on lisatud väline CAN kontrolleri, mis suhtleb mikrokontrolleriga üle SPI-liidese.



Joonis 4. Väikese mikrokontrolleri ja ADC-ga kontseptsioon.

4.3 Üks suur mikrokontroller

Kolmas variant on kasutada suurt 144-viiguga mikrokontrollerit, millel on kõik ADC kanalid ühel mikrokontrolleril olemas. Samal põhjusel nagu teisel lahendusel, on ka siia lisatud CAN kontrolleri. Joonisel 5 on kujutatud vastav kontseptsioon.



Joonis 5. Ühe suure mikrokontrolleriga kontseptsioon.

4.4 Lahenduse valik

Esimesel lahendusel on mitu programmeeritavat mikrokontrollerit, mis teeb selle testimise aeganõudvamaks. Muudatus ühe mikrokontrolleri koodis võib nõuda muudatust teise mikrokontrolleri koodis.

Teisel lahendusel on ainult üks programmeeritav seade, mis teeb selle testimise eelnevast lahendusest lihtsamaks. Küll aga on sellel sõltuvus kahest teisest kiibist, mis lisab lahendusele keerukust.

Kolmas lahendus on samuti ühe mikrokontrolleriga. Erinevalt eelmisest toimub siin suhtlus ainult ühe välise kiibiga, mis teeb selle lahenduse eelmisega võrreldes vähem keerukamaks.

Lähtudes testimise ja keerukuse lihtsusest valin kolmanda lahenduse.

5 Elektroonika

Elektroonika projekteerimisel tuleb alustada peamiste komponentide valikuga, sest paljuski nendest sõltuvad muud komponendid. Sõltuvalt valitud komponentidest tuleb teha skeemid, mis ühendavad kõik komponendid. Peale seda tuleb teha füüsiline disain, paigutades komponendid trükkplaadile ja vedades nende vahele radasid.

5.1 Komponentide valik

Kõik vähemolulisemad komponendid on valitud arvestades nende väiksust. Seega enamasti on kasutusel 0402- ja 0603 korpusega takistid ja kondensaatorid. Samamoodi ka diodid, mis on kogu trükkplaadi väiksuse huvides valitud väikse SOD-323 korpusega.

5.1.1 Mikrokontroller

Valitud lahendusega piirasime oma valiku 144-väljaviiguga STM32F4-dega. Erinevatel mudelitel on erinevad korpused, taktsagedused, välmälu suurused, muutmälu suurused ja erinevad liideste arvud. Kuna trükkplaat on plaanis ise plaadile joota, siis korpuse valikul mängis rolli jootmise lihtsus. Seetõttu osutus valituks LQFP-tüüpi korpus. Kuna järele jäänud mikrokontrollerite hinnaerinevus ei olnud märkimisväärne, osutus valituks kõige suurema taktsageduse, välmälu suuruse ja muutmälu suurusega mudel STM32F437ZI [10]. Selle peamised parameetrid on:

- ARM® 32-bit Cortex®-M4 arhitektuur
- Taktsagedus 180 MHz
- Sisemine 32 kHz ostsillaator
- Toitepinge 1.7 V kuni 3.6 V
- 24 ADC kanalit täpsusega 12 bitti
- Välmälu suurus 2048 kB
- Muutmälu suurus 256 kB

- 114 I/O võimekusega väljaviiku
- 4 USART liidest
- 2 CAN liidest
- 6 SPI liidest

5.1.2 CAN kontrollerr

Kuna kasutusse läheb ainult 1 mikrokontrolleri CAN kontrollerr, siis on vaja lisa CAN kontrollerrit. Selle valikul oli tähtis 1 Mbps andmedastuskiiruse tugi, andmevahetusprotokolli SPI olemasolu ja jootmise lihtsus. Lisaks on oluline populaarsus, et internetist oleks leitavad koodinäited, sest sellega suhtlemise koodi implementeerimine ei pruugi olla üldse lihtne. Valituks osutus MCP2515-I/SO, mille peamised parameetrid on [11]:

- 18 väljaviiku
- CAN andmedastuskiirus kuni 1Mb/s
- SOIC tüüpi korpus
- SPI kiirus kuni 10 MHz
- 2 sisendpuhvrit
- 3 väljundpuhvrit
- Eraldi interrupt väljaviik
- Toitepinge 2.7 V kuni 5.5V

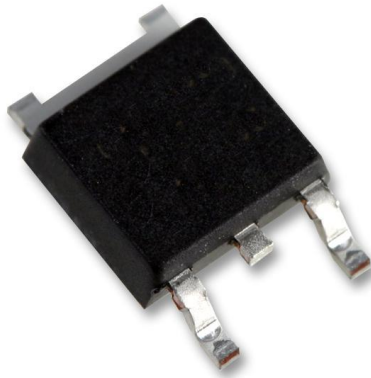
5.1.3 CAN transiiver

Eelnevatel aastatel on CAN-transiiverina kasutatud MCP2551-te. Seda on meeskond kasutanud läbi aastate probleemideta ja see on populaarne, mis ei lase selle töökindluses kõhelda. Valitud transiiveri peamised parameetrid on [12]:

- 8 väljaviiku
- SOIC tüüpi korpus
- Andmeedastuskiirus kuni 1 Mb/s
- Toitepinge 4.5 V kuni 5.5 V

5.1.4 Digitaalväljundite transistor

Transistori valimisel on lähtunud küllastuspingest, lätte ja neelu vahelisest lubatud pingest ja voolust ning korpuse väiksusest. Mikrokontrolleri I/O annab pinget 3.3V, millest MOSFET-i küllastuspinge peab olema väiksem. Tarbijad kasutavad 24V pinget ning varieeruvad tarbitavas voolus 0.2A kuni 2A. Kuna tarbijad võivad algul momentaalselt tarbida suurt voolu kondensaatorite laadimiseks, siis on siia sisse arvestatud väga suur varu. Sellest lähtudes osutus valituks STMicroelectronicsi STD40NF03LT4, mis on nähtav joonisel 6, mille peamised parameetrid on järgmised [14]:



Joonis 6. N-MOSFET STD40NF03LT4 [13].

- Küllastuspinge 1V
- Neelupinge kuni 30V
- Neeluvool kuni 20A
- Maksimaalne võimsus 80W

- Küllastustakistus 0.009Ω
- TO-252 tüüpi korpus

5.2 Skeem

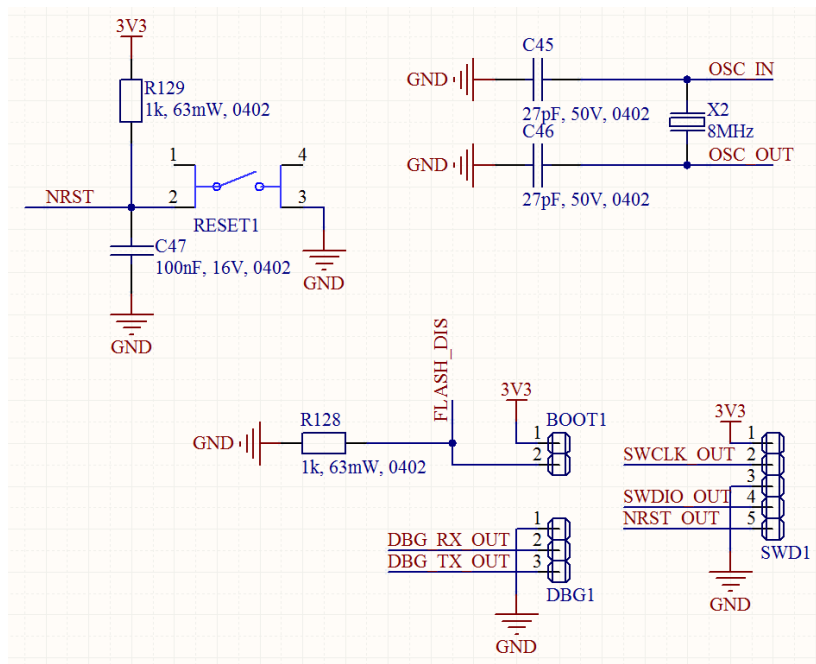
Skeemid on koostatud programmiga Altium Designer ning on jaotatud funktsiooni järgi 7-le eri lehele: mikrokontroller, analoogsisendid, digitaalsisendid, digitaalväljundid, toitepinged, CAN ja pistikud.

