

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Danel Tiitma 232079IACM

Tudengivormel FEST24 elektroonika kontrollüksus

Magistritöö

Juhendaja: Peeter Ellervee
PhD

Tallinn 2025

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: Danel Tiitma

12.05.2025

Annotatsioon

Magistritöö käsitleb elektroonika kontrollüksuse ehk ECU arendust 2024. aastal valminud tudengivormelile FEST24. Elektroonika kontrollüksus vastutab mitme vormeli süsteemi juhtimise eest ning samuti mõõdab eri sensorite väljundeid. Kuna elektroonikakontrollüksuse disain kattub osaliselt varasema aasta vormeli kontrollüksusega, siis töö keskendub eelkõige arendusprotsessile ja suurematele muudatustele. Sellest tulenevalt on sisu jagatud 3 suuremaks osaks, millest esimene on varasema aasta analüüs ja vormeli kontseptsioonist tulenevalt nõuete püstitamine. Teine osa käsitleb trükkplaadi disain ja ka väiksemal määral tarkvara arendust. Viimane osa sisaldab valminud trükkplaadi põhjalikku analüüsi, kus on kirjeldatud kõiki tekkinud probleeme ja nende lahendusi. Analüüs põhineb mitme kuu pikkusel perioodil.

Testimise käigus ilmnis 3 suuremat probleemi, mis tulenesid ECU tarkvarast ning välisest elektrilisest müra. Peale probleemide põhjalikku analüüsi said kõik probleemid lahendatud. Töö tulemusena valmis elektroonika kontrollüksus, mis vastas mõningate mõõndustega kõikidele püstitatud nõuetele.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 48 leheküljel, 4 peatükki, 27 joonist, 6 tabelit.

Abstract

Electronics Control Unit for Formula Student Car FEST24

This thesis describes the development of a Electronics Control Unit (ECU) for Formula student car FEST24. ECU is responsible for controlling multiple systems of the car. The main tasks are to bridge communication over 3 different CAN buses, measure multiple sensors to get information about the car, control the cooling system and synchronize the actions with other control units in the car using drive mode finite state machine.

The first part of this thesis describes the analysis of last year's ECU and main changes due to the overall concept of the car. The main problem of last year's ECU was occasional freezing of the microcontroller at seemingly random moments. The cause was most likely due to CAN bus transmit logic in the software. Additionally, there was significant noise in the suspension travel sensor measurement result. The main change due to overall concept was the required addition of motor temperature measurement circuitry. From these the functional and non-functional requirements are defined.

The second part of the thesis covers electronics and software design according to defined requirements. Due to many similarities with the previous year's design, only the main changes are described in detail.

The final part of the thesis covers the testing and analysis of the finished ECU. This is done over a period of 8 months. During this period 3 main problems became apparent. Firstly, similar issue of microcontroller freezing as last year and additionally noise in CAN messages. Further analysis confirmed the source was due to CAN bus transmit logic in software. Secondly there was noticeable error in motor temperature measurements at certain moments due to common mode noise from high voltage inverters. Solutions for all problems are proposed and verified. In the end the designed ECU met all the defined requirements with minor concessions.

The thesis is in Estonian and contains 48 pages of text, 4 chapters, 27 figures, 6 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

FSG	<i>Formula Student Germany</i> . Saksamaal toimuv tudengivormeli võistlus
FESTxx	Aastal 20xx valminud tudengivormel
ECU	<i>Electronics Control Unit</i> , elektroonika kontrollüksus
CAN-võrk	<i>Controller Area Network</i> , autotööstuses levinud suhtlusstandard
VCU	<i>Vehicle Control Unit</i> , sõiduki kontrollüksus
Katkestus	<i>Interrupt</i> , tarkvara põhiülesannete katkestus, et täita hetkeliselt mingi muu ülesanne
ADC	<i>Analog digital converter</i> , Analoo-digitaal muundur
PTC	<i>Positive Thermal Coefficient</i> , positiivse temperatuuri kõveraga sensor
LSB	<i>Least Significant Bit</i> , vähima kaaluga bit
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> , suhtlusstandard
DC/DC muundur	Alalispingemuundur
PWM	<i>Pulse width modulation</i> , pulsisagedus modulatsioon
EMC	<i>Electromagnetic compliance</i> , elektromagneetiline ühilduvus
Via	Elektriline ühendus mitme trükkplaadi kihi ühendamiseks
FIFO	<i>First In First Out</i> , andmestruktuuri organiseerimise meetod, kus esimene lisatud element eemaldatakse ka struktuurist esimesena
Pollimine	Tarkvaras teatud ülesande perioodiline täitmine või andmete küsimine
Profileerimine	Programmi analüüs mälu kasutuse, aja või muude parameetrite leidmiseks
CRC	<i>Cyclic redundancy check</i> , veatuvastus kood, mida kasutatakse CAN protokollis

Sisukord

Sissejuhatus	11
1 Disaini sisendid	13
1.1 Tudengivormel FEST24	13
1.2 Eelnevate aastate analüüs	16
1.2.1 Elektroonika kontrollüksuse hangumine	16
1.2.2 Müra analoog sensorite mõõtmises	18
1.2.3 Müra mootorikontrolleri CAN signaalides	21
1.2.4 Mikrokontrollerist tulenevad probleemid	21
1.3 Elektroonika kontrollüksuse nõuded	23
2 Riistvara disain	26
2.1 Mootori temperatuuri mõõteahel	26
2.2 Mootorikontrolleri toitelülitus	30
2.3 CAN-võrk	32
2.4 Toitesüsteem	34
2.5 Komponentide paigutus	37
2.5.1 Referents tasandid	39
2.5.2 Pistikute paigutus	40
3 Tarkvara arendus	42
3.1 Tarkvara kihid	43
3.2 CAN liides	44
3.3 Valvetaimer	46
4 Testimine ja analüüs	47
4.1 ECU testimine	47
4.1.1 Trükkplaadi testimine	48
4.1.2 Integratsioon vormelisse	48
4.1.3 CAN-võrgu filtreerimine	49
4.2 Tekkinud probleemide analüüs	50
4.2.1 CAN-võrgu müra ja hangumine	50
4.2.2 Mootori temperatuuri mõõtmine	54

4.3 Nõuetele vastavus	57
4.4 Edasised arendused.....	59
Kokkuvõte	61
Kasutatud kirjandus	62
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	65
Lisa 2 – Elektroonika kontrollüksuse elektriskeem.....	66
Lisa 3 – Elektroonika kontrollüksuse trükkplaadi 3D vaade.....	74
Lisa 4 – Elektroonika kontrollüksuse trükkplaadi kihid.....	75
Lisa 5 – CAN sõnumite FIFO puhvri implementatsioon koodis.....	77

Jooniste loetelu

Joonis 1. Vormeli lihtsustatud juhtloogika juhiga sõitmise puhul. Värvilised ühendused tähistavad erinevaid vormelis olevaid CAN-võrke	15
Joonis 2. FEST23 ECU CAN sõnumite saatmise funktsioon.....	18
Joonis 3. CAN logi vedrustussensorite mõõtetulemustega sõidurežiimi sisselülitamise hetkel.	19
Joonis 4. FEST23 ECU trükkplaat koos mootorikontrollerite toite ja vedrustussensorite signaalide voolutedega.....	20
Joonis 5. Tudengivormeli FEST23 CAN logi mootorite kiiruse ja momendi mõõtetulemustest.....	21
Joonis 6. Ekraanipilt STM32CubeIDE keskkonnast ECU väljundite seadistamisest	22
Joonis 7. Plokkskeem elektroonika kontrollüksuse sisendite ja väljunditega	26
Joonis 8. Temperatuuri sensori PT1000 temperatuuri-takistuse graafik [12]	27
Joonis 9. Mootori temperatuuri mõõtmiseks kasutatav <i>wheatstone</i> -i sild koos madalpääsu filtriga.	29
Joonis 10. Elektroonika kontrollüksuse toiteskeemi plokkskeem	31
Joonis 11. ADuM seeria kiipide levitatava kiirguse - sagedus graafik koos ja ilma lisa mahtuvusega [23]	33
Joonis 12. CAN-võrgu sisendfiltri elektriskeem	34
Joonis 13. FEST23 ECU toiteskeemi lihtsustatud toiteskeem	36
Joonis 14 . Elektroonika kontrollüksuse trükkplaat koos alamtsoonidega. Numbrita on märgitud pistikud.....	39
Joonis 15. ECU trükkplaadi referents tasandid. 1. – üldloogika, 2 – mootorikontrolleri toide, 3 – mootoritemperatuuri mõõteahel, 4-6 – CAN-võrkude referentsid	40
Joonis 16. Plokkskeem CAN sõnumite peegeldamise loogikast. a) FEST23 loogika, b) FEST24 loogika.....	45
Joonis 17. Elektroonika kontrollüksuse vead igal ajahetkel perioodil 01.24 - 09.24. Eraldi on märgitud 3 terve perioodi vältel püsinud peamist viga.....	48
Joonis 18. Funktsioon CAN sõnumite saatmiseks.....	50

Joonis 19. CAN sõnumite saatmisfunktsiooni profileerimise tulemused. Vasakpoolses tulbas on mõõdetavad ajahetked, keskmises tulbas on üldine aeg ja parempoolses tulbas ajadelta eelmise punktiga.....	51
Joonis 20. Vedrustus sensorite mõõtetulemused algse CAN saatmise loogikaga.....	52
Joonis 21. Vedrustussensorite mõõtetulemused uuendatud CAN sõnumite saatmise loogikaga	53
Joonis 22. CAN logi iga CAN-võrgu saadetavate sõnumite maksimaalsest puhvri pikkusest vormeli sõitmise ajal	53
Joonis 23. Ekraanipilt CAN logist. Graafikul on näha ülevalt alla on vormeli kiirus, sõidurežiimi olek ja ühe mootori temperatuur.....	54
Joonis 24. <i>Wheatstone</i> silla väljundpinged referentsi suhtes. a) + väljund, b) – väljund. Mõlema mõõtmise ajal on vormel sõidurežiimis.	55
Joonis 25. Mootori temperatuuri sensori mõõtmiseks kasutatav <i>wheatstone</i> sild koos muudetud madlapääsufiltriga	56
Joonis 26. CAN logi temperatuuri mõõtetulemustest pärast madalpääsufiltri muutmist	57
Joonis 27. FEST24 ECU (vasak) ja FEST23 ECU (parem) trükkplaatide võrdlus.....	58

Tabelite loetelu

Tabel 1. Vormeli teoreetiline CAN-võrgu võrgukoormus eri olekutes ning kui suure osa võrgukoormusest on ECU saadetavatest sõnumitest tingitud.....	17
Tabel 2. Elektroonika kontrollüksuse funktsionaalsed nõuded. Rasvases kirjas on nõuded, kus on suuremad muudatused võrreldes varasema aastaga	24
Tabel 3. Elektroonika kontrollüksuse mittefunktsionaalsed nõuded.....	25
Tabel 4. ECU komponentide tarbimine eri pingetasandite juures.....	35
Tabel 5. DC/DC muunduri ja lineaarregulaatori parameetrite võrdlus	35
Tabel 6. ECU perioodilised tarkvara protsessid koos täitmise sagedusega.....	43

Sissejuhatus

Tudengivormel on tootearendusvõistlus, millest võtavad osa tudengid eri tehnikaülikoolidest üle maailma. Võistlussarja eesmärk on igal aastal disainida ja valmis ehitada vormel-stiilis ühekohaline võidusõiduauto, millega võisteldakse rahvusvahelistel võistlustel. Euroopas toimuvad võistlused järgivad Saksamaal korraldatava võistluse FSG reeglistiku [1]. Võistlused koosnevad dünaamilistest ja staatilistest alades. Dünaamilisteks aladeks on erinevad raja peal sõidetavad alad, kus on oluline vormeli kiirus ja kurvisuutlikus. Staatilisteks aladeks on vormeli disaini kaitsmine, tuluaruanne ning äriplaan, kus tudengid peavad näitama oma teadmisi ja põhjendama tehtud disainiotsuseid.

Tudengivormeli meeskond *Formula Student Team Tallinn* loodi aastal 2006. Meeskond koosneb Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli tudengitest. 2008 valmis meeskonna esimene sisepõlemismootoriga tudengivormel FEST08. Alates 2013. aastast on ehitatud elektrivormeleid ning 2024. aastal valmis meeskonna 12. elektrivormel FEST24. [2]

Magistritöö käsitleb elektroonika kontrollüksuse ehk ECU arendust tudengivormelile FEST24. Tudengivormeli elektroonika kontrollüksus juhib mitmeid vormeli süsteeme. Peamised ülesanded on mitme CAN-võrgu vahelise suhtluse haldamine, teiste kontrollüksustega tegevuste sünkroniseerimine olekumasina abil, jahutussüsteemi juhtimine ning erinevate sensorite mõõtmine.

Töö peamine eesmärk on lahendada eelneva aasta disainis esinenud probleemid ning implementeerida kõik muud vajalikud muudatused. Seetõttu on keskendutud peamiselt arendusprotsessile ja suurematele muudatustele ECU disainis. Järgnevalt on täpsemalt toodud töö põhi ülesanded, mis kattuvad suuresti sisu peatükkidega:

- Defineerida tudengivormeli FEST24 kontseptisoonist tulenevad ECU disaini muudatused.

- Eelneva aasta disaini analüüs. Peamiste probleemide kirjeldamine, põhjuse otsimine ja võimalike lahenduste püstitus.
- Vastavalt eelnimetatutele püstitada ECU funktsionaalsed ja mittefunktsionaalsed nõuded.
- Nõuetest tulenev ECU riistvara ja tarkvara arendus. Eelkõige on käsitletud suuremaid muudatusi koos kõikide vajalike põhjenduste, arvutuste ja allikatega
- ECU testimise tulemused ja analüüs 8 kuu pikkuse perioodi põhjal alatest trükkplaadi valmimisest kuni võistlusperioodi lõpuni. Sealhulgas kõikide tekkinud probleemide analüüs koos lahendustega.
- Kontrollida püstitatud nõuetele vastavust. Nendest tulenevalt defineerida võimalikud edasiarendused järgneva aasta elektroonika kontrollüksuse disainis.

1 Disaini sisendid

Elektrivormel on keeruline süsteemide süsteem. Iga komponendi või alamsüsteemi disaini puhul peab arvestama väga paljude teiste komponentidega ning ka vormeli kui tervikuga. Sama kehtib ka elektroonika kontrollüksuse puhul, mille disain sõltub väga paljudest teistest alamsüsteemidest. Samuti pärinevad paljud disaini sisendid varasemate aastate vormelitel.

1.1 Tudengivormel FEST24

Peamine sisend iga vormeli komponendi, sealhulgas ECU, puhul on vormeli üldine kontseptsioon ning sellest tulenevad suuremate alamsüsteemide kontseptsioonid. Tudengivormeli FEST24 tähtsamad parameetrid on:

- Nelikveoline elektrivormel – 4 eraldi juhitavat elektrimootorit.
- Akupakk – ping 600V, mahutavus 7,2 kWh
- *AMK racing kit* mootorikontrollerid [3]. Mootorikontrollerid sisaldavad kõrgepinge vaheldit, kogu vajalikku sensorikat ning juhttarkvara.
- Süsinik monokokk koos aerodünaamika elementidega
- 20+ isearendatud trükkplaati ja sensorit
- Suhtlus üle CAN-võrgu

Peamiselt mõjutab ECU disaini vormeli jõuülekanne ja madalpingesüsteem. Muud alamsüsteemid mõjutavad ECU disaini vähemal määral.