5.2.1 Mikrokontroller

Parima tulemuse saamiseks vajab mikrokontroller kahte eraldi toiteallikat: analoog- ja digitaaltoiteallikat. Kõik digitaalseadmed kasutavad digitaaltoidet ja analoogsensored analoogtoidet. See on selleks, et müra mis tekib digitaalseadmete transistorite voolupiikidest, tekitades järsku pingelangu, mõjutades sellega analoogahelate tööd [15]. Skeemides on kasutatud digitaaltoite nimetamiseks „3V3“ ja selle maa „GND“. Analoogetoite nimetamiseks „3V3A“ ja maa „AGND“.

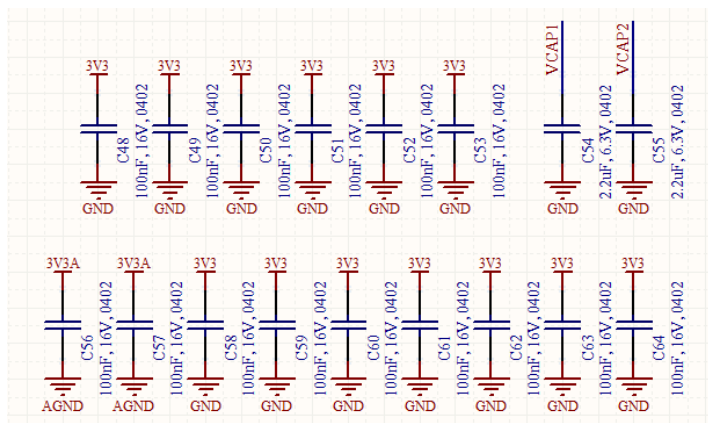
Alloleval joonise vasakul üleval on näha mikrokontrolleri välise reseti skeem, mis kontrollib mikrokontrolleri NRST väljaviiku. Tavaolekus hoiab seda kõrgel pingeniivool R129 takisti. Nuppu vajutades on NRST ühendatud otse madalasse pingeniivoolse ja mikrokontroller hakkab taaskäivitama.

Paremal üleval on väline ostsillaator, mis on juba mikrokontrollerisse sisse ehitatud ostsillaatorist oluliselt täpsem [16]. Allpool on SWD1 pistik mikrokontrolleri programmeerimiseks, DBG1 pistik, mis on mõeldud vigade otsimiseks ja mikrokontrolleris toimuvaga kursis olemiseks, sisaldades UART-liidest. Lisaks veel BOOT1 pistik, mille ühendused omavahel ühendades saame vajadusel mikrokontrollerit programmeerida UART-i kaudu.



Joonis 7. Reset, väline ostsillaator ja muud skeemid

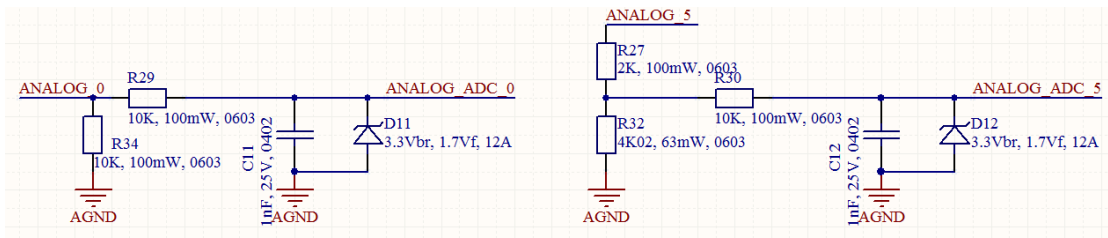
Iga mikrokontrolleri toite väljaviigu juurde on lisatud siluvad kondensaatorid, mis on nähtavad joonisel 8. See kaitseb mikrokontrollerit pingepiikide eest ja toitepinge kõikumise korral tagab mikrokontrolleri normaalse töötamise.



Joonis 8. Mikrokontrolleri siluvad kondensaatorid

5.2.2 Sisendid

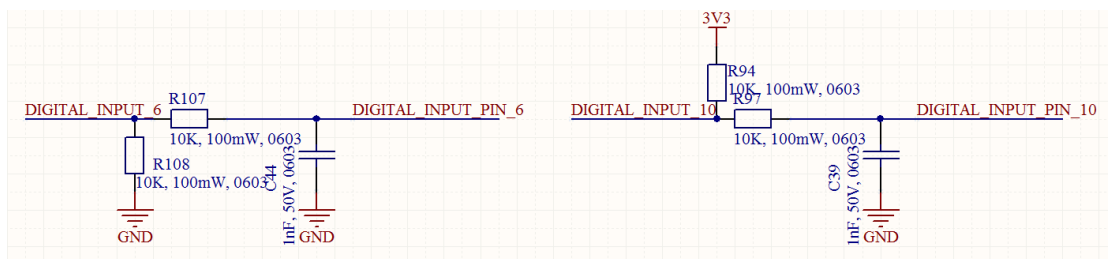
Mikrokontrolleri ADC suudab lugeda analoogtoite pingevahemikku, milleks on 0V kuni 3.3V. Kuna vormeli peal on ka 5V analoogsensoreid, tuleb nende puhul enne ADC-d pinget alandada. Järgneva joonise vasakul pool on näha tavaline mõõteahel ja paremal pool 5V sensori mõõteahel, mis teeb pingejaguri abil mikrokontrollerile pinge sobivaks. Igal mõõteahelal on RC filter(R29 takisti ja C11 kondensaator), mis kaitseb



Joonis 9. Analoogsensori mõõteahel.

mikrokontrollerit mootori kontrollerist tulevast 18kHz müra eest. Lisaks on pingepiikide kaitseks lisatud TVS-diood(D11).

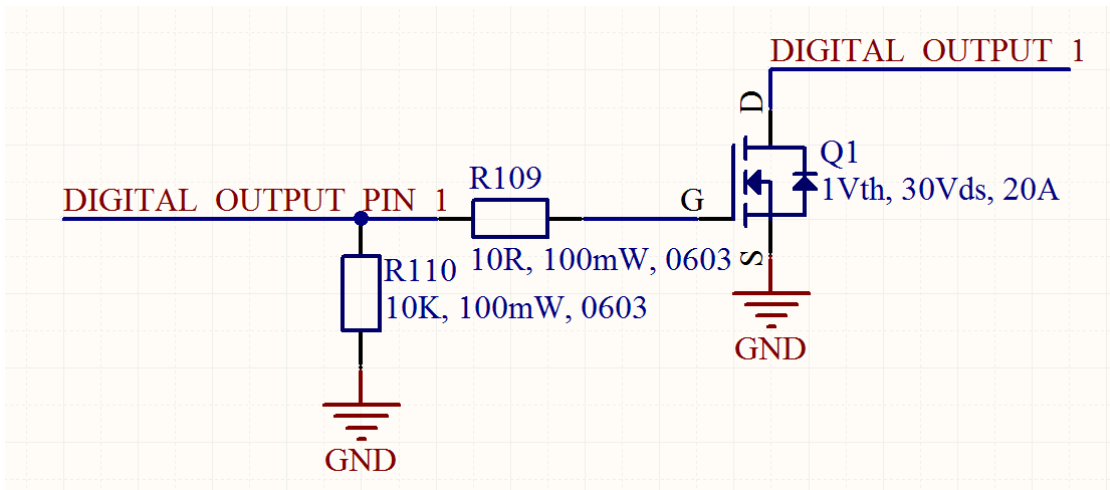
Alloleval digitaalsisendite skeemil on DIGITAL_INPUT mõõdetav digitaalsisend ning DIGITAL_INPUT_PIN on ühendatud otse mikrokontrollerisse. Samuti nagu analoogsisendi mõõteahelal on ka siin RC filter müra kaitseks. Erinevate sisendite jaoks on kasutusel erineva loogikaga skeemid. Kriitilistemate sisendite skeemid on tehtud viisil, mis juhtmestiku vea tõttu hoiaks mikrokontrolleri sisendil vormeli ja piloodi jaoks ohutut olekut. Sellega välditakse kõik võimalused vormeli iseeneslikuks liikuma hakkamiseks. Erinevad loogikad on näha alloleval joonisel.



Joonis 10. Digitaalsisendite mõõteahelad.

5.2.3 Digitaalväljundid

Alloleval joonisel kujutab DIGITAL_OUTPUT_PIN mikrokontrollerisse minevat I/O viiku, DIGITAL_OUTPUT tarbijast tulevat ühendust. Takisti R109 piirab transistori lülitamise hetkel mikrokontrollerist transistori paisu minevat voolu, kaitstes sellega mikrokontrollerit. Takisti R110 hoiab transistori paisu pinge madalana vältides mikrokontrolleri käivituse ajal tarbija volutarvet läbi transistori.

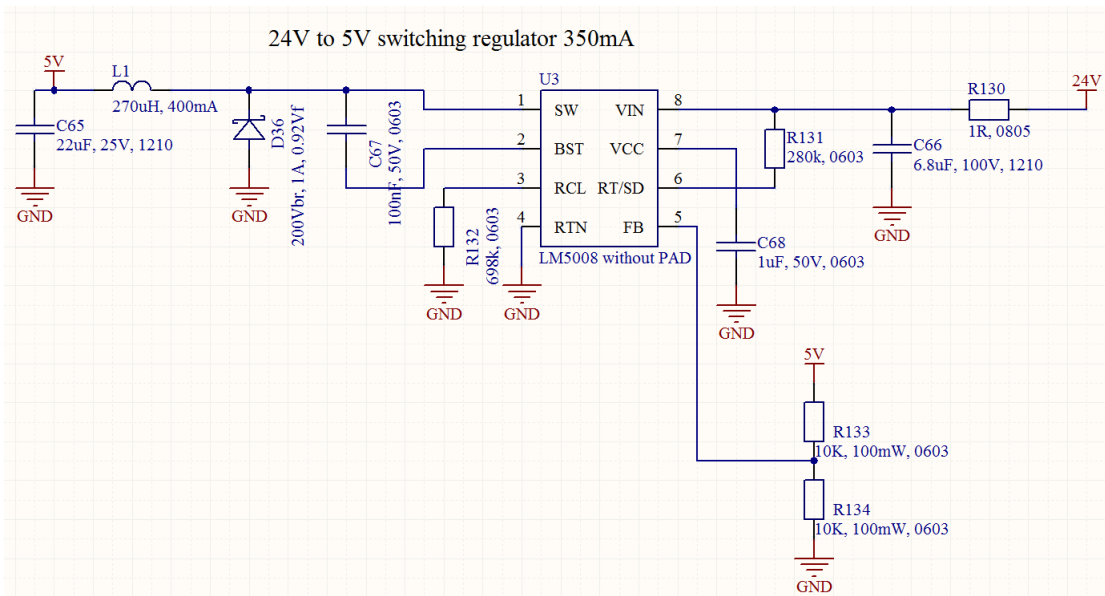


Joonis 11. Digitaalväljundite skeem.

5.2.4 Toitepinged

ECU vajab mikrokontrolleri ja sensorite jaoks eraldi 3.3V toidet analoog- ja digitaalseadmete jaoks. Lisaks 5V toidet mõne sensori ja trükkplaadil oleva kiibi toimimiseks. ECU-sse sissetulev pinge on aga 24V. Efektiivse toite saavutamiseks on 5V toite tegemiseks kasutusel impulss-stabilisaator. Analoogmõõtmiste täpsuse saavutamiseks on mõlemad 3.3V toited lineaarstabilisaatorid.

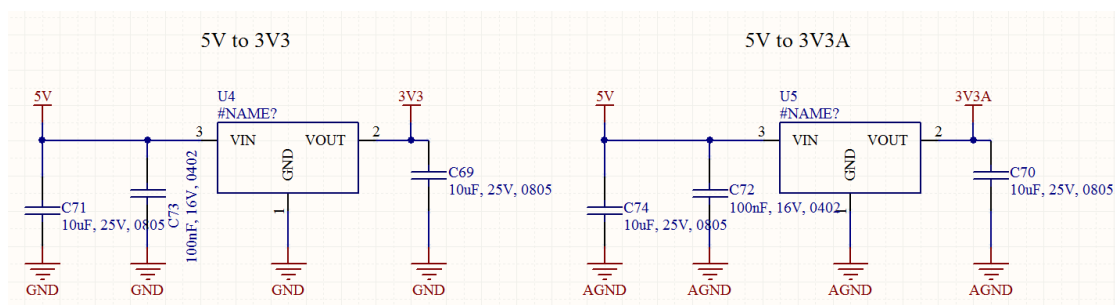
Allolev impulss-stabilisaatori skeem on tehtud lähtudes stabilisaatori andmelehest ja selle nõudmistest [17]. Väljundi pinge määrab takistite R133 ja R134 poolt



Joonis 12. Impulss-stabilisaatori skeem 24V-st 5V tegemiseks.

moodustatud pingejagur.

Ka järgnevad lineaarstabilisaatorite skeemid on koostatud andmelehe järgi [18]. Mikroskeemile on lisatud ainult mõned siluvad kondensaatorid stabiilsuse saavutamiseks. Selles mikroskeemis on väljundpinge fikseeritud.



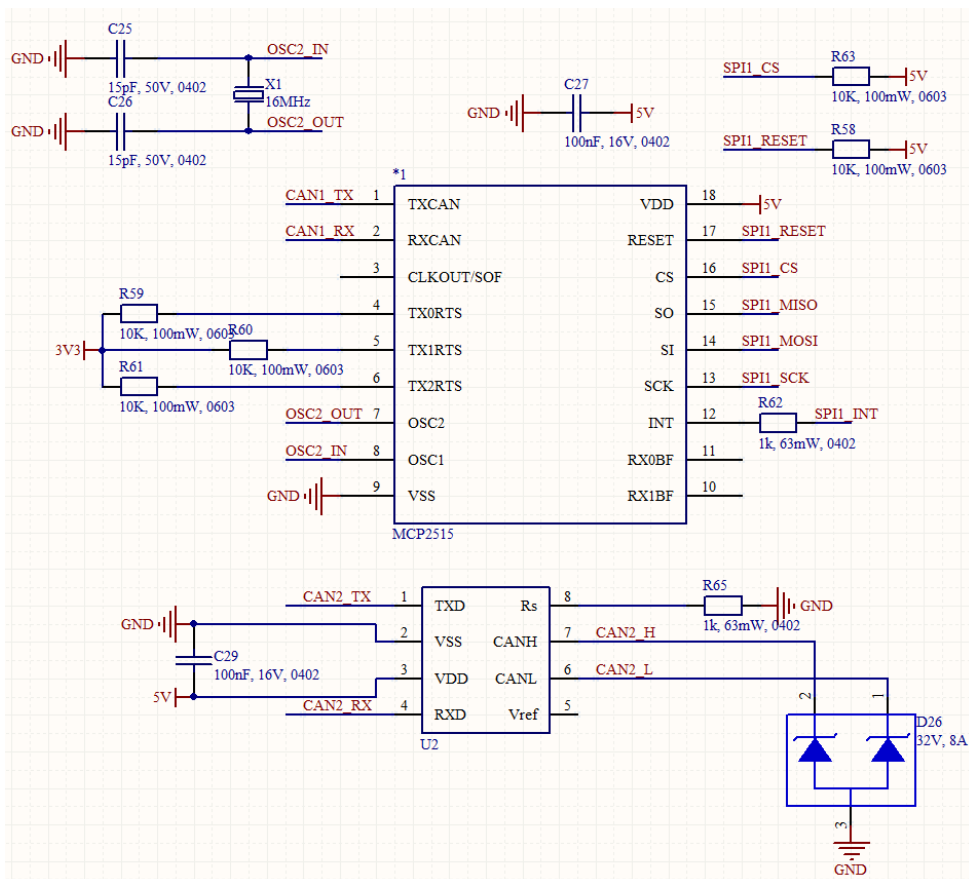
Joonis 13. Lineaarstabilisaatorite skeem 3.3V analoog- ja digitaaltoite tegemiseks.