Kõige suurem ECU-t mõjutav muudatus tuleneb jõuülekandest. Vormeli jõuülekandest on varasematel aastatel olnud kasutusel *AMK racing kit* [3], mis sisaldab nii elektrimootoreid kui ka mootorikontrollereid. Komplekti vormelisse integreerimiseks on vaja 24 V toitepinget ja kahte CAN-võrgu ühendust, mis kõik on ühendatud ECU-ga. FEST24-l on kasutusel uued mootorid, aga mootorikontroller on jätkuvalt sama. Mootori ja kontrolleri

vaheline ühilduvus toimib samamoodi, ainuke erinevus on mootorite temperatuuride mõõtmine. Põhjuseks on, et mootorikontrollerites olev temperatuurimõõteahel ei ole piisavalt täpne, et mõõta uutes mootorites olevaid temperatuurisensoreid. Süsteemi lihtsuse säilitamiseks tuleb mootoritemperatuuri mõõtahel implementeerida ECU trükkplaadil.

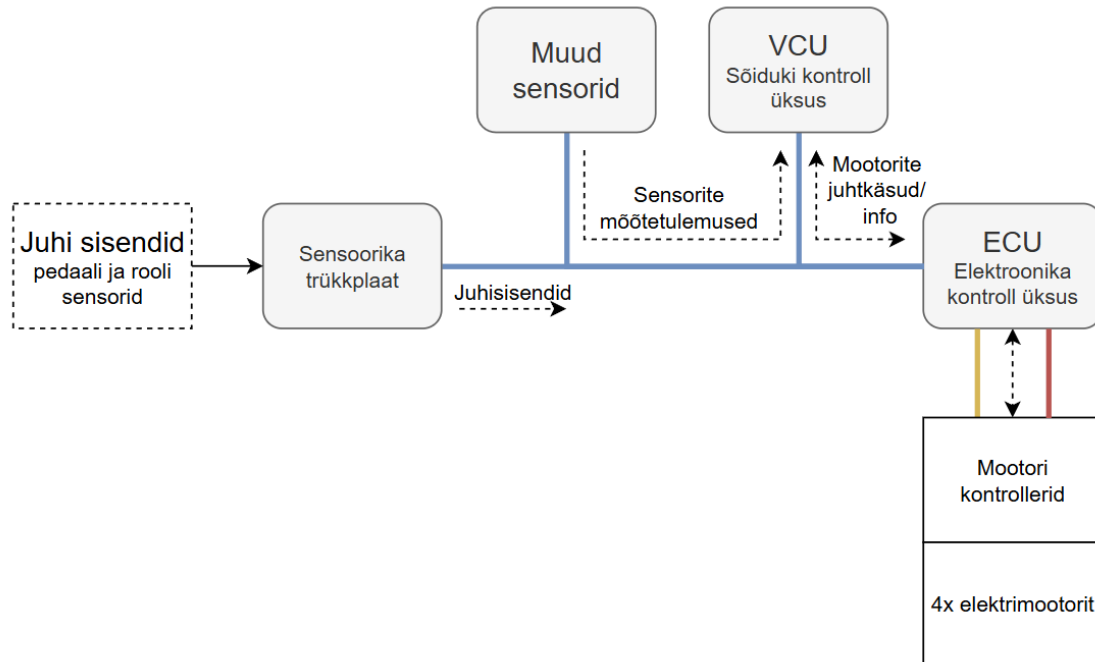
Vormeli madalpingesüsteemis ei ole suuremaid muudatusi võrreldes varasema aastaga, mis mõjutaks elektroonika kontrollüksust. Sellest hoolimata on ECU disain sellega tugevalt seotud. Tudengivormeli madalpingesüsteem koosneb rohkem kui kahekümnest erinevast tudengite poolt arendatud trükkplaadist ning paljudest erinevatest sensoritest ja muudest ostutoodetest. Vormeli elektroonikasüsteem on üles ehitatud kasutades hajutatud arhitektuuri. Vormelis on kokku 7 erinevat kontrollüksust, mis vastutavad eri süsteemide juhtimise eest ning kogu nende vaheline suhtlus toimub üle CAN-võrgu. Lihtsustatult saab aga vormeli madalpingesüsteemi ülesanded jagada kaheks:

- Vormeli juhtloogika – Eri sensorid vormeli oleku ja juhi sisendite tuvastamiseks. Vastavalt nendele ja juhtimissüsteemi arvutustele edastada mootorikontrolleritele juhtkäsud.
- Turvalisuse tagamine – erinevad riistvaralised ja tarkvaralised turvasüsteemid, mis tagavad vormeli kui ka juhi turvalisuse. Samuti erinevad sensorid, mis võimaldavad jälgida vormeli olekut.

ECU-l on suur roll mõlemas. Vormeli mootorite juhtloogika lihtsustatud ülevaade on näha Joonis 1.

- „Sensorika“ trükkplaat mõõdab erinevate sensoritega pedaaliasendeid ja roolinurka. Trükkplaat edastab need väärtused üle CAN-võrgu muudele kontrollüksustele.
- VCU peal on vormeli juhtimissüsteem, kus arvutatakse juhisisendite ja muude sensori sisendite põhjal mootorite juhtkäsud, mis edastatakse üle CAN-võrgu ECU-le.

- ECU edastab VCU-lt saadud info mootorikontrolleritele. Samuti saab ECU mootorikontrolleritelt andmeid, mille ECU edastab CAN-võrku. Need andmed on ka üheks sisendiks VCU juhtkäskude arvutamiseks.



Joonis 1. Vormeli lihtsustatud juhtloogika juhiga sõitmise puhul. Värvilised ühendused tähistavad erinevaid vormelis olevaid CAN-võrke

Juhtimisloogikale lisab keerukust, et vormel on võimeline sõitma ka ilma juhita. Juhita sõitmise puhul saadakse kõik sisendid sensoritelt ning mootorite juhtkäskud arvutab eraldi arvuti. Selle kõige jaoks on ECU peal sõidurežiimi lõplik olekumasin, mis vastavalt vormeli olekule haldab kõikide vormeli kontrollüksuste toimimist ning edastab õige sisendi mootorikontrolleritele.

Vormeli turvasüsteem on samuti hajutatud. Lisaks reeglitest tulenevatele eraldisesvatele riistvaralistele turvasüsteemidele [1] on iga kontrollüksusel implementeeritud erinevaid turvasüsteeme ja veatuvastus mehhanisme. Näiteks ECU võrdleb „sensoorika“ trükkplaadilt saadud pedaalipositsioonide ja VCU-lt saadud mootorikontrollerite juhtkäskude loogilisust ja veaolukorra korral ei edasta juhtkäskude mootorikontrolleritele. Lisaks sellele jälgivad kõik kontrollüksused CAN-võrgu andmevahetust, ning mõne kontrollüksuse hangumisel viga tuvastatakse ja vormel läheb turvarežiimi.

Lisaks eelnimetatutele on ECU-l veel mitmeid muid ülesandeid. Valdav enamus nendest on võrreldes eelneva aastaga muutumata. Vormelil on vesijahutussüsteem

mootorikontrollerite ja mootorite jahutamiseks. ECU juhib jahutussüsteemi veepumpa ja ventilaatoreid ning mõõdab mitmes punktis vee temperatuuri. Lisaks on ECU-l veel mitmeid lihtsamaid ülesandeid nagu piduritule juhtimine, tagumiste pidurite temperatuuri mõõtmine ja vormeli turvaahela pinge mõõtmine ühes punktis.

1.2 Eelnevate aastate analüüs

Iga vormeli disaini puhul tulevad paljud sisendid eelnevate aastate vormelite analüüsist. See võimaldab välja selgitada suurimad probleemid, millele tuleb lahendused leida. Samuti leiab positiivsed omadused, mida säilitada või edasi arendada. Sama lähenemist on kasutatud ka elektroonika kontrollüksuse puhul. Allpool on täpsemalt kirjeldatud eelmise aasta vormeli FEST23 peamised elektroonika kontrollüksuse probleemid.

1.2.1 Elektroonika kontrollüksuse hangumine

FEST23 ECU peamine probleem oli mikrokontrolleri hangumine. Viga tekkis pealtnäha suvalistel hetkedel ja erineva sagedusega, mistõttu on probleemi põhjuse leidmine keeruline. Probleem esines kõige tihedamini olukordades, kus vormel seisab ning mootorikontrollerite madalpingetoide on sisse lülitatud aga kõrgepinge veel ei ole. Sellest saab järeldada, et suure tõenäosusega ei ole probleem tingitud elektrilisest müra. Kõige suurem elektrilise müra allikas vormelis on kõrgepinge vaheldi ja elektrimootorid. Vea tekkimise ajal ei ole aga kõrgepingeahel pingestatud.

Vea kõige tõenäolisem põhjus tuleneb CAN sõnumite peegeldamise loogikast. Vormelis on mitu eraldiseisvat CAN-võrku, mis on näha Joonis 1. Üks ECU ülesandeid on peegeldada sõnumeid mootorikontrolleri CAN-võrkude ja vormeli üld CAN-võrgu vahel ehk edastada sõnumeid mõlemat pidi ühest võrgust teise. Sellele lisaks saadab ECU ise erinevaid CAN sõnumeid ja võtab üld CAN-võrgust ka neid vastu. Mootorikontrollerite sisse lülitamisel suureneb ECU edastavate sõnumite andmemaht mitmekordsel ning ECU sõnumid moodustavad 46% kogu üld CAN-võrgu võrgukoormusest ehk *bus load*-ist. Võrgukoormused eri olukordades on näha Tabel 1. Samuti on näha kui suure osa sellest moodustavad ECU poolt saadetavad sõnumid. Võrgukoormus näitab vastavalt valemile (1) protsentuaalselt, kui suur andmemaht üle võrgu edastatakse maksimaalsest võimalikust. Valemis on n erinevate saadetavate sõnumite arv, f_i on ühe saadetava sõnumi saatmissagedus, $kaadri_pikkus_i$ on vastava sõnumi kaadripikkus ja $f_{võrk}$ on

võrgusagedus 1 Mbit/s. Kuna ühe sõnumi kaadripikkus ei ole konstante, siis teoreetiline võrgukoormus on antud vahemikuna [4].

Tabel 1. Vormeli teoreetiline CAN-võrgu võrgukoormus eri olekutes ning kui suure osa võrgukoormusest on ECU saadetavatest sõnumitest tingitud.

Vormeli olek	Üld CAN-võrgu võrgukoormus	ECU saadetavate sõnumite võrgukoormus
Ainult madalpinge sisse lülitatud	35% - 44%	4% - 5%
Madalpinge koos mootorikontrolleritega sisse lülitatud	57% - 70%	26% - 32%
Kõrgepinge on sisse lülitatud ja vormel sõidab	68 - 84%	26% - 32%

$$\sum_{i=0}^{n-1} = \frac{f_i * \text{kaadri_pikkus}_i}{f_{\text{võrk}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Tõenäoliselt põhjustab suurenenud andmemahut häiringuid mikrokontrolleri tarkvaras. FEST23 ECU peal on kasutusel reaalaaja operatsioonisüsteem freeRTOS [5]. Eri ülesanded on jagatud prioriteetide järgi tegumiteks, mida teostatakse perioodiliselt. CAN sõnumite peegeldamine on aga tehtud selle väliselt kasutades katkestusi, mis on kõige kõrgema prioriteediga. Sõnumi vastuvõtmisel tekitatakse katkestus, ning sõnum edastatakse kohe teise CAN-võrku. Sellise struktuuri eesmärk on minimaliseerida mootorikontrolleritele saadetavates juhtkäskude ja muu kriitilise info latentsust. Igasugune latentsus võib halvendada vormeli sõidetavust ja võib olla teatud olukordades ka ohtlik. Teoorias toimib selline lahendus hästi, aga suurema koormuse puhul, kus ECU peab edastama palju CAN sõnumeid, võib mitu katkestust tekkida samaaegselt või väga väikeste vahedega järjest. Koodis ei ole ka funktsionaalsust, mis takistaks mitmel katkestusel muutujaid samal ajal muuta. See võib põhjustada andmete korrumppeerumist, perioodiliste tegumite pikaks ajaks tagaplaanile jäämist kui ka mikrokontrolleri üldist hangumist.

Vea tekkimise tõenäosust suurendab katketuste ajaline pikkus. Joonis 2 on näha funktsioon, mis kutsutakse välja iga CAN sõnumi saatmisel. Mikrokontrolleril on CAN sõnumite saatmiseks riistvaraline register ning funktsiooniga `HAL_FDCAN_AddMessageToTxFifoQ()` lisatakse saadetav sõnum vastavasse registrisse, kust saadetakse sõnum automaatselt välja. Kõik eelnevad read on CAN sõnumi

parameetrite seadistamiseks. Kuna aga register on limiteeritud suurusega, tuleb tagada, et mitme samaaegselt või järjestiku saatetava sõnumi puhul ei saaks register täis. Selle jaoks on funktsiooni lõpus *while* tsükel, mis tagab, et puhvris oleks vähemalt 2 vaba kohta, enne kui funktsioon lõpetatakse. See aga võib teatud juhtudel tekitada olukorda, kus kood jääb tsükklisse kinni kas pikemaks ajaks või lõpmatult. Eriti tõenäoline on see olukorras, kus CAN-võrgu võrgukoormus on kõrge. Seetõttu saab eeldada, et mikrokontrolleri hangumine võib tuleneda sellest funktsioonist. Siiski ei saa kindlalt väita probleem tuleneb sellest ning ECU disaini puhul peab arvestama ka muude võimalustega.

```
void fdcan3_transmit_handler(FDCAN_msg *msg){
    FDCAN_TxHeaderTypeDef txHeader;

    txHeader.Identifier = msg->id;
    txHeader.IdType = msg->ide ;
    txHeader.TxFrameType = FDCAN_DATA_FRAME;
    txHeader.DataLength = msg->len;
    txHeader.ErrorStateIndicator = FDCAN_ESI_ACTIVE;
    txHeader.FDFormat = FDCAN_CLASSIC_CAN;
    txHeader.BitRateSwitch = FDCAN_BRS_OFF;
    txHeader.TxEventFifoControl = FDCAN_NO_TX_EVENTS;
    txHeader.MessageMarker = 0;

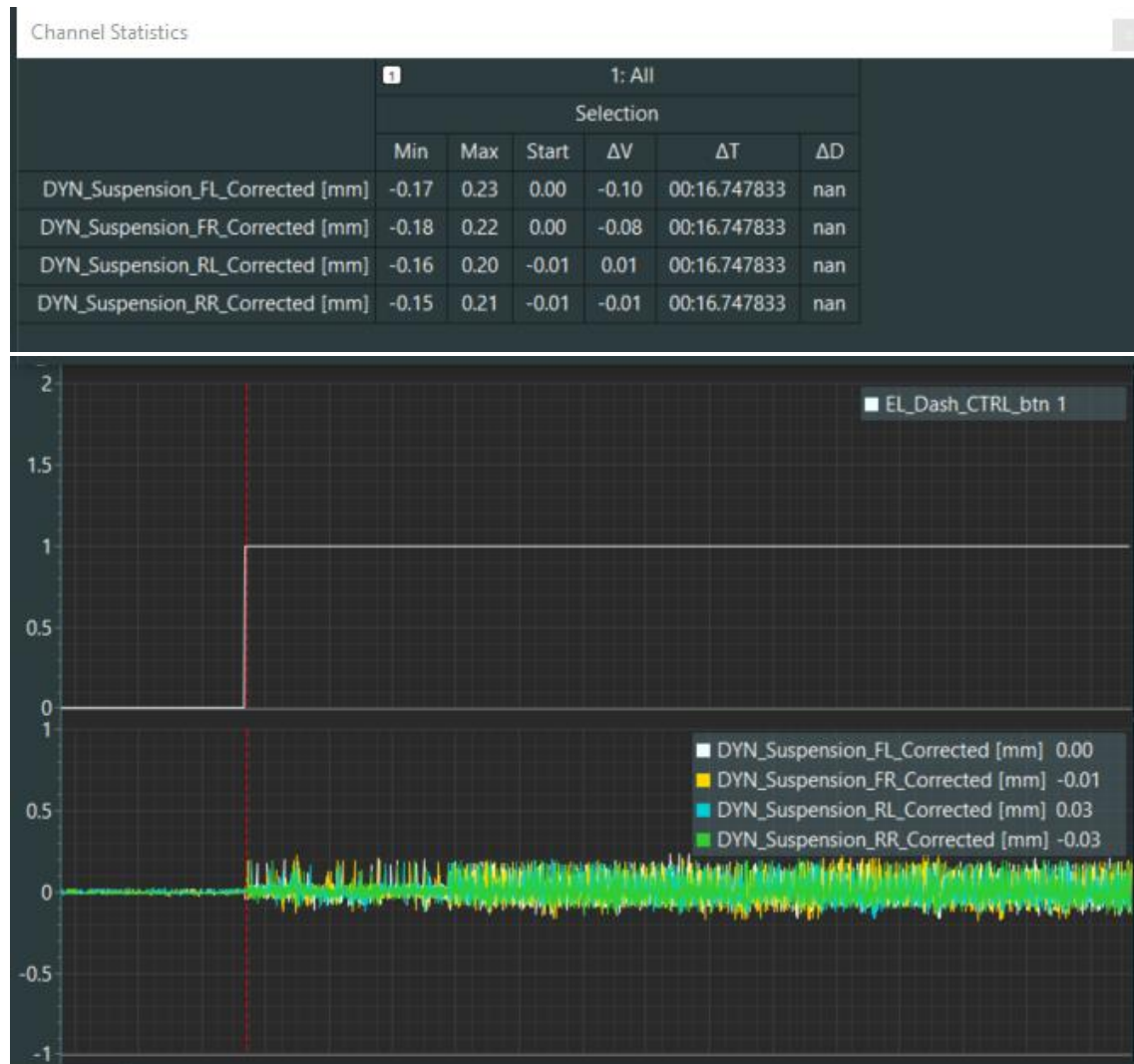
    if (HAL_FDCAN_AddMessageToTxFifoQ(&hfdcan3, &txHeader, msg->data)!=
        HAL_OK){
        Error_Handler();
    }
    while (HAL_FDCAN_GetTxFifoFreeLevel(&hfdcan3) < 2) {
    }
}
```

Joonis 2. FEST23 ECU CAN sõnumite saatmise funktsioon

1.2.2 Mõõra analoog sensorite mõõtmises

ECU trükkplaadil on kompaktse ala peal väga palju erinevaid signaale, mille hulgas on nii tundlikud analoog signaalid, kui ka mürarohked kõrge sagedusega digitaal signaalid ja suure vooluga toiteliinid. Eri põhjustel võivad need signaalid üksteist mõjutama hakata ja segada trükkplaadi korrektset toimimist. Teine FEST23 elektroonika kontrollüksuse suurem probleem tuleneski sellest. ECU mõõdab lineaarpotentsiomeetritega vormeli vedrustuse käiku, mis on vajalik vormeli juhtimissüsteemi arvutusteks. Joonis 3 on näha CAN logi vedrustuse sensorite mõõtetulemustega. Hetkel, kus *EL_Dash_CTRL_btn* väärtus läheb kõrgeks, lülitatakse mootorikontrolleri toide sisse. Kontrollerite

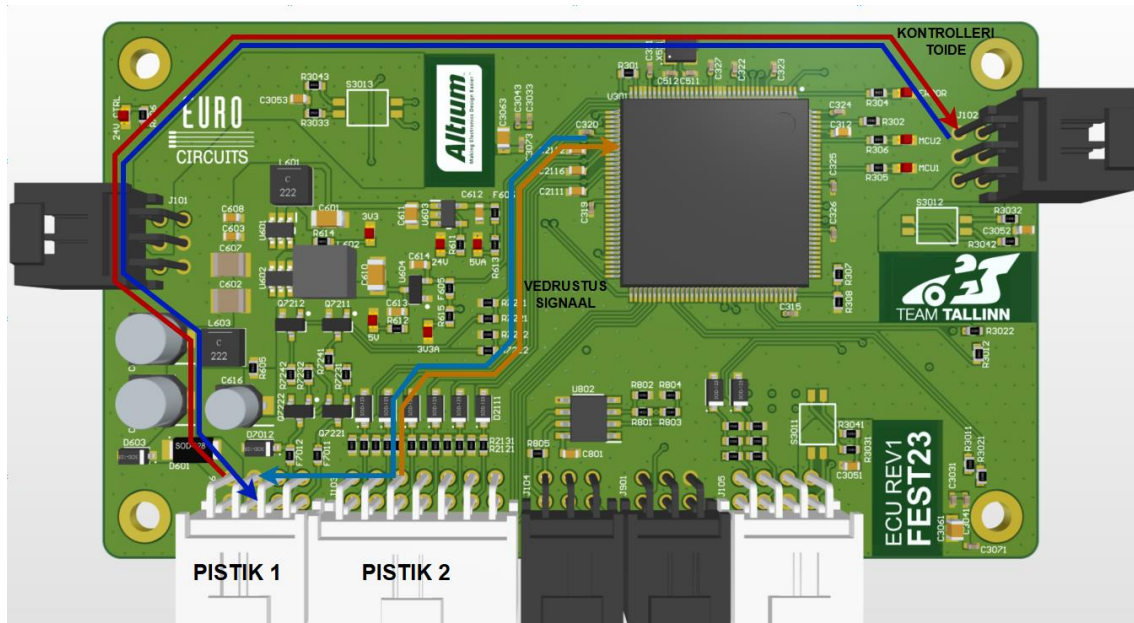
kogutarbimine on 2 A, mis kõik liigub läbi ECU trükkplaadi. Alates sellest hetkest on selgelt näha müra sensorite mõõtmistulemustes. Jooniselt on samuti näha, et müra tekitab viga amplituudiga $\pm 0,2$ mm, mis on juba piisav, et mõjutada juhtimissüsteemi toimimist.



Joonis 3. CAN logi vedrustussensorite mõõtetulemustega sõidurežiimi sisselülitamise hetkel.

CAN sõnumeid saadetakse sagedusega 200Hz, seega ei ole võimalik CAN logist näha müra komponendi reaalsel sagedust, mis aitaks allikat tuvastada. Aga siiski võib eeldada, et müra sensorite mõõtmistes on tingitud mootorikontrollerite toiteliinist. Müra edasi kandumiseks allikast on mitu viisi, aga antud juhul on kõige tõenäolisem juhtivuslik sidestus ehk otse üle ühise juhi [6]. Mõlemal ahelal on selleks ühine maa ehk referents tasand. Joonis 4 on näha FEST23 ECU trükkplaat, kuhu on märgitud mootorikontrollerite toite ja vedrustuse sensori signaalide vooluteed. Kuna vool liigub alati kinnises ringis, siis on märgitud ka voolu tagasitee trükkplaadi referents tasandil. Referents tasand katab ühel trükkplaadi sisemisel kihil kogu trükkplaadi ala. Kõrgesagedusliku signaali puhul liigub

vool mõõda kõige madalama impedantsiga teed, mis on üldjuhul on signaalile võimalikult lähedal [6]. Trükkplaadi puhul tähendab, et tagasivool liigub otse signaali all teisel tasandil.



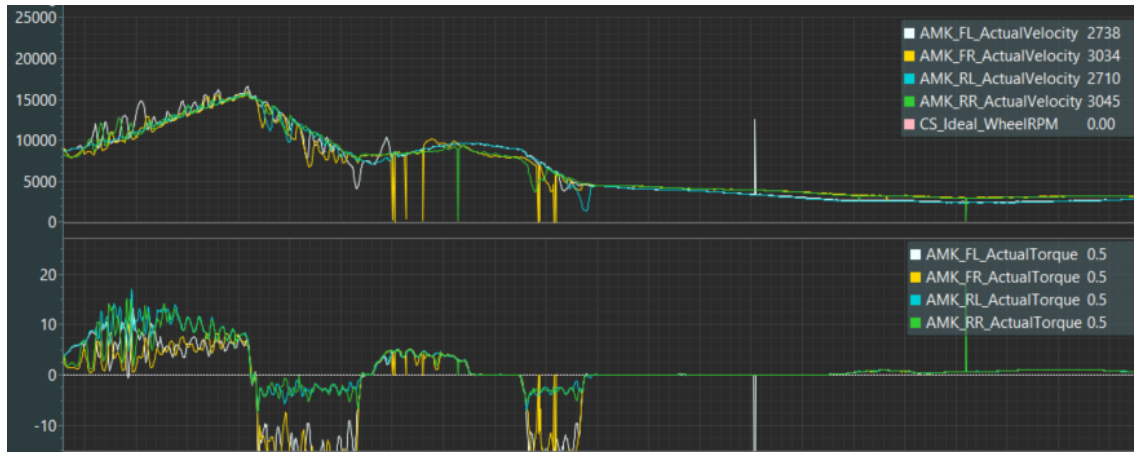
Joonis 4. FEST23 ECU trükkplaat koos mootorikontrollerite toite ja vedrustussensorite signaalide vooluteedega.

Joonis 4 saab järelada 2 võimaliku põhjust, miks jõuab müra mootorikontrolleri toiteliinist vedrustuse sensorite mõõtmistesse.

- Disainis ei ole arvestatud vedrustussensori jaoks vajaliku referents ühendusega. Sensorite signaalid ühenduvad pistikusse 2 aga referents ühendus on läbi pistiku 1. See aga põhjustab vooluteede kattumise, kus müra saab üle kanduda.
- Mootorikontrollerite toide liigub väga lähedalt mikrokontrolleri ülemisest servast mõõda. Selles servas on ka mikrokontrollerid analoog toite ning maa ühenduste jalad. Sealt saab oma referentsi pinge ka mikrokontrolleris olev analoog-digitaal muundur (ADC). Seda ADC-d kasutatakse vedrustuse signaalide diskreetimisel. See võib tähendada, et müra tuleneb hoopis mikrokontrolleri ADC-st

1.2.3 Müra mootorikontrolleri CAN signaalides

Lisaks mürale vedrustussensorite mõõtetulemustes oli FEST23 elektroonika kontrollüksusel probleeme ka müraga mootorikontrolleri CAN sõnumites. Joonis 5 on näha ebaloogilisi väärtusi eri mootorite kiiruse ja momendi mõõtetulemustes. Need väärtused on kriitilised vormeli juhtimissüsteemi toimimisele ning igasugune müra mõõtetulemustes häirib selle korrektset toimimist.



Joonis 5. Tudengivormeli FEST23 CAN logi mootorite kiiruse ja momendi mõõtetulemustest

Probleemil on kaks võimalikku põhjust. Esiteks võib probleemi põhjus tuleneda samuti tarkvarast, mis on kirjeldatud Peatükis 1.2.1. Kuna aga müra on ainult kõrgema sagedusega mootorikontrolleri sõnumites, siis võib müra tuleneda ka mootorikontrollerist endast või CAN-võrgust. Tulenevalt FEST23 ECU asukohast vormelis, ei ole aga võimalik CAN-võrgu signaalkuju mõõta, et probleemi allikat tuvastada. Seega peab ECU disaini juures ka arvestama, et müra võib tuleneda mootorikontrolleritest.

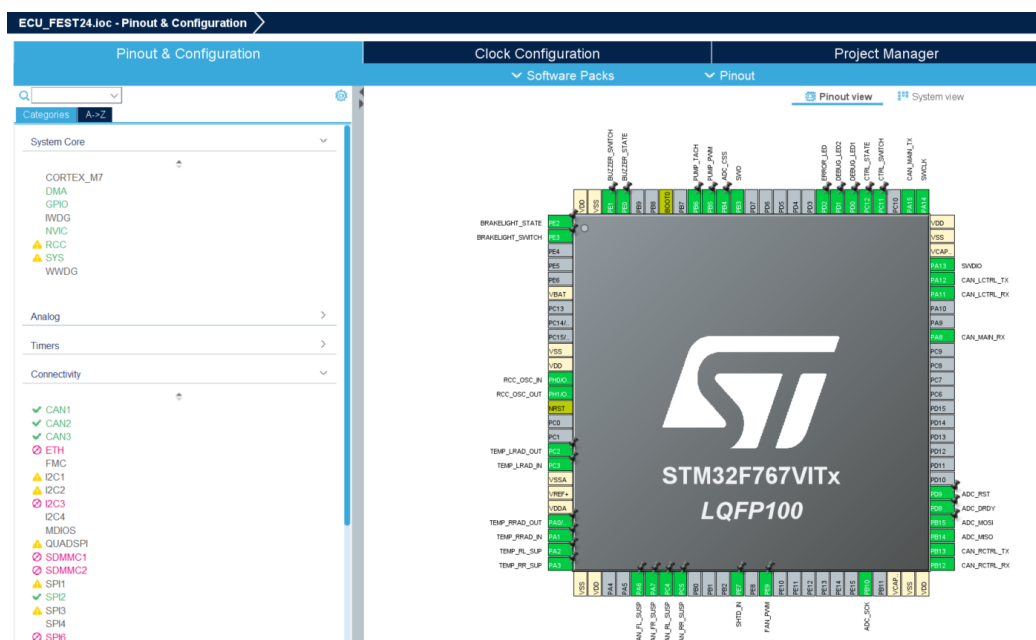
1.2.4 Mikrokontrollerist tulenevad probleemid

FEST23 elektroonika kontrollüksusel on kasutusele STM32H7 [7] seeria mikrokontroller, mis erineb varasematel aastatel oli kasutusel olnud vähem võimekast STM32F7 [8] seeria mikrokontrollerist. Kiibi vahetus tulenes peamiselt tarneprobleemidest ja vormeli esialgsest kontseptsioonist. FEST23 esialgse kontseptsiooni järgi jooksis ECU mikrokontrolleril sarnaselt eelnevatele aastatele ka vormeli juhtimissüsteem. Juhtimissüsteem koosneb keerukatest algoritmidest, mis arvutab mootorite juhtkäsud vastavalt juhi ja sensorite sisenditele [9]. Juhtimissüsteemi muudatuste tõttu oli vajalik võimekam mikrokontroller. Hilisema testimise käigus aga

selgus, et ka võimekam mikrokontroller ei ole piisav uue juhtimissüsteemi jooksutamiseks. Seetõttu võeti kasutusele eraldi sõiduki kontrollüksus ehk VCU.