5.2.5 CAN

Alloleval joonisel 14 on näha üleval CAN kontrolleri ja all CAN transiiveri skeem. CAN kontrolleri ja transiiveri toitepinge silumiseks on C27 ja C29 kondensaatorid. CAN kontrolleri TXnRTS viigud annavad lisavõimalusi väljundpuhvri kontrollimiseks. Seda aga antud töös ei kasutata ja seetõttu on need tõmmatud takistitega kõrgeks. CAN-i edastuskiiruse 1Mb/s saavutamiseks on lisatud 16MHz ostsillaator, mis väiksema ostsillaatori sagedusega pole võimalik.

CAN kontrolleri INT väljaviik võimaldab mikrokontrolleril teada saada, millal on uus sõnum tulnud. See aitab vähendada mikrokontrolleri ja CAN-kontrolleri vahelist SPI suhtlust. CAN kontrolleri RESET väljaviik võimaldab teha kiibile taaskäivituse selle väljaviigu madala pingega korral. Kuna kiibile toidet andes tuleb nagunii kiip uuesti konfigurereida, siis kasutan ainult tarkvaralist taaskäivitamist, sellepärast on skeemil see R58 takistiga tõmmatud kõrgeks.

Alumisel CAN transiiveri skeemil on TVS-diod D26 pingepiikide silumiseks. Rs väljaviik võimaldab kasutada kiibi erinevaid töörežiime. Antud juhul pole töörežiimi muutmiseks vajadust, sellepärast on see R65 takistiga tõmmatud madalale pingeniivoole. See viib kiibi *high-speed* töörežiimi.



Joonis 14. CAN kontrolleri ja CAN transiiveri skeem.

5.2.6 Muu

Lisas 8 on nähtavad kõik muud skeemid. Vasakul üleval on näha *pin header* ühendused teiste trükkplaatidega. Üleval keskel on valgusdiodid, mis näitavad vastava toitepinge olemasolu ning mikrokontrolleri poolt juhitud valgusdiod, mis näitab kas mikrokontroller töötab. Paremal üleval on kaitsmed, mis kaitsevad plaadilt väljaminevate ühenduste lühise eest.

Vasakul all on väljaminevad pistikud ning nende ühendused. Paremal on programmeerimise ja UART sisendite skeemid, mis on kaitstud TVS-diodidega pingepiikide vastu.

5.3 Trükkplaadi disain

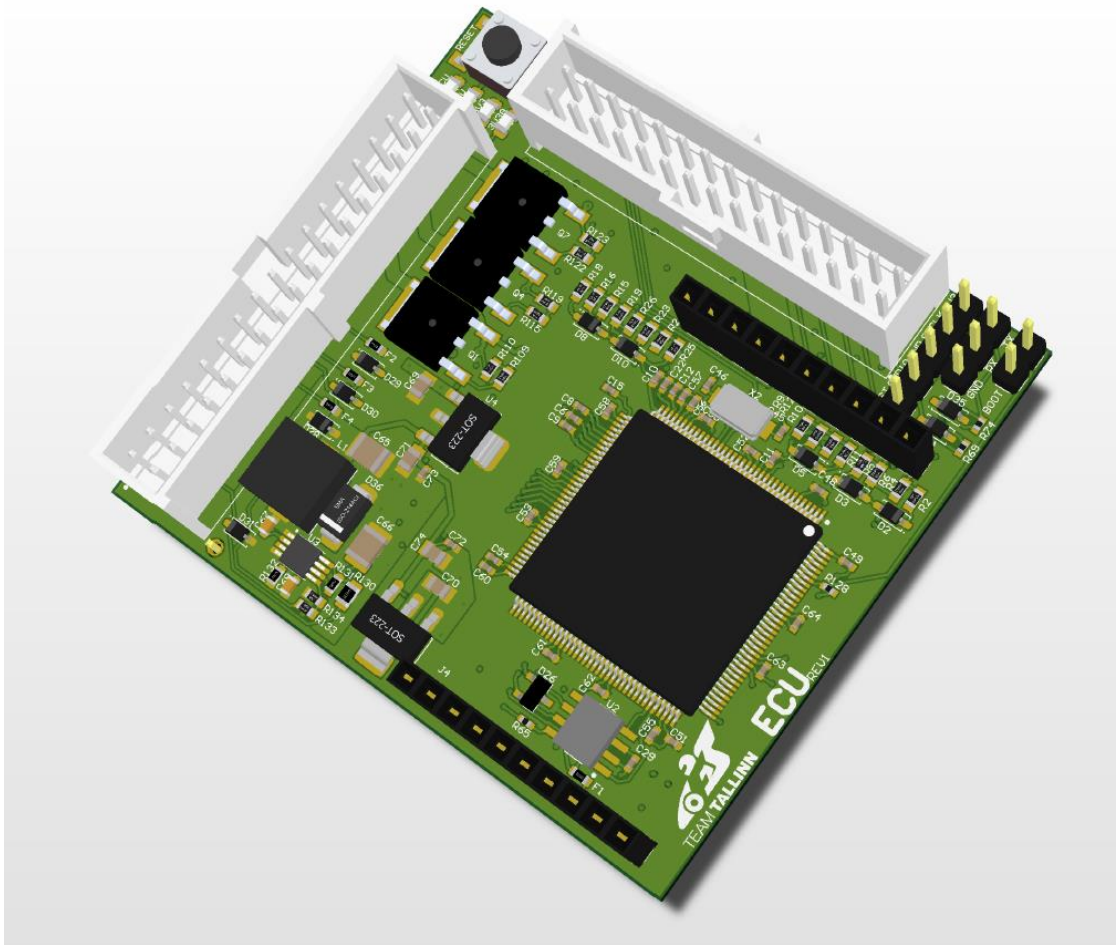
Eesmärgiga teha võimalikult väike trükkplaat, tuleb siiski arvestada ka teatud piirangutega. Sisendid ei tohi olla lähedal potentsiaalselt mürarikastele komponentidele.

See võib moonutada sisendi pingeniivood ning tekitab probleeme, mida on hiljem väga keeruline üles leida. Siluvad kondensaatorid peavad selle paremaks toimimiseks olema vastavale kiibile võimalikult lähedal. Lisaks sellele on suureks piiranguks teised trükkplaadid, mille vahel ECU asetseb. Seetõttu peab jälgima, et suuremad komponendid füüsiliselt ära mahuvad ning, et kõikide plaatide valgusdiodid oleks nähtavad ja pistikud kättesaadavad.