See tähendas, et ECU ülesannete täitmiseks on H7 seeria mikrokontrolleri lisa võimekus asjatu. See ei ole iseseisvalt probleem, aga mikrokontrolleri vahetusest tulenes mitmeid teisi probleeme. Esiteks ei ole välistatud, et eelnevates peatükkides kirjeldatud probleemid on tingitud vähemalt osaliselt mikrokontrollerist või koodi portimisel tekkinud vigadest. Tulenevalt koodi mahukusest on selliste vigade leidmine aga väga aeganõudev.

Teiseks tekkis probleeme STM32CubeIDE [10] keskkonnaga ühildumisel. Keskkond võimaldab lisaks koodi kirjutamisele, graafilise kasutajaliidese (Joonis 6) abil automaatselt genereerida koodi mikrokontrolleri sisendite, väljundite ja registre seadistamiseks. Kuna STM32H7 on uue mikrokontrolleri seeria, siis on STM32CubeIDE tarkvaras jätkuvalt mitmeid ühilduvuse probleeme [11]. Lisaks teatud probleemidele tekkis FEST23 ECU-l koodi genereerimise funktsionaalsusega mitmeid probleeme, kus vigade leidmine genereeritud koodis oli väga ajakulukas



Joonis 6. Ekraanipilt STM32CubeIDE keskkonnast ECU väljundite seadistamisest

Sellest tulenevalt on mõistlik FEST24 ECU puhul kasutada F7 seeria mikrokontrollerit. Sama seeria mikrokontrollereid on vormelis on ka mujal kasutusel, mis lihtsustab koodi taaskasutust ja üldist standardiseerimist. Samuti on F7 seeria mikrokontroller mõõtmelteil väiksem.

1.3 Elektroonika kontrollüksuse nõuded

Tulenevalt eelnevate hooegade analüüsist ja vormeli disaini kontseptsioonist saab defineerida elektroonika kontrollüksuse nõuded. Kõik FEST24 ECU funktsionaalsed nõuded on toodud Tabel 2, mis näitab kõiki funktsioone, mida ECU peab täitma.

Tabel 2. Elektroonika kontrollüksuse funktsionaalsed nõuded. Rasvases kirjas on nõuded, mis põhjustavad suuremaid muudatusi ECU disainis

Nr	Nõue	Parameetrid	Nõude allikas
1	3 erinevat CAN-võrgu ühendust	CAN 2.0A [4] Isoleeritud CAN-võrk Sagedus – 1 Mbit/s	FEST24 elektroonika-süsteemi kontseptsioon
2	Võime lülitada mootorikontrolleri toidet	Toitepinge – 24 V Maksimaalne vool – 2 A Eellaadimine	FEST24 elektroonika-süsteemi kontseptsioon
3	Võime mõõta 4 mootori temperatuuri	PT1000 sensorid [12] Mõõtevahemik 0-150 °C Mõõtmisviga < 3 °C	FEST24 jõuülekande kontseptsioon
4	Võime juhtida pulsisagedusmodulatsiooniga veepump [13]	Sagedus – 20-100 Hz Pinge – 5 V	FEST24 jahutusüsteemi kontseptsioon
5	Võime juhtida pulsisagedusmodulatsiooniga jahutusventilaatoreid [14]	Sagedus – 25 kHz Pinge – 5 V	FEST24 jahutussüsteemi kontseptsioon
6	Võime mõõta veepumba kiirust [13]	0 – 5V ruutsignaal Kiirus vastavalt signaali sagedusele	FEST24 jahutussüsteemi kontseptsioon
7	Võime mõõta vormelil kahe pidurisadula temperatuuri	10 k Ω termistor Mõõtevahemik 0-150 °C Mõõtmisviga < 2 °C	FEST24 veermiku kontseptsioon
8	Võime mõõta jahutusüsteemis nelja temperatuuri	10 k Ω termistor Mõõtevahemik 0-65 °C Mõõtmisviga < 2 °C	FEST24 jahutusüsteemi kontseptsioon
9	Võime juhtida pidurituld	Pinge - 24 V	FEST24 elektroonika süsteemi kontseptsioon. FSG reeglid [1]
10	Võime juhtida sumistit	Pinge - 24 V	FEST24 elektroonika süsteemi kontseptsioon. FSG reeglid
11	Võime mõõta vormeli vedrustuse liikumist igas nurgas	10 k Ω potentsiomeeter	FEST24 dünaamika kontseptsioon
12	Võime mõõta vormeli turvaahela pinget ühes punktis	Sisendpinge - 24 V	FEST24 elektroonika-süsteemi kontseptsioon

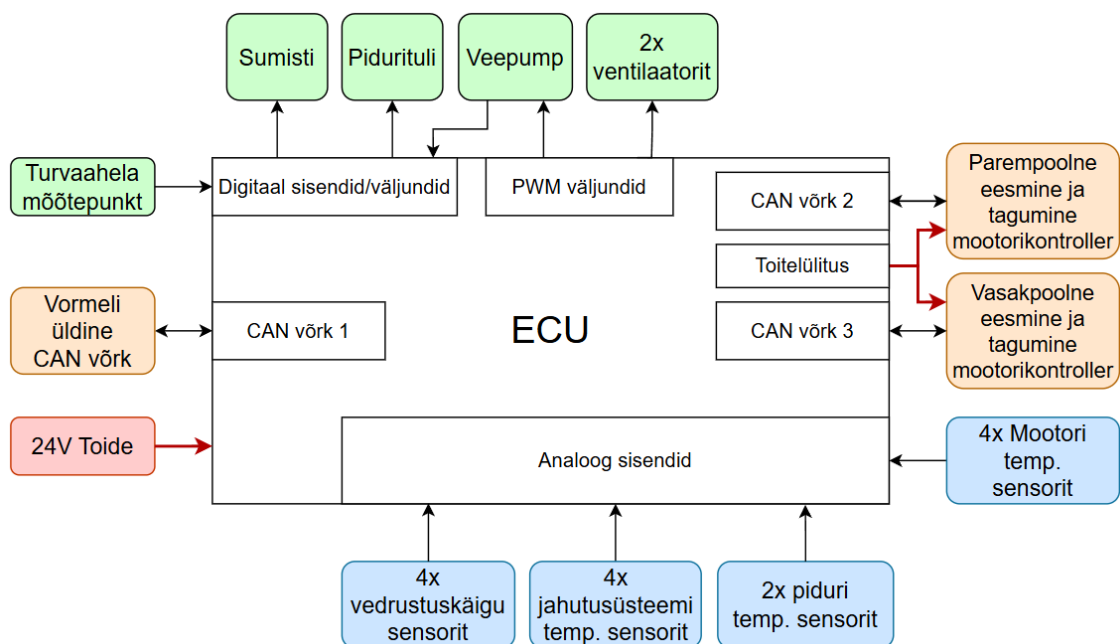
Lisaks funktsionaalsetele nõuetele on püstitatud ka mittefunktsionaalsed nõuded (Tabel 3), mis defineerivad ECU nõutava töökindluse, töökeskkonna ja mehaanilised parameetrid. Need võimaldavad hiljem ECU disaini paremini analüüsida. Nõuete puhul on arvestatud, et ECU vastab 1,5 kuud enne võistlusperioodi kõikidele püstitatud nõuetele.

Tabel 3. Elektroonika kontrollüksuse mittefunktsionaalsed nõuded

Nr	Nõue	Parameetrid	Nõude allikas
1	ECU signaalid on müravabad	CAN logis olevatel ECU signaalidel puudub tuvastatav müra, mis mõjutaks mõne süsteemi toimimist	FEST23 ECU probleemid
2	ECU toimib terves temperatuuri töövahemikus	ECU temperatuuri töövahemik 0 - 50 °C	Varasemad vormeli temperatuuri mõõtmised
3	ECU trükkplaat sama suur või väiksem eelmise aasta trükkplaadist	Pindala $\leq 5\,750\text{ mm}^3$	Mehaanilised piirangud
4	ECU töövõime aeg ehk <i>uptime</i> on võistlusperioodil 100%	Ei esine ühtegi häiringut, mis takistaks vormeli optimaalset toimimist	FEST23 ECU probleemid

2 Riistvara disain

Elektroonika kontrollüksus on disainitud vastavalt defineeritud nõuetele. Joonis 7 on plokkskeem kõikide ECU sisendite ja väljunditega. Peamised muudatused on kirjeldatud järgnevas peatükis. Terve trükkplaadi elektriskeem on Lisas 2. Trükkplaadi füüsiline kuju ja komponentide paigutus on Lisades 3 ja 4.



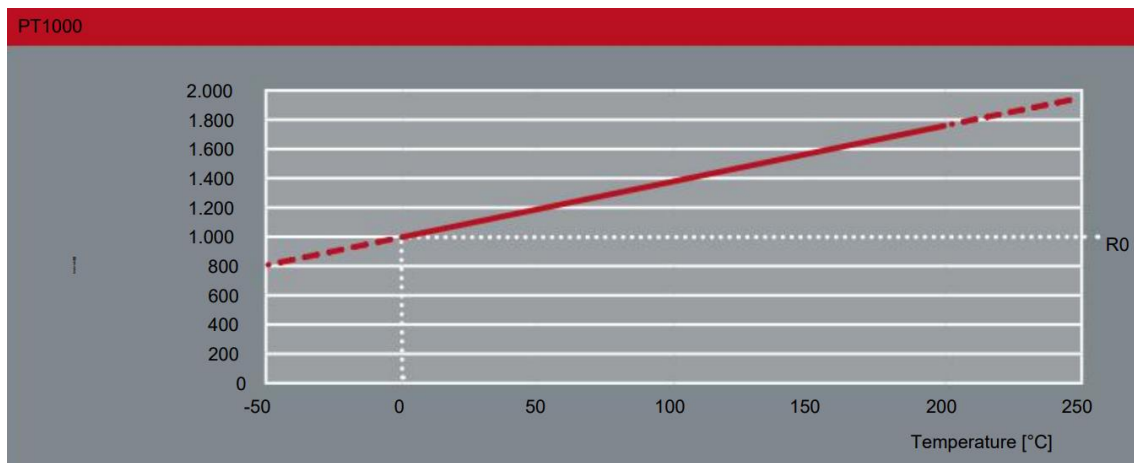
Joonis 7. Plokkskeem elektroonika kontrollüksuse sisendite ja väljunditega

2.1 Mootori temperatuuri mõõteahel

Tulenevalt vormeli kontseptsiooni muutusest, peab ECU mõõtma elektrimootorite temperatuuri. Mootorites on kasutusel PT1000 temperatuuri andurid [12]. Tegemist on PTC termistoridega, mille takistus tõuseb temperatuuri tõustes. Takistuse muut on vastavalt valemile (2), kus R_0 on sensori takistus $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures, milleks on $1000\text{ }\Omega$ ning $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ja $B = -5,775 \cdot 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$ on konstandid.

$$R_t = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (2)$$

Valemist (2) tulenevalt on takistuse muut eksponentsiaalselt kahanev, aga väikse B väärtuse tõttu on muut väga lähedal lineaarsele, mida on näha ka Joonis 8. Mõõdetavas temperatuuri vahemikus on keskmine takistuse muut $3,82\text{ }\frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}}$.



Joonis 8. Temperatuuri sensori PT1000 temperatuuri-takistuse graafik [12]

Kuna sensori takistuse muut kraadi kohta on väike, siis mõjutab mõõtetulemust ka juhtmetest ja pistikutest tulenev lisa takistus. Eesmise mootori ja ECU vahelise juhtme pikkus on 2,2 m ning selle tee peal on ka vahel 3 pistikut, mis lisavad takistust. Kasutatud juhtme takistus on $78 \frac{\Omega}{\text{km}}$, mis tähendab, et juhtmetest lisanduv takistus on $340 \text{ m}\Omega$ [15]. Pistikutest tulenev takistus on suurusjärgus $10 \text{ m}\Omega$. Need väärtused on ainult teoreetilised ning võivad reaalsusest küllaltki palju erineda, eelkõige pistikute ja muude ühenduste tootmiskvaliteedist. Samuti ei ole takistus konstantne ning sõltub temperatuurist, pistikute elueast ning kontaktide puhtusest. Siiski saab arvestada, et takistus suurusjärgus $350 \text{ m}\Omega$ tähendab umbkaudu $+0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ viga mõõtmistulemustes.

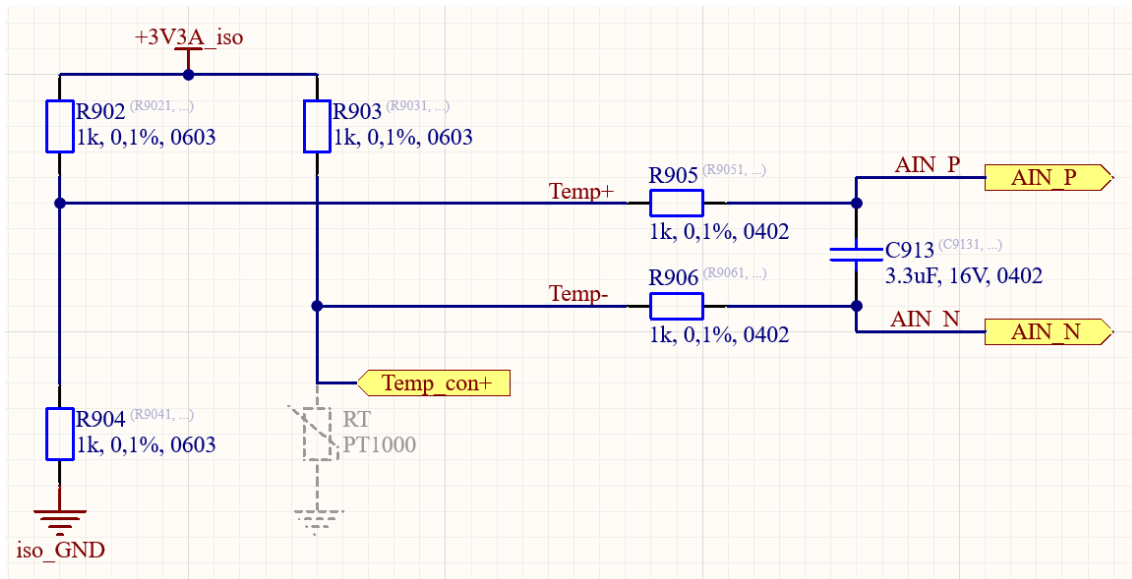
Juhtmete ja pistikute takistusest tuleneva vea kompenseerimiseks on olemas mitmeid meetodeid, millest kõige täpsem meetod on nelipunktsond. See aga tähendab, et ühe sensori mõõtmiseks on vaja 4 juhet [16]. Sama tööpõhimõtet on võimalik kasutada ka 3 juhtmega. Varasemalt on mootori ühendusteks kasutatud 8 juhtmega varjestatud kaablit, kus on kõik juhtmed kasutatud mootori enkoodri ja temperatuurisensori ühenduste jaoks. See aga tähendaks, et 3 või 4 juhtme meetodi puhul tuleks kasutusele võtta suurem kaabel, mis suurendaks süsteemi keerukust kui ka massi. Kui aga arvestada, et sensori mõõtetäpsus on $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja juhtmetest tulenev viga jääb suurusjärku $+0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, siis nelipunktsond mõõtmisest tulenev lisa keerukus ja mass ei ole põhjendatav. Lisa takistusest tulenevat viga on mõistlik kompenseerida tarkvaraliselt.

Sensorilt mõõtetulemuse saamiseks on vaja takistuse muut muundada pinge muuduks. Selle jaoks on mitu võimalust. Üks võimalus on kasutatud *wheatstone*-i silda, mis on Joonis 9 vasakul servas olev skeem, mis koosneb kolmest konstantse väärtusega takistist

ja ühest muutuva takistusega sensorist, mille väärtust mõõdetakse. Joonis 9 on need vastavalt R902, R903, R904 ja RT. RT takistuse muutudes muutub pinge punktide *Temp+* ja *Temp-* vahel, mida saab analoog-digitaal muunduriga mõõta.

Teine lihtsam viis on tekitada pingejagur, mis vajab ainult ühte lisa takistit. See tähendaks nelja temperatuuri mõõtmisel ainult 4 lisa takistit 12 asemel. Samuti on pinget lihtsam mõõta, kuna selle referents on maa. *Wheatstone*-i silla suur eelis on aga see, et väljundpinge on tsentreeritud 0 V suhtes. See võimaldab kasutada ADC-l madalamat referentspinget, mis vähendab ühe LSB-le vastavat pinget, mis omakorda võimaldab täpsemat mõõtmist.

STM32F767 mikrokontrolleri analoog digitaal muundur ei ole piisavalt täpne, ning samuti ei ole võimalik sellega mõõta diferentsiaalsignaali. Vajaliku täpsuse saamiseks on kasutatud ADS130B04-Q1 analoog-digitaal muundurit [17]. Muunduri valikul on peamised parameetrid resolutsioon, mõõteviga ja ühele LSB-le vastav pinge. Vastavalt valemile (3) on ühele LSB-le vastav pinge $18,3 \mu\text{V}$, kus U_{ref} on muunduri referentspinge 1,2 V ning *resolutsioon* on vastavalt 16 biti. *Wheatstone*-i silla väljund on arvutatav valemiga (4), kus U_{sisse} on toitepinge, *RT* on sensori takistus ning *R* on teiste takistuste väärtus 1 k Ω . Kuigi saab arvestada, et sensori takistuse muut on lineaarne, siis tulenevalt valemist (4) pinge muut ei ole lineaarne. Kõige väiksem pinge muut ühe kraadi kohta on mõõdetava temperatuurivahemiku lõpus ehk 150 °C juures. Kui arvestades keskmist sensori takistuse muutu $3,82 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}$, siis vastavalt valemile (4) on pinge muut 149 °C ja 150 °C vahel 1,9 mV. Seega on muunduri teoreetiline täpsus minimaalselt 0,01 °C, mis on piisav nõutava täpsuse saavutamiseks. Muunduri andmelehes defineeritud mõõteviga on suurusjärgu võrra väiksem ja mõjutab mõõtmist minimaalselt.



Joonis 9. Mootori temperatuuri mõõtmiseks kasutatav *wheatstone*-i sild koos madalpääsu filtriga.

$$U_{LSB} = \frac{U_{ref}}{2^{resolutsioon}} \quad (3)$$

$$U_{väljund} = U_{sisse} \left(\frac{RT}{RT+R} - 0,5 \right) \quad (4)$$

Joonis 9 on ühe lisaks *wheatstone* sillale näha ka madalpääsu filtrit. Filtri lõikesagedus F_c on vastavalt valemile (5) 24 Hz, kus R on takistite R905 ja R906 väärtus ning C on kondensaatori C913 väärtus. Sensori lõikesagedus on valitud võimalikult madal, et filtreerida välja kõik kõrgema sagedusega müra. Temperatuuri mõõtmisi edastatakse CAN-võrku sagedusega 10 Hz, aga sisendsignaali diskreetimine toimub kõrgema sagedusega, et rahuldada Nyquisti-Shannoni teoreemi [18].

$$F_c = \frac{1}{2\pi 2RC} \quad (5)$$

Sensori mõõtmise juures peab arvestama ka ohutusega. Sensorid on valatud elektrimootorite sisse, kus maksimaalne pinge võib olla kuni 600 V. Kui sensor peaks lühistuma mootoris kõrgepingega, võib see kahjustada ECU trükkplaati, kogu elektroonika süsteemi ja võib olla ohtlik ka juhile. Seetõttu on vajalik, et mõõtmisloogika oleks galvaaniliselt isoleeritud ülejäänud ECU skeemist. Galvaanilise isolatsiooni tagamiseks on 2 võimalust:

- Isoleerida analoog signaale – Sensori signaal on ühendatud isoleeritud võimendi külge, mis tagab galvaanilise isolatsiooni. Mitte isoleeritud skeemi poole peal on analoog-digitaal muundur.

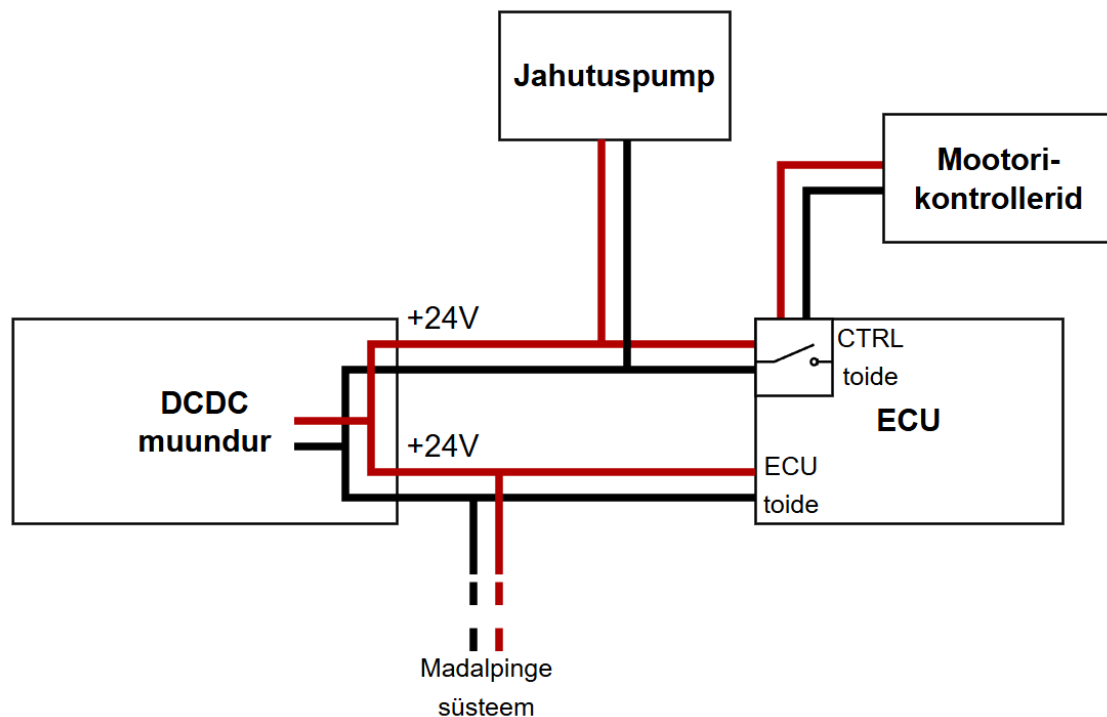
- Isoleerida digitaal signaale – Isoleeritud skeemi poole peal on analoog-digitaal muundur, mis muudab signaali digitaalseks. See omakorda on ühendatud digitaal isolaatoriga, mis tagab galvaanilise isolatsiooni. Mitte isoleeritud skeemi poole peal loeb mikrokontroller digitaalsignaali sisse.

Kui analoog-digitaal muundur paigutada isoleerimata poolele, siis tuleb isoleerida kokku 8 analoog signaali. Kui aga muundur paigutada isoleeritud poolele, siis on vaja isoleerida ainult SPI ühenduseks vajalikud 4 signaali. Seetõttu on lihtsam paigutada muundur isoleeritud poole peale ja isoleerida digitaal signaalid.

2.2 Mootorikontrolleri toitelülitus

FEST23 elektroonika kontrollüksusel põhjustas mootorikontrolleri toiteliinist tulenev müra häiringuid vedrustussensorite mõõtmistes, mis on kirjeldatud Peatükis 1.2.2. Sama probleemi vältimiseks on eesmärk suurte vooludega mootorikontrolleri toiteliin eraldada muudest signaalidest. Kõige kindlam viis on analoog signaalid galvaaniliselt isoleerida. See aga suurendab märgatavalt kogu süsteemi keerukust ning võib tekitada mitmeid uusi probleeme [19]. Korrekse komponentide paigutuse ja ühendustega on ka võimalik edukalt vältida erinevate alamskeemide vahelisi häiringuid. See võimaldab säilitada ka ühise referents tasandi, mis lihtsustab disaini.

FEST24 üldine madalpinge toiteliini disain lihtsustab probleemi lahendamist, kuna ECU ja mootorikontrolleri toiteliinid on eraldatud. ECU-sse tuleb kaks 24 V ja maa paari. Üks on ECU loogika jaoks ja teine on kontrolleri toite jaoks. Joonis 10 on näha toitesüsteemi plokskeem. See tagab, et kumbki voolutee ei ristuks mitte kuski ECU trükkplaadi peal ja müra ei saaks edasi kanduda. See lihtsustab ECU disaini, kuna referents tasandid on ECU trükkplaadil täielikult eraldatud ja on kokku ühendatud ainult DC/DC muunduri peal. See vähendab oluliselt võimalust, et mootorikontrolleri müra jõuaks analoog signaalideni.



Joonis 10. Elektroonika kontrollüksuse toiteskeemi plokkskeem

Toitesüsteemi kontseptsioon aga tekitab teise probleemi. Jahutuspumbal on sama referent nagu mootorikontrolleril. Jahutuspumba juhtimine ja kiiruse mõõtmine aga toimub samuti ECU peal. See tähendab, et signaalide tagasivoolutee peab liikuma läbi DC/DC muunduri. Tulenevalt suurest vooluringi pindalast ehk *loop area*-st on signaalid palju vastuvõtlikumad välisele mürale ning samuti levitavad ise rohkem müra keskkonda [6]. Veepumba signaalides oleva müra limiteerimine on oluline, kuna pump on väga tundlik üle pingele.

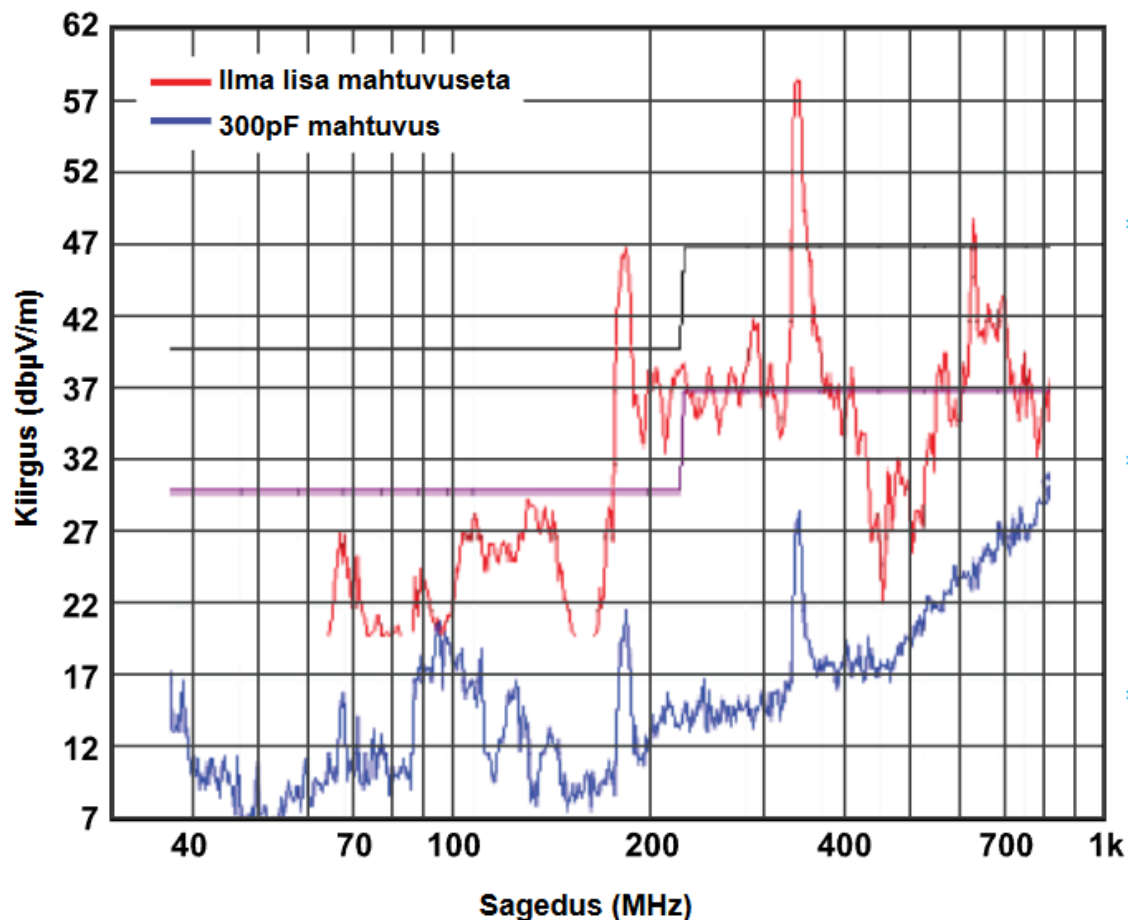
Üks variant vooluringi pindala vähendamiseks on signaalide juhtmed vedada DCDC muunduri juurest läbi, et hoida distantse referents juhtmetega madalana. See aga tekitab omakorda uusi probleeme: keerukam juhtmestus, pikem voolutee ja suurem mass. Teine võimalus on ECU trükkplaadil referents tasandid omavahel ühendada, et tagada jahutuspumba signaalidele väike vooluringi pindala. See aga võib taaskord põhjustada müra jõudmise analoog signaalide mõõtmisesse. Selle vältimiseks on referents tasandid seotud läbi induktori. Kuna jahutuspumba pulsisagedusmodulatsiooni sagedus on ainult 50 Hz, siis induktor tagab madala impedantsiga ühenduse referents tasandite vahel. Samas blokeerib induktor kõrgsagedusliku müra.

2.3 CAN-võrk

ECU trükkplaadil peab olema ühendus kolme erineva CAN-võrguga. Kuna tegemist on galvaaniliselt isoleeritud CAN-võrkudega, siis on kahele diferentsiaal signaali juhtmele lisaks referents juhe. See võimaldab kõikide CAN-võrku ühendatud seadmete referentsid omavahel kokku ühendada, mis suurendab CAN-võrgu mürakindlust ja tagab, et andmeliini sünfaaspinge ehk *common mode voltage* ei ületaks limiite [20].