Trükkplaati tuleb projekteerida lähtudes selle tootja tehnilisest võimekusest. Antud trükkplaadi toodab Brandner PCB OÜ. Tegemist on väga kvaliteetse ja kiire trükkplaadi tootjaga, mis keskendub proto- ja väikeseriatele, mistõttu on neil palju kliente ka välisriikides. Lähtudes nende loengust sagedatest vigadest trükkplaadi projekteerimisel ja soovitud suurema trükkplaadi eluea saavutamiseks panen kirja mõned tähtsamad punktid, millest antud trükkplaadi projekteerimisel lähtusin:

- Läbiviikavade kasutamine vähendab trükkplaadi töökindlust. Neid tuleb kasutada arukalt. Vajadusel kasutada võimalikult suuri.
- Tuleb arvestada avade miinustolerantsiga. Tootja võib tootmisprotsesside tõttu tarnida avad väiksemana kui on projekteeritud. Seetõttu tuleks ava suurusel arvestada väikese varuga.
- Plaadi topograafia – vasepinna ühtlane jagunemine kogu plaadil. Kui projekteeritud disainil ei ole vasepind jaotunud ühtlaselt, siis parema trükkplaadi kvaliteedi nimel tuleb seda kompenseerida.
- Radade laius väheneb tootmisprotsessi käigus. Projekteerimisel tuleb varu juba sisse arvestada.

Valminud trükkplaadi pealtvaate kuvatõmmis on nähtav joonisel 15. Suure osa trükkplaadist võtavad ära pistikud. Pistikute kõrval on näha taaskäivitusnupp ja selle kõrval valgusdiodid. Paremalt servas on näha *pin headerid* programmeerimiseks ja vigade leidmiseks. Mikrokontrolleri mõlemal pool kõrval on näha *pin headerid*, kuhu ühendub SAFETY plaat. Projekteeritud ECU altvaatena on näha lisas 2. Kogu elektroonikasektsioon kokkupanduna on võimalik näha lisas 7. Kõik veetud rajad on näha erinevatel kihtidel lisades 3, 4, 5 ja 6.



Joonis 15. Projekteeritud ECU pealtvaate kuvatõmmis.

6 Kokkuvõte

Antud bakalaureusetöö tulemusel projekteerisin tudengivormelile FEST16 elektroonika kontrollüksuse, mis tagab vormeli käitumise vastavalt hetkeolukorrale ja piloodi poolt antavatele sisenditele. Samas tagab trükkplaat ka mõne teise süsteemi rikke korral vormeli ja piloodi ohutuse.

Kõige ajamahukam oli antud töö juures trükkplaadi disainil komponentide ühendusradade vedamine, sest eesmärgiks oli teha võimalikult väike trükkplaat ja kokku oli komponente umbes 300. Kuna erinevaid võimalusi oli väga palju, siis oli alati ruumi teha trükkplaati veel väiksemaks.

Kuna trükkplaadi kõik vajalikud funktsioonid on nüüdseks ühekaupa läbi testitud, saab loota, et ECU töötab ka vormeli peal eesmärgipäraselt. Võrreldes eelmise aastaga on trükkplaat oluliselt väiksem, andes ruumi juurde teistele süsteemidele.

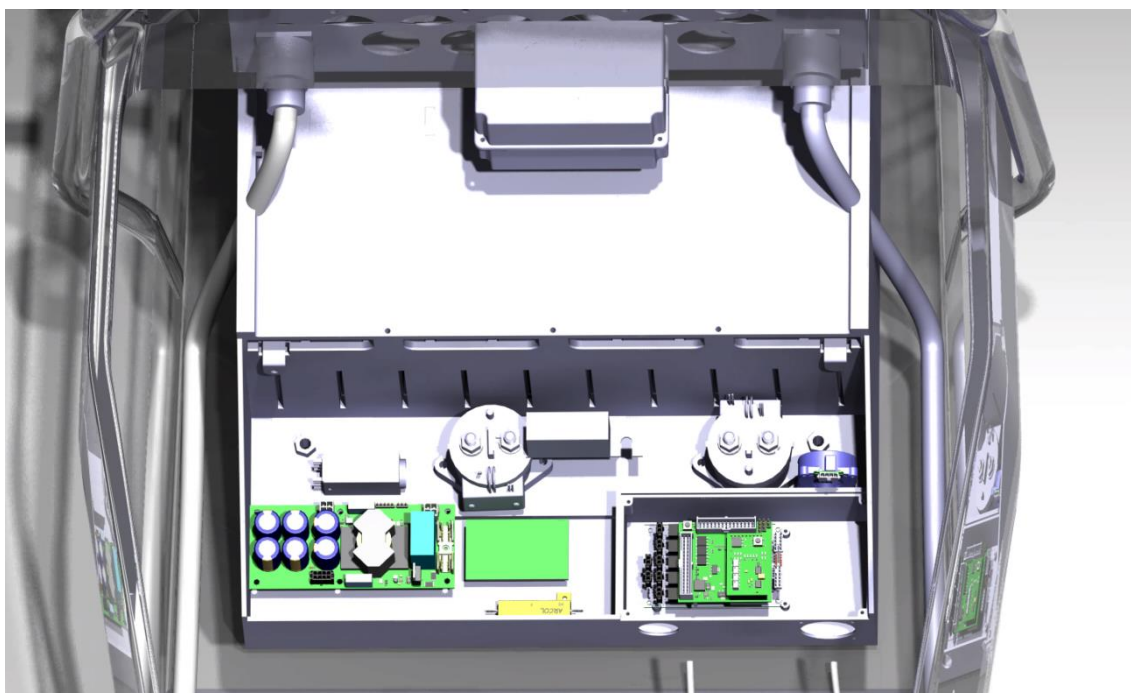
Kasutatud kirjandus

- [1] National Instruments. (2016, May) ECU Designing and Testing using National Instruments Products. [Online]. <http://www.ni.com/white-paper/3312/en/>
- [2] Greg Solberg. (2016, May) The Magic of Tesla Roadster Regenerative Braking. [Online]. <https://www.teslamotors.com/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking>
- [3] SAE International. (2016, May) 2015 Formula SAE® Rules. [Online]. http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf
- [4] Bender. (2016, May) Ground Fault Detection in Ungrounded AC/DC Systems. [Online]. <http://www.bender-us.com/knowledgebase/?a=ground-fault-detection-ungrounded-system>
- [5] Motec. (2016, May) Motec C125. [Online]. <http://www.motec.com/c125/c125overview/>
- [6] Brandner PCB. (2016, May) Panasonic Electric Works Electronic Materials Europe GmbH. [Online]. https://www.brandner.ee/webfiles/pdfs/Data%20Sheet_R-1755V_R-1650V.pdf
- [7] JR Reed. (2016, May) Through-Hole vs. Surface Mount. [Online]. <http://blog.optimumdesign.com/through-hole-vs-surface-mount>
- [8] STMicroelectronics. (2016, May) STM32 32-bit ARM Cortex MCUs. [Online]. http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html?querycriteria=productId=SC1169
- [9] STMicroelectronics. (2016, May) RM0090 Reference Manual. [Online]. http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf
- [10] STMicroelectronics. (2016, May) STM32F437ZI. [Online]. http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f4-series/stm32f427-437/stm32f437zi.html
- [11] Microchip. (2016, May) MCP2515. [Online]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21801G.pdf>
- [12] Microchip. (2016, May) MCP2551. [Online]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21667f.pdf>
- [13] Farnell. (2016, May) GE3DPAK05-40.jpg. [Online]. http://uk.farnell.com/productimages/standard/en_GB/GE3DPAK05-40.jpg
- [14] STMicroelectronics. (2016, May) N-channel 30V - 0.0090Ω - 40A - DPAK Low gate charge STripFET™ II Power MOSFET. [Online]. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ca/92/04/14/c0/6a/42/da/CD00001933.pdf/files/CD00001933.pdf/jcr:content/translations/en.CD00001933.pdf>