ECU peal on isolatsiooni tagamiseks kasutatud Analog Devices ADM3053BRZW [21] CAN transiivereid. Transiiver muudab mikrokontrollerilt tulevad signaalid diferentsiaalsignaali ja vastupidi. Lisaks on kiibi sees isoleeritud toitemuundur, mis tagab galvaanilise isolatsiooni. See võimaldab skeemi pindala väiksena hoida. Väiksest suurusest tulenevalt on muunduril kõrge lülitussagedus 180MHz, mistõttu on see ka vormeli madalpingesüsteemis üks suurimaid müra allikaid [22]. Lisaks toitemuunduri lülitussagedusele on problemaatilised ka selle harmoonikud sagedustel 360MHz, 540MHz ja 720MHz. Seega, kuigi sama kiip on olnud kasutusel ka varasematel aastatel, siis elektriskeemi disainile ja komponentide paigutusele tuleb panna suurt tähelepanu.

Elektriskeem on disainitud vastavalt kiibi andmelehe soovitudele [21] ning komponentide paigutus on tehtud vastavalt kiibi EMC disaini juhistele [23]. Elektrilise müra levimise ja vastuvõtlikuse vähendamiseks on mitmeid viise, mida on ka trükkplaadil implementeeritud. Üks nendest on *via*-dest kaitsesein isoleeritud alade vahel, mis takistab müra keskkonda levimist. Veel efektiivsem viis müra vähendamiseks on lisada isoleeritud alade vahele mahtuvust. See loob toitemuunduri lülitustel tekkivale kõrgsageduslikule mürale madala impedantsiga voolutee allikani ning vähem energiat levib keskkonda, mis on näha ka Joonis 11



Joonis 11. ADuM seeria kiipide levitatava kiirguse - sagedus graafik koos ja ilma lisa mahtuvusega [23]

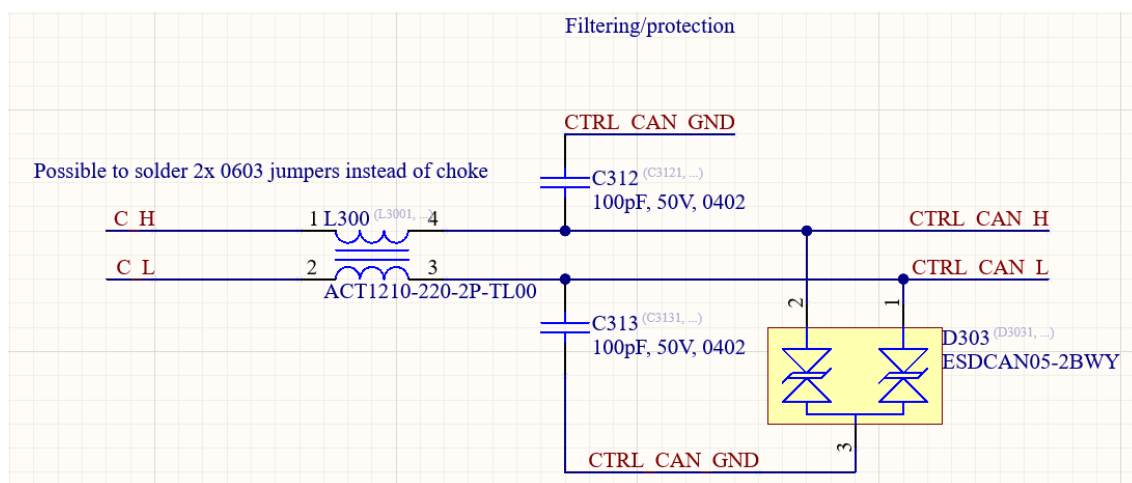
Kõrge sageduse tõttu on mahtuvust keeruline lisada, kuna pind montaaž kondensaatorite parasiit induktiivsuse tõttu ei ole need kõrgetel sagedustel efektiivsed [24]. Kondensaatori omavõnkesagedusest kõrgemal sarnaneb kondensaatori impedantsi – sageduse graafik induktori omale. Vaadeldavas sagedusvahemikus 100-1000 pF on olenevalt kondensaatori füüsilisest suurusest omavõnkesagedus maksimaalselt 500MHz, mis ei ole piisav DC/DC muunduri kõrgemate harmoonikute jaoks.

Alternatiivne viis mahtuvuse lisamiseks on kasutada trükkplaadi kihte. Trükkplaadi kihid toimivad nagu plaatkondensaator, mis on efektiivne ka kõrgematel sagedustel, Kondensaatori mahtuvus on arvutatav valemiga (6), kus A on plaatide pindala, d on plaatide vaheline kaugus, ϵ_r on vahematerjali suhteline dielektriline läbitavus ja ϵ_0 on elektriline konstant $8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$. Trükkplaadi vahematerjal on FR4, mille suhteline dielektriline läbitavus on 4,2 ning trükkplaadi kihtide vaheline kaugus on 0,7 mm. Tulenevalt trükkplaadi suuruse piirangutest on kattuva ala pindala $95,2 \text{ mm}^2$. Vastavalt valemile (6) on kihtide vaheline mahtuvus seega 5 pF. Mahtuvus on palju madalam kui Joonis 11 toodud näites, aga siiski on aitab see kaasa müra leviku vähendamisele.

Trükkplaadil on samuti võimalus suurema mahtuvusega pind montaaž kondensaatori lisamiseks, mis aitab madalamatel sagedustel

$$C = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r}{d} \quad (6)$$

Tulenevalt Peatükis 1.2.3 kirjeldatud mootorikontrolleri CAN sõnumite probleemidele on trükkplaadile lisatud mootorikontrolleri CAN-võrgu sisenditesse filtrid. Filtri skeem on näha Joonis 12. Sünfaasdrossel L300 blokeerib diferentsiaal liinis sünfaasilist ehk ühesuunalist voolu. Diferentsiaal signaali puhul on sünfaasvool mitte tahetav müra, mis tekitab häiringuid. Kondensatorid C312 ja C313 loovad kõrgesageduslikule sünfaasvoolule madala impedantsiga tee isoleeritud referentsi. Skeemis on samuti ülepingsekaitse dioodid, mis kaitsevad kõiki komponente võimaliku ülepinge eest.



Joonis 12. CAN-võrgu sisendfiltri elektriskeem

Kõik skeemi komponendid on trükkplaadile nii paigutatud, et vajadusel saab CAN-võrgu ühenduse luua ka ilma filtrita. Selle põhjuseks on see, et kui filtril pole otsest vajadust, siis võib filter hoopis halvendada CAN-võrgu toimimist [25]. Samal põhjusel ning ka pindala kokkuhoiu tõttu ei ole filter lisatud üld CAN-võrgu sisendisse.

2.4 Toitesüsteem

Vormeli madalpingesüsteemi pinge on 24 V, mis on ka ECU toitepingeks. Valdav enamus ECU trükkplaadil olevaid komponente vajavad toimimiseks aga madalamat pinget. See tähendab, et trükkplaadi peal tuleb 24 V madalamateks pingeteks muundada. Tabel 4 on toodud ECU kõige suurema tarbimisega komponendid ja alamskeemid. Tabelis pole arvestatud pingemuundamisel tekkivate kadudega ja alla 1 mA tarbijatega.

Tabel 4. ECU komponentide tarbimine eri pingetasandite juures

Pinge	Tarbija	Maksimaalne tarbimine	Koguvõimsus
24 V	Pidurituli	15 mA	$P = 0,55 \text{ A} \cdot 24 \text{ V} = 13,2 \text{ W}$
	Sumisti	40 mA	
24 V kontrollerr	Mootorikontroller	2000 mA	$P = 2 \text{ A} \cdot 24 \text{ V} = 48 \text{ W}$
5 V	3 CAN transiiverit [21]	$3 \cdot 260 \text{ mA}$	$P = 0,79 \text{ A} \cdot 5 \text{ V} = 3,95 \text{ W}$
	Pulsisagedusmodulatsioon (0% täiteteguri juures)	$2 \cdot 5 \text{ mA}$	
3,3 V	Mikrokontroller [8]	255 mA	$P = 0,284 \text{ A} \cdot 3,3 \text{ V} = 0,94 \text{ W}$
	Digitaal isolaator [26]	9,4 mA	
	Analoog sensorid	$10 \cdot 0,3 \text{ mA}$	
	Mikrokontrolleri analoog-digitaal muunduri sisendid	$10 \cdot 1,7 \text{ mA}$	
3,3 V isoleeritud	Wheatstone-i sild	$4 \cdot 3,3 \text{ mA}$	$P = 0,028 \text{ A} \cdot 3,3 \text{ V} = 0,09 \text{ W}$
	Analoog-digitaal muundur [17]	6,8 mA	
	Digitaal isolaator [26]	7,5 mA	

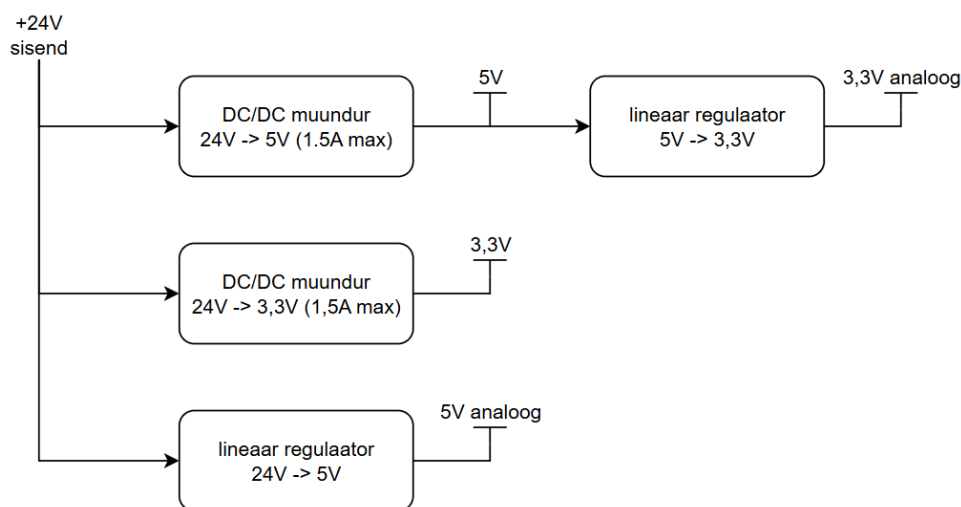
Pinge madalamaks muundamiseks on kaks peamist meetodit: DC/DC muundur ja lineaarregulaator. Tabelis 5 on mõlema variandi võrdlus. Lineaarregulaatori väljundis on vähem müra ja see vajab trükkplaadi peal väiksemat pindala, aga selle efektiivsus on madalam võrreldes DC/DC muunduriga.

Tabel 5. DC/DC muunduri ja lineaarregulaatori parameetrite võrdlus

	DC/DC muundur	Lineaarregulaator
Efektiivsus	Olenevalt topoloogiast ja parameetritest, aga üldjuhul > 80%	Proportsionaalne väljundpinge ja sisendpinge jagatisega vastavalt valemile (7)
Väljundi stabiilsus	Mürane väljundpinge. Pinge reguleerimine toimub kõrgesagedusliku lülitustega, mistõttu on väljundpinge ebastabiilsem [27].	Stabiilsem väljundpinge, kuna pinge reguleerimine toimub transistori lineaar režiimis.
Skeemi suurus	Paljudest komponentidest koosnev skeem või üks suur moodul.	Üks kiip koos sisend ja väljund kondensaatoriga

$$eff = \frac{U_{väljund}}{U_{sisend}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Joonis 13 on näha varasema aasta ECU lihtsustatud toiteskeemi, millel puudus isoleeritud toide mootori temperatuuride mõõtmiseks, küll aga oli lisaks analoog 5 V toide. Sarnaselt varasema aastaga on aga mõistlik 3,3 V pinge tasand jagada analoog ja digitaal loogika jaoks eraldi. See vähendab analoog ja digitaal signaalide vahelise müra levimist. Seega oleks mikrokontroller ja digitaal isolaator ühe liini peal kogu võimsusega 0,87 W. Analoog sensorid ja mikrokontrolleri analoog sisendid on teise liini peal kogu võimsusega 0,07 W



Joonis 13. FEST23 ECU toiteskeemi lihtsustatud toiteskeem

Sarnaselt FEST23 ECU disainile on DC/DC muundurit otstarbekas kasutada, et 24 V muundada 5 V peale. Lineaarregulaatorit kasutades oleks vastavalt valemile (7) efektiivsus ainult 21%. 3,3 V toitepinge saamiseks kasutati varasemal aasta samuti DC/DC muundurit, aga kuna selle toiteliini tarbijate koguvõimsus on ainult 0,87 W, siis alternatiivselt oleks võimalik kasutada lineaarregulaatorit. Et kadusid minimaalsena hoida on sisendiks 5V, mispuhul vastavalt valemile (7) on efektiivsus 66%, Tulenevalt madalast väljundvoolust on aga kaovõimsus vastavalt valemile (8) ainult 0,45 W. Lineaarregulaatori valikul on peamised parameetrid füüsiline suurus ja termiline takistus, mis on üksteisest sõltuvad. Termiline takistus näitab kadudest tulenevat kiibi temperatuuri tõusu. Valitud lineaarregulaator termiline takistus on 62 °C/W [28], mis tähendab, et maksimaalsete kadude korral tõuseb kiibi temperatuur 27,9 °C. Mis omakorda tähendab, et maksimaalse disainitud temperatuuri 50 °C juures tõuseb kiibi temperatuur 77,9 °C -ni, mis jääb kindlalt alla kiibi maksimaalsele töötemperatuurile 125

°C. 3,3 V analoog toiteliini tarbimine on niivõrd madal, et selle lineaarregulaatori kaod ei mõjuta disaini.

$$P_{kaod} = (U_{sisend} - U_{väljund}) \cdot I_{väljund} \quad (8)$$

DC/DC muunduri disainimiseks on kasutatud Texas Instruments Webench tarkvara. Tulenevalt Tabelis 4 olevatele väärtustele ja 3,3 V toite lineaarregulaatori kadudele peab DC/DC muunduri minimaalne väljundvool olema 5V juures 1,07 A. Muundur on disainitud maksimaalse väljundvooluga 1,5 A ja optimeeritud võimalikult väiksele pindalale. Muunduri teoreetiline efektiivsus on 90,3% ja kogu skeemi pindala 181 mm². Muunduri elektriskeem on näha Lisas 2.

Mootoritemperatuuri mõõtmisloogika jaoks vajamineva toite muundamine on keerulisem. Galvaanilise isolatsiooni tagamiseks peab kasutama DC/DC muundurit, kuna aga tegemist on väga tundlike analoogsignaalidega, siis DC/DC muunduri mürane väljund võib põhjustada mõõtmises ebatäpsusi. Seetõttu on kõige otstarbekas kasutada DC/DC muundurit, et saavutada galvaaniline isoleeritus, aga muunduri väljundisse lisada lineaarregulaatorid, et tagada stabiilne toitepinge. Sarnaselt tava 3,3 V toiteliiniga on digitaal ja analoog ahelad eraldatud. Erinevalt põhiskeemi DC/DC muundurist, on isoleeritud muundurina kasutatud moodulit, mitte diskreetsetest komponentidest skeemi. Mooduli efektiivsus on madalam, aga tulenevalt madalast koormusest ei ole see niivõrd tähtis. Moodul on aga kompaktsem võrreldes diskreetsetest komponentidest muunduriga, mis on antud juhul olulisem. Samuti tulenevalt madalast koormusest ei mängi lineaarregulaatori kaod suurt rolli.