- [15] Hank Zumbahlen. (2016, May) Staying Well Grounded. [Online].
http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/46-06/staying_well_grounded.html
- [16] Abracon. (2016, May) MINIATURE CERAMIC SMD CRYSTAL. [Online].
<http://www.abracon.com/Resonators/abm3.pdf>
- [17] Texas Instruments. (2016, May) LM5008A. [Online].
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5008a.pdf>
- [18] STMicroelectronics. (2016, May) Adjustable and fixed low drop positive voltage regulator. [Online].
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/99/3b/7d/91/91/51/4b/be/CD00000544.pdf/files/CD00000544.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000544.pdf>
- [19] Texas Instruments. (2016, May) Texas Instruments ADS7950-Q1. [Online].
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads7957-q1.pdf>

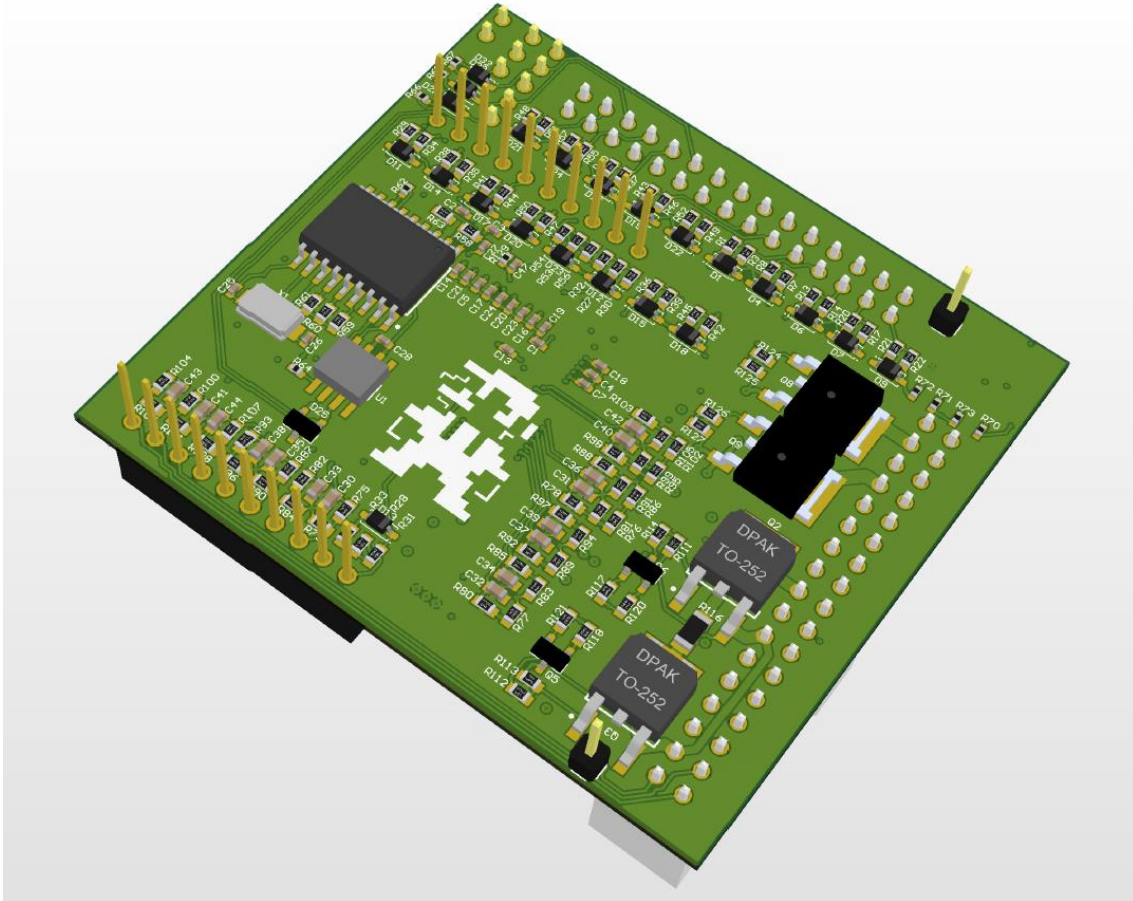
Lisa 1 – Akukast koos elektroonikasektsiooniga

Projekteeritud akukast vormeli sees. Paremalt all on näha elektroonikasektsiooni. Sellest natuke üleval peareleed. All vasakul asub DCDC-konverter kõrgepingest madalpinge tegemiseks.



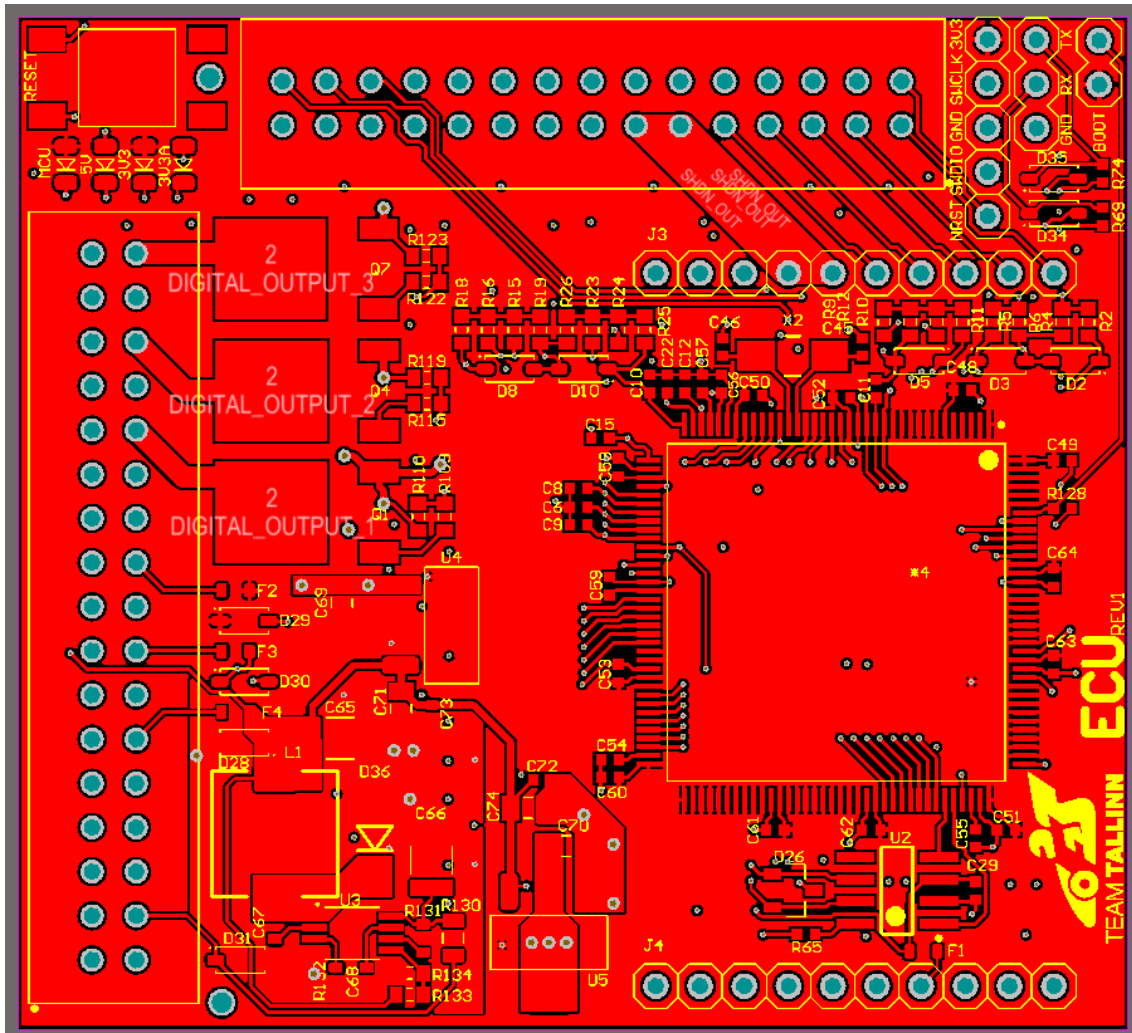
Lisa 2 – Valminud trükkplaadi altvaate kuvatõmmis

Programmis Altium Designer valminud trükkplaadi 3D-vaate kuvatõmmis.