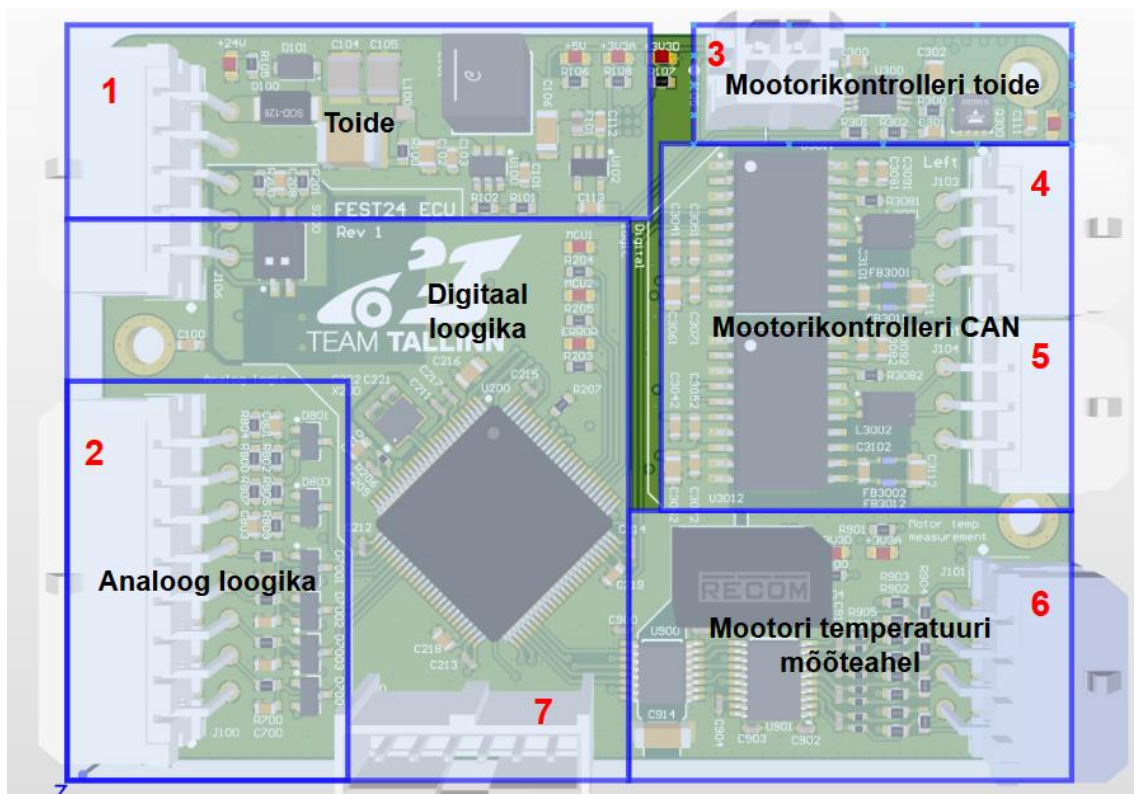
Pärast komponentide paigutust on kogu toiteskeemi pindala 630mm². Varasema aasta ECU kogu toiteskeemi pindala oli 620mm². Kui aga mitte arvestada isoleeritud toiteskeemiga, mida varasemal aastal ei olnud, siis on pindala 400mm². See on 35% väiksem võrreldes varasema aastaga.

2.5 Komponentide paigutus

FEST23 ECU analüüsist selgus, et mitu probleemi tekkis eelkõige trükkplaadi komponentide paigutusest, mistõttu tuleb sellel suurt tähelepanu panna. Komponentide paigutusel ja ühenduste vedamisele on suur mõju signaali kvaliteedile, mürakindlusele ja üldiselt trükkplaadi korrektsele toimimisele. Tulenevalt elektroonika kontrollüksuse

asukohast vormelis, on trükkplaadi suurus limiteeritud ning pistikute üldine asukoht ja suund defineeritud. Joonis 14 on näha lõplik trükkplaadi kuju ja komponentide paigutus. Lisaks on näha esialgne tsoonidesse jagamine, mis on tehtud, et vältida eri skeemi osade mitte tahetud mõju üksteisele. Tsoonidesse jagamisel ja komponentide paigutusel on peamiselt järgitud järgmisi aspekte [19]:

- Kõige tundlikumad ehk analoog signaalid on paigutada võimalikult kaugelt toiteskeemist, mootorikontrolleri toitelülitusest, CAN transiiveritest ja muudest suurtes müra allikatest
- Tsoonide vahelised signaalid on võimaluse korral filtreeritud
- Kõige tundlikumad ja mürarohkemad komponendid on võimalusel paigutatud eemale trükkplaadi servast. Iga tsooni kõige kriitilisemad komponendid on paigutatud võimalikult tsooni keskele.
- Kõikide signaaliradade pikkus on minimaliseeritud. Eelkõige kõige tundlikumad ja suuremad müra allikad. Näiteks analoog sisendid on paigutatud võimalikult lähedale mikrokontrolleri ADC-le. Samuti on toiteskeem koheselt pistiku kõrval, et hoida 24 V ala võimalikult väiksena.

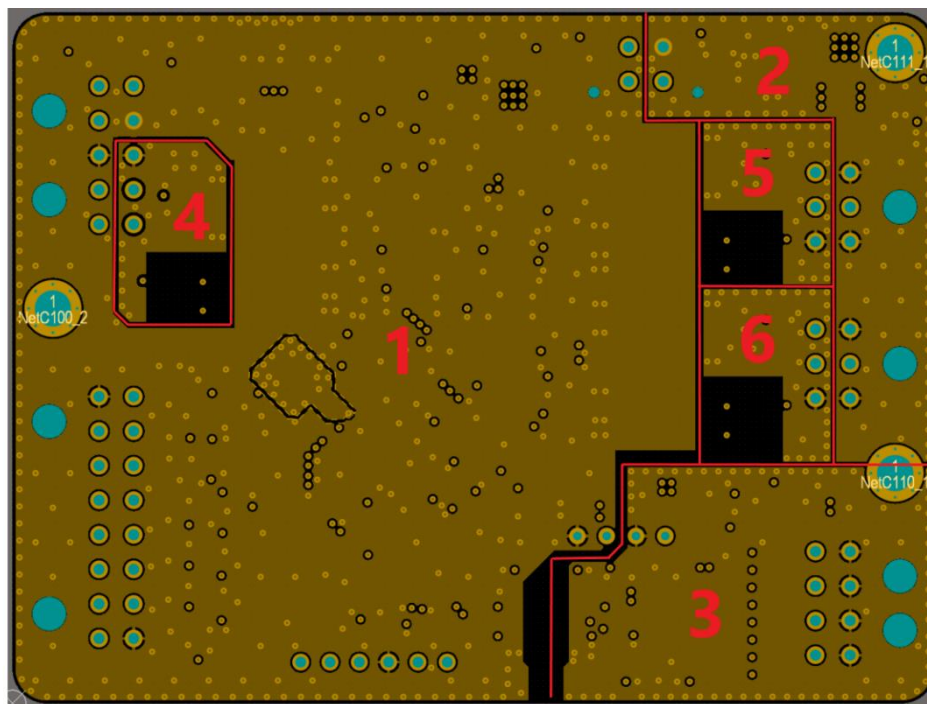


Joonis 14 . Elektroonika kontrollüksuse trükkplaat koos alamtsoonidega. Numbritega on märgitud pistikud

2.5.1 Referents tasandid

Trükkplaadi korrektsel toimimisel, signaalide kvaliteedil ja mürakindlusel mängib väga suurt rolli trükkplaadi maa ehk referents tasand. Valdavalt on kõige tõhusam kasutada kõikide signaalide puhul ühist referentsi, mis katab vähemalt ühel trükkplaadi kihil terve plaadi ala [6]. Tulenevalt vormeli madalpingesüsteemi kontseptsioonist, on ECU trükkplaadil 6 erinevat referents tasandit, millest 4 on galvaaniliselt eraldatud. Joonis 15 on näha ECU referents tasandite jaotus trükkplaadil.

Eraldatud referentsidega on eriti oluline jälgida komponentide ja trükkplaadi radade paigutus. Mitte ükski komponent ega rada ei tohi ületada mitut tasandit ilma et oleks loodud voolu tagasitee referentstasandite vahel. See on ka põhjus, miks Joonis 14 olevad tsoonid kattuvad suuresti referents tasandite paigutusega. Samal põhjusel on loodud ka voolutee referents tasandite „1“ ja „2“ vahel, mida on kirjeldatud Peatükis 2.2.



Joonis 15. ECU trükkplaadi referents tasandid. 1. – üldloogika, 2 – mootorikontrolleri toide, 3 – mootoritemperatuuri mõõteahel, 4-6 – CAN-võrkude referentsid

Disaini puhul on samuti tähtis jälgida trükkplaadi kihtide paigutust. Trükkplaat on nelja kihiline, kuna sellel on mitmeid eeliseid võrreldes 2 kihilise trükkplaadiga: komponentide paigutus, tervet plaati kattev referents tasand ning üldine parem mürakindlus. Kuue ja rohkema kihiga trükkplaatidel on veel mitmeid eeliseid, aga tulenevalt ECU nõuetest, ei põhjenda need eelised kõrgemat hinda.

Trükkplaadi kihtide ülesannete jagamisel on samuti mitu võimalust. ECU puhul on ülemisel ja alumisel kihil kõik komponendid ja signaali rajad. Kahel sisemisel kihil on referent ja toite tasandid. Kõrgsageduslike signaalide puhul on oluline tagada võimalikult väike vahe signaali radade ja referents tasandi vahel. See vähendab elektrilise müra levimist keskkonda ning samuti suurendab immuunsust välise müra vastu. Kuna referents tasand on lähemal pealmisele kihile, on ECU trükkplaadil kõik kriitilisemad signaalid paigutatud võimalusel pealmisele kihile ning välditud kihtide vahetust. Alumisel kihil on veetud vähem tähtsad signaalid.

2.5.2 Pistikute paigutus

Kõik trükkplaadi sisendid ja väljundid on jagatud vastavalt signaalide müratundlikkusele või kiirgatavale mürale klassidesse [29]. Sellele vastavalt on signaalid jagatud eri pistikute vahel, et üksteist mõjutavad signaalid omavahel eraldada ja minimaliseerida nende vahelisi häiringuid. Samuti on pistikud vastavalt sellel üksteisest füüsiliselt

eraldatud. Pistikute paigutamisel ja signaalide jagamisel on tehtud mitmeid kompromisse mehaanilistest piirangute tõttu, vormeli juhtmestuse lihtsustamiseks ning trükkplaadi komponentide paigutuse optimeerimiseks. Pistikute paigutus on näha Joonis 14, ning signaalid on jagatud järgnevalt:

- Pistik 1 – ECU toide ja valdav enamus digitaal signaale. Peamiselt mürarohked signaalid koos mõne vähetundliku signaaliga.
- Pistik 2 – Kõik analoog sisendid koos vajalike toite ja referents ühendustega. Kõige tundlikumad signaalid müra suhtes.
- Pistik 3 – Mootorikontrollerite toite sisend ja veepumba signaalid. Eraldatud ülejäänutest, et vältida mootorikontrolleri müra jõudmist muudesse alamskeemidesse
- Pistik 4 ja 5 – Mootorikontrollerite 24 V toite väljund ja CAN. Parema ja vasaku poole kontrollerite jaoks on eraldi pistikud. Kõik signaalid on suured müra allikad.
- Pistikud 6 – Mootoritemperatuuri sensorite sisendid. Müra suhtes väga tundlikud signaalid. Lähedus pistikutele 4 ja 5 on tingitud vormeli juhtmestuse lihtsustamisest.
- Pistik 7 – Programmeerimispistik mikrokontrolleri programmeerimiseks. Tavaolukorras on kasutuseta.

Samuti on signaalid pistikute sees sarnase loogikaga paigutatud. Igale signaalile on tagatud ka võimalikult lähedal vajalik referentsühendus, et minimaliseerida vooluringi pindala. Signaalid täpne paigutus on näha Lisas 2.

3 Tarkvara arendus

FEST24 ECU tarkvara arendusel on 2 peamist eesmärki

- Leida lahendus FEST23 ECU hangumise probleemile
- Parandada koodi struktuuri, loetavust ja portimise lihtsust

Varasemal aastatel oli ECU tarkvaras kasutusel reaalaaja operatsioonisüsteem. See oli otstarbekas, kuna enne FEST23-e jooksis ECU peal ka vormeli juhtimissüsteem, mis suurendas märgatavalt koodi keerukust ja ressursi kasutust [30]. Reaalaaja operatsioonisüsteem võimaldab paremini ajastada ülesannete täitmist ja neid prioritseerida. FEST24 kontseptsioon on sarnane FEST23-ga, kus juhtimissüsteem on eraldi arvuti peal. Seetõttu ei ole reaalaaja operatsioonisüsteemil enam otsest vajadust. ECU koodi lihtsustamiseks on kõik funktsionaalsused jagatud protsessideks, mida täidetakse perioodiliselt. Kõik protsessid on toodud Tabel 6. Ajastus on tehtud mikrokontrolleri sisemise taimeriga, kasutades katkestusi.

Tabel 6. ECU perioodilised tarkvara protsessid koos täitmise sagedusega

Protsess	Sagedus	Kirjeldus
Sõidu režiimi olekumasin	200 Hz	Sõidurežiimi olekumasinale oleku uuendamine
Vedrustuse sensorid	200 Hz	Vedrustus sensorite mõõtmine ja andmete edastamine üle CAN-võrgu
Pidurituli	200 Hz	Piduritule oleku uuendamine vastavalt sisenditele
Temperatuuride mõõtmine	100 Hz	Jahutusüsteemi ja piduritemperatuuride mõõtmine, keskmestamine ja üle CAN-võrgu edastamine sagedusega 10 Hz
Veatuvastus	100 Hz	Kontrollida CAN ühendust muude kontrollüksustega. Mõõta trükkplaadi pealt eri signaalide reaalseid väärtusi ning võrrelda seda loogika väärtusega. Valvetaimeri loenduri uuendamine
Jahutussüsteem	10 Hz	Veepumba ja ventilaatorite juhtimine vastavalt sisenditele.
Mootoritemperatuuri mõõtmine	10 Hz	Mootoritemperatuuride mõõtmine
ECU oleku edastamine	1 Hz	ECU oleku edastamine CAN-võrku, et lihtsustada CAN logist veatuvastust
Saadetavate CAN sõnumite puhvri tühjendamine	1 kHz	Puhvris olevad sõnumid saadetakse välja.