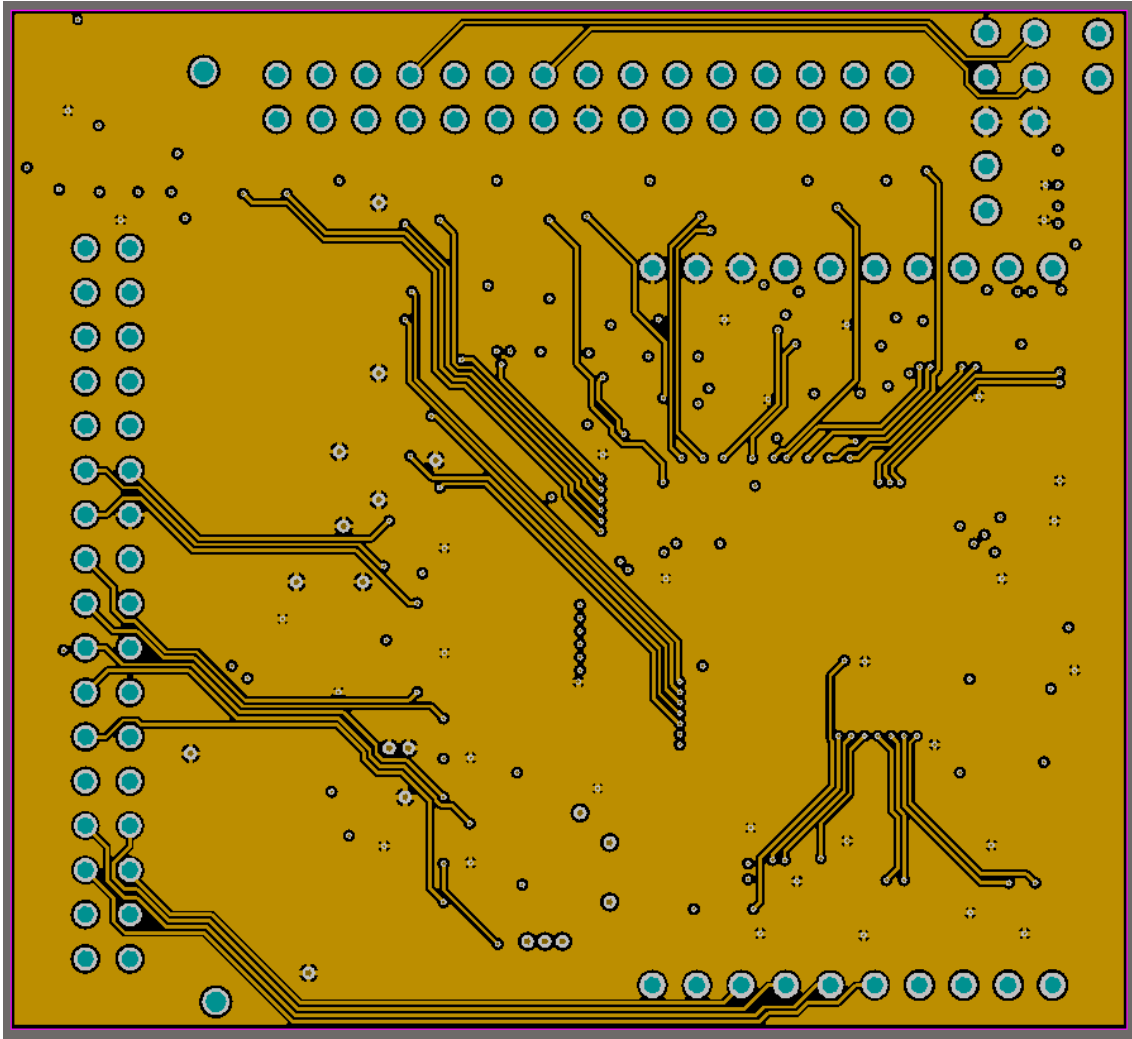
Lisa 3 – ECU esimene kiht

Punasega on märgitud vasealad. Kollasega komponentide tähised valmiva plaadi siiditrükis. Ringidena on näha läbiviikavad.



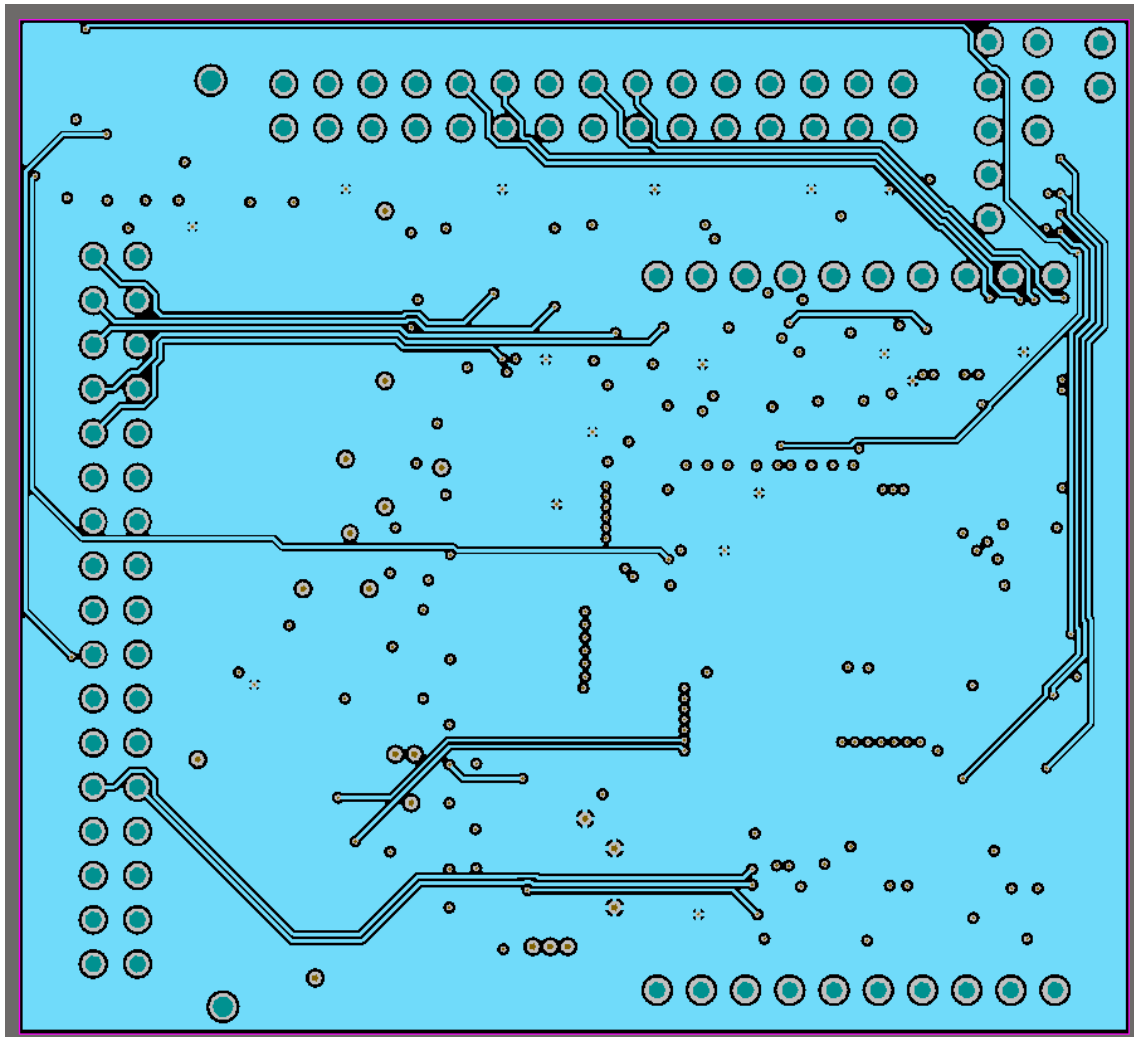
Lisa 4 – ECU teine kiht

Pruuniga on tähistatud vasealad. Ringidena on nähtavad läbiviikavad.



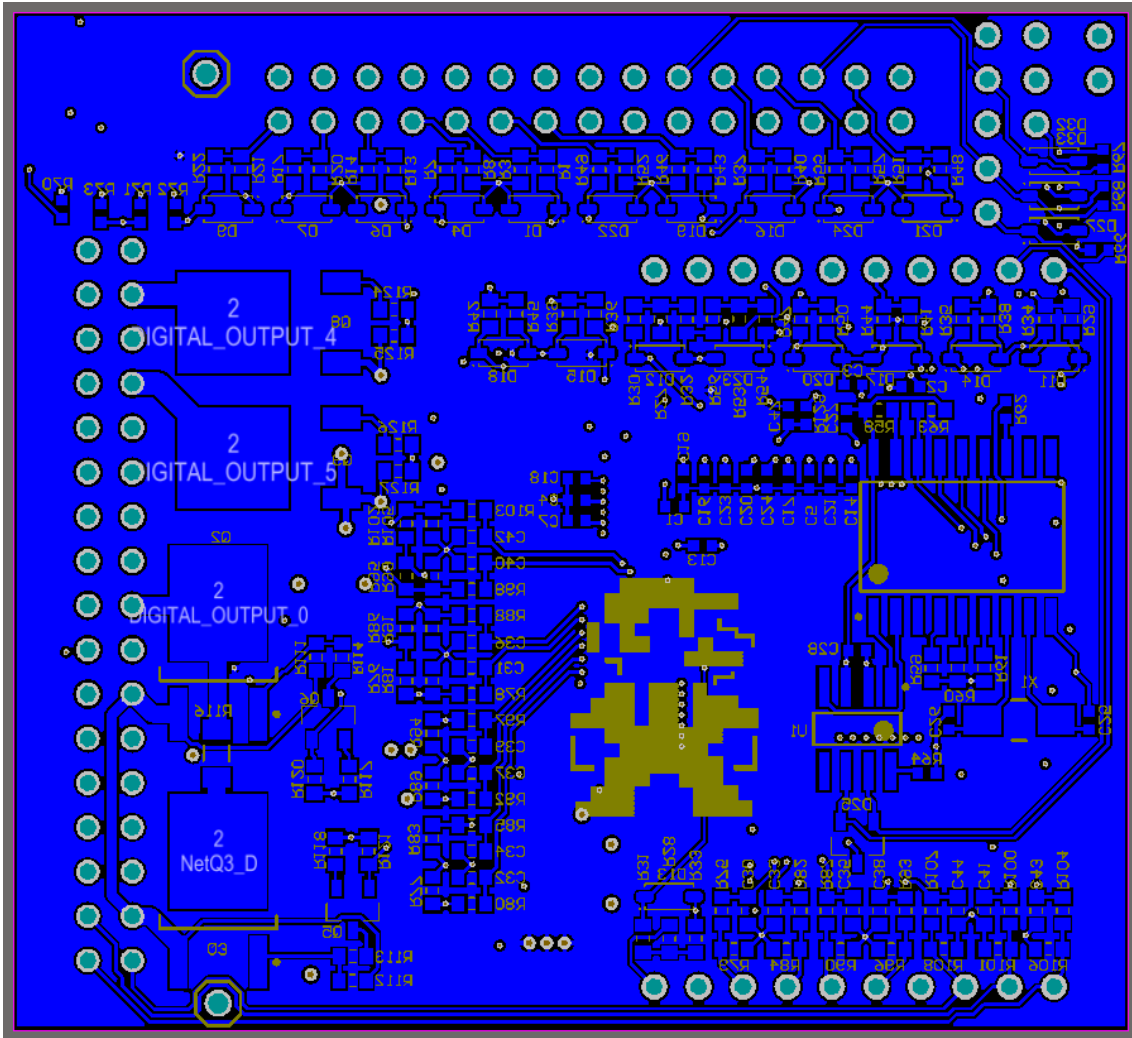
Lisa 5 – ECU kolmas kiht

Helesinisega on tähistatud vasealad. Ringidena on nähtavad läbiviikavad.



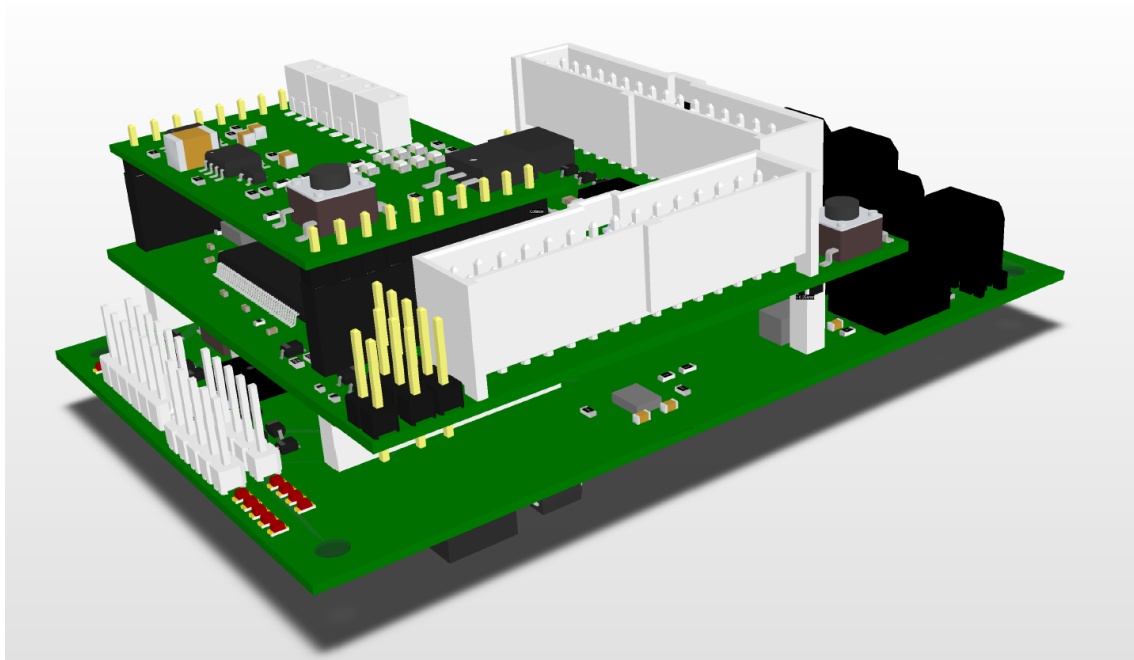
Lisa 6 – ECU neljas kiht

Sinisega on tähistatud vasealad. Ringidena on nähtavad läbiviikavad. Tumekollasena komponentide nimed, ehk siiditrükk.



Lisa 7 – BMS, ECU, SAFETY üksteise peal *pin headeritega*

Kõige alumina on BMS-ülem. Selle peal on *pin headeritega* ECU ning selle peal SAFETY plaat.



Lisa 8 – Muud skeemid

Siin on nähtavad kõik muud skeemid, mis pole lähedalt seotud teiste skeemidega.