3.1 Tarkvara kihid

FEST24 ECU tarkvara on struktureeritud kolmeks kihiks:

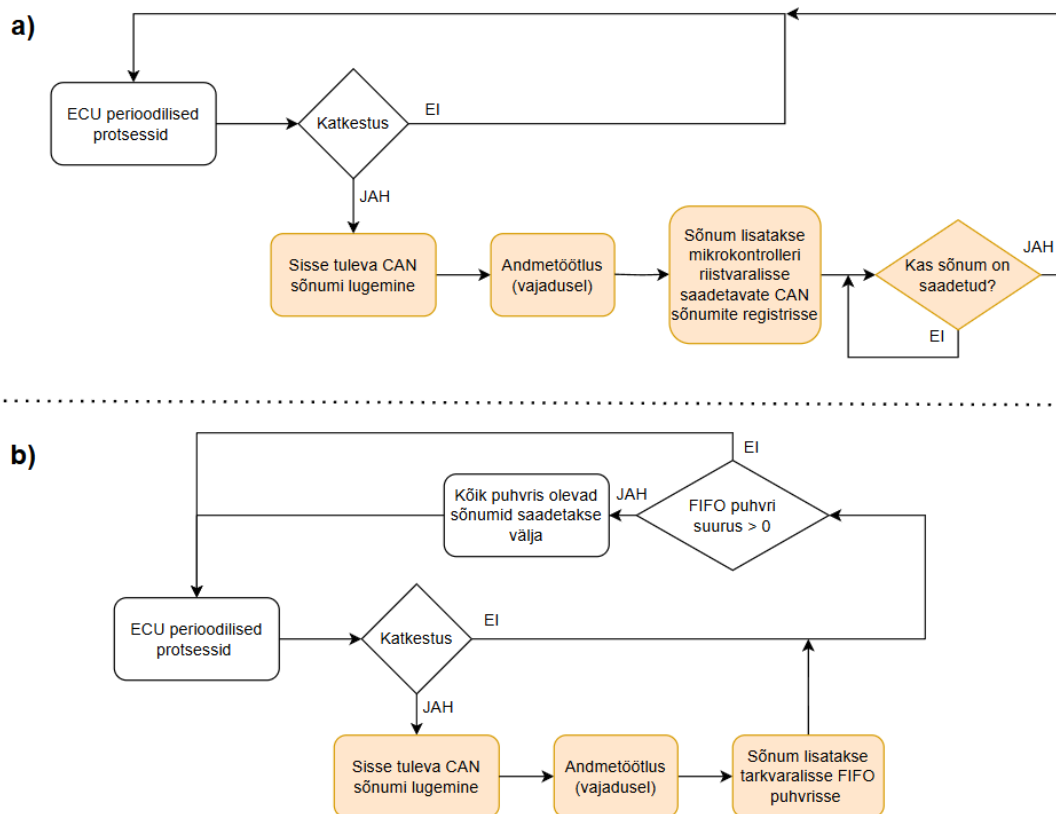
- Riistvara abstraktsiooni kiht
- Liidestuse kiht
- Rakenduse kiht

Kõige madalam kiht ehk riistvara abstraktsiooni kiht koosneb STM32CubeIDE keskkonnas genereeritud koodist, kus seadistatakse kõik vajalikud registrid ja liidesed. Joonis 6, lk 22 on näha mikrokontrolleri sisendite ja väljundite seadistust, millest on genereeritud koodi failid. Genereeritud failid on täielikult muutmata, et lihtsustada

tulevikus koodi portimist teisele mikrokontrollerile. Kõige kõrgem kiht on rakenduse kiht, mis sisaldab kogu funktsionaalset loogikat: sisendite lugemine, andmetöötlus, CAN sõnumite saatmine/vastu võtmine ja nii edasi. Keskmise ehk liidestuse kiht loob seosed rakenduskihi ja riistvara abstraktsiooni kihi vahel. Kiht sisaldab liideste lisa seadistusi, katkestuste haldust kui ka näiteks analoog digitaal muunduri sisendpinge ümberarvutusi. Kihiline struktuur võimaldab vajadusel tulevikus koodi lihtsasti portida erinevatele mikrokontrolleritele. Riistvara abstraktsiooni kiht tuleb uue mikrokontrolleri puhul uuesti genereerida. Liidestuse kihil tuleb teha mõningaid muudatusi, et kihtide vahelised seosed säiliks korrektselt. Rakenduse kihil pole vaja teha ühtegi muudatust.

3.2 CAN liides

CAN liidese muutmine on kõige suurem muudatus ECU tarkvaras. FEST23 elektroonika kontrollüksusel põhjustas CAN sõnumite peegeldamise loogika suure tõenäosusega mikrokontrolleri hangumist. Joonis 16 oleval plokskeemil a) on näha varasema aasta CAN sõnumite peegeldamise loogika, mis on kirjeldatud ka Peatükis 1.2.1 Probleemi tõenäosust võib veelgi suurendada mikrokontrolleri vahetus. FEST23 ECU peal oli kasutusel STM32H7 [7] seeria mikrokontroller, mille saadetavate CAN sõnumite registrisse mahub maksimaalselt 32 sõnumit. Arendataval ECU-l on kasutusel STM32F7 [8] seeria mikrokontroller, millel on vastava registri suurus ainult 3.



Joonis 16. Plokkskeem CAN sõnumite peegeldamise loogikast. a) FEST23 loogika, b) FEST24 loogika

Probleemi lahendamiseks on mitu lähenemist, millest 3 on:

- Kasutada sama loogikat, mis varasemalt. Täpselt tuvastada ECU hangumist põhjustav viga ning vastavalt sellele teha vajalikud muudatused.
- Kasutada reaalaaja operatsioonisüsteemi ning kasutada kogu selle võimekust probleemide vältimiseks. Näiteks on semaforide abil võimalik vältida andmete korrumpeerumist.
- Kasutada sõnumite saatmisel pollimist. Sõnumi vastu võtmine toimub sarnaselt katkestuste abil. Vastu võetud sõnum lisatakse puhvrisse, mis perioodiliselt tühjendatakse, saates sõnumid välja.

Varasema aasta täpse vea tuvastamine on väga aeganõudev, kuna viga esineb harva ja ainult kindlatel hetkedel. Kuna vormeli arendusel on aeg piiratud, siis see ei ole otstarbekas. Reaalaaja operatsioonisüsteem on kõige võimekam lahendus, mis võimaldab protsesse kõige paremini hallata ning vältida andmete samaaegset kasutust eri katkestuste poolt. Aga reaalaaja operatsioonisüsteemi korrektselt implementeerimine on samuti väga ajakulukas, kuna see tähendaks kogu koodi ümber struktureerimist. Pollimise lahendust

on kõige lihtsam implementeerida, aga see tekitab sõnumite peegeldamisel latentsust. Latentsust on aga võimalik minimaliseerida. Samuti on keeruline hinnata, mis ajast hakkab latentsus märgatavalt mõjutama vormeli sõitmist või mõne alamsüsteemi toimimist. Seetõttu on kõige väiksema ajakulu ja lihtsuse poolest mõistlik implementeerida pollimise lahendus.

Joonis 16 oleval plokk skeemil b) on näha uus CAN sõnumite peegeldamise loogika. Sõnumite vastu võtmine toimib samamoodi naga varasemalt kasutades katkestusi. Erinevalt varasemast lisatakse saadetak sõnum tarkvaralisse FIFO puhvrissi. Katkestus lõpeb koheselt peale sõnumi puhvrissi lisamist, mis vähendab katkestuse ajalist kestvust ning vähendab võimalust mitme katkestuse samaaegseks tekkeks. Sellel vaatamata on FIFO puhvrissi sõnumite lisamine ja eemaldamise hetkel katkestused välja lülitatud, et vältida varasemaid probleeme. Puhvris olevad sõnumid saadetakse perioodiliselt välja. Vormeli CAN-võrkudes on kõige kõrgema sagedusega sõnumid 200Hz ning puhvrit tühjendatakse sagedusega 1 kHz. See tähendab, et uuest loogikast tulenev maksimaalne latentsus on 1 ms. Lõik FIFO puhvrissi kirjutamise ja lugemise koodist on Lisas 5.

3.3 Valvetaimer

Igas olukorras varasema aasta mikrokontrolleri hangumisprobleemide vältimiseks on FEST24 ECU-l tagavarana implementeeritud valvetaimer. Mikrokontrolleri veatuvasust protsess uuendab perioodiliselt valvetaimeri loendurit. Mikrokontrolleri hangumisel või muu vea olukorra puhul, mis takistab perioodilisi protsesse, jõuab loendur nulli ning mikrokontroller taaskäivitatakse automaatselt. Taaskäivitamine lähtestab kõik mikrokontrolleri olekud algseisundisse. See aga võimaldab vea korral juhil uuesti sõidurežiimi minna ja sõitmist jätkata. Samuti parandab see turvalisust, kuna võimaldab rohkem veaolukordi tuvastada.

4 Testimine ja analüüs

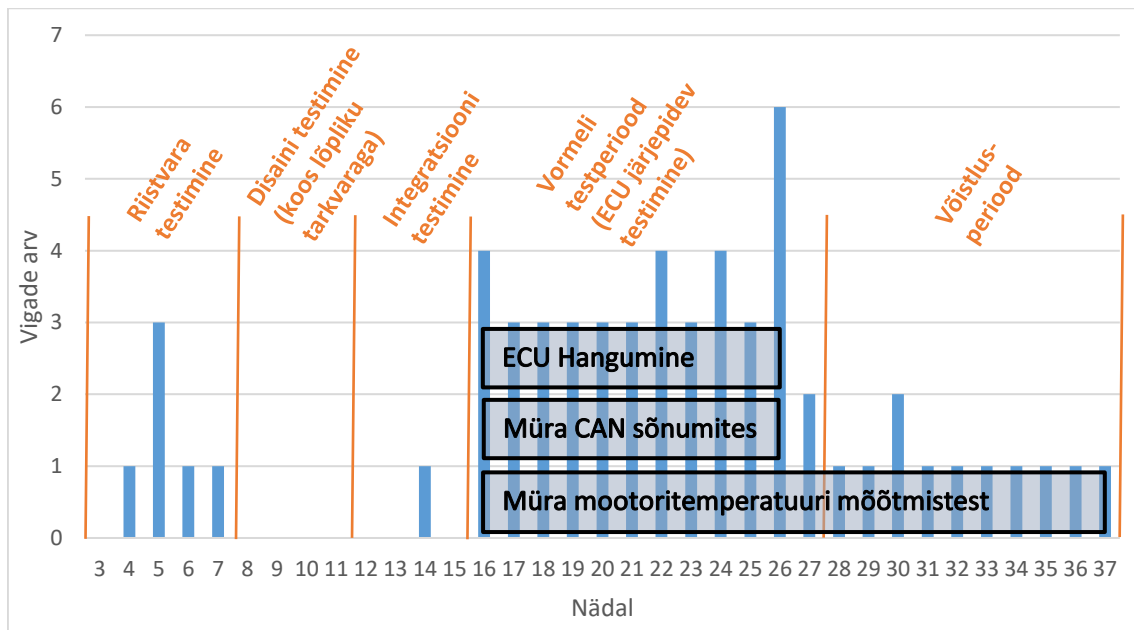
Elektroonika kontrollüksuse analüüs keskendub perioodile jaanuar 2024 kuni september 2024, mis on aeg trükkplaadi valmimisest kuni võistlushooaja lõpuni. Testimise ja analüüsi etapid on jagatud järgnevalt:

- Trükkplaadi funktsioonide eraldiseisvalt testimine, et verifitseerida riistvara toimimine
- Trükkplaadi kogu funktsionaalse korraga testimine koos tarkvaraga. Võimaldab verifitseerida tarkvara ja kõikide riistvara funktsioonide samaaegset toimimist.
- Integreerida ECU vormelisse ja testida funktsionaalsust kõikide teiste alamsüsteemidega.
- Jälgida ECU toimimist kogu perioodi jooksul ja dokumenteerida kõiki probleeme ning muid tähelepanekuid. Tekkinud probleemid lahendada.
- Analüüsida nõuetele vastavust, mis on sisendiks järgmise aasta ECU arendusse.

Kõik etapid ja tekkinud probleemid on täpsemalt kirjeldatud järgnevates alapeatükkides.

4.1 ECU testimine

Eri elektroonika kontrollüksuse testimise perioodid ja tekkinud vead on näha Joonis 17. Eraldi on märgitud 3 suuremat viga, mis on kirjeldatud Peatükis 4.2. Muud vead on lihtsamad koodi või tootmisvead.



Joonis 17. Elektroonika kontrollüksuse vead igal ajahetkel perioodil 01.24 - 09.24. Eraldi on märgitud 3 terve perioodi vältel püsinud peamist viga.

4.1.1 Trükkplaadi testimine

Peale trükkplaadi esialgset visuaalset kontrolli ja ühenduste testimist tuleb testida trükkplaadi funktsioonid vastavalt püstitatud funktsionaalsetele nõuetele. Igale funktsionaalsele nõudele vastav riistvara funktsionaalsus testiti eraldiseisvalt koos ainult vajamineva tarkvaraga ning tulemusi võrreldi nõuetes püstitatud parameetritega. Trükkplaadi testimise käigus esines 4 viga, mis kõik olid tingitud tootmisvigadest. Pärast valede komponentide vahetamist toimisid kõik ECU vajalikud funktsionaalsused.

Peale eraldisesvate funktsionaalsuste testimist tuli testida ECU disain tervikuna koos lõpliku tarkvaraga. Kuna vormeli testimisaeg on piiratud, siis on võimalikult paljud ECU funktsionaalsused testitud vormelist eraldiseisvalt. See võimaldab testida ECU riistvara ja tarkvara tervikuna simuleerides kõiki vajalike ühendusi. CAN-võrgu simuleerimiseks on kasutatud CANtrace tarkvara. See võimaldab simuleerida teiste kontrollüksuste poolt saadetavaid CAN sõnumeid, testida sõidurežiimi olekumasinat ning testida erinevaid turvamehhanisme. Testimine toimus iteratiivselt, parandades jooksvalt kõik tekkinud probleemid, seetõttu ei ole ka Joonis 17 nädalatel 8-11 märgitud ühtegi viga.

4.1.2 Integratsioon vormelisse

Peale ECU eraldiseisvat testimist tuleb trükkplaat integreerida vormelisse. Kõik ECU ühendused testiti koos teiste alamsüsteemidega vastavalt testplaanile. Tulenevalt ECU eelnevast põhjalikust testimisest ei esinenud ECU tarkvaras ühtegi suurt probleemi, mis

takistaks vormeli sõitmist. Ainuke probleem tulenes ECU CAN-võrgu andmebaasi failist, kus mõne muutuja kordajad olid valed. See põhjustas vigu ECU saadetavate sõnumite lugemises teiste kontrollüksuste poolt. Seega võimaldavad integratsiooni testid testida ka kõikide ECUga seotud komponentide toimimist: kõik sensorid on korrektselt ühendatud, pidurituli ja sumisti toimivad korrektselt ning suhtlus üle CAN-võrgu toimib kõikide kontrollüksustega. Nendest viimane ongi kõige suurema tähtsusega, et tagada vormeli korrektne ja turvaline toimimine.

Peale kõikide süsteemide integreerimist ja vormeli sõitma saamist on vormeli peamine testperiood. Selle aja vältel testitakse kõikide komponentide, kaasa arvatud ECU, töökindlust ning lahendatakse kõik võimalikud tekkinud probleemid. Joonis 17 on näha, et sellel perioodil tekkis mitmeid vigu aga valdav enamus nendest olid lihtsasti parandatavad koodivead. Nädalatel 26 ja 30 on näha mitmeid uusi probleeme. Kõik tekkinud vead olid seotud isejuhtiva süsteemiga. Vead avaldusid niivõrd hilja tulenevalt vähesest eelnevast isejuhtiva süsteemi testajast. Siiski olid kõik probleemid lihtsad koodivead.

4.1.3 CAN-võrgu filtreerimine

Peatükis 2.3 kirjeldatud CAN-võrgu filtri efektiivsuse testimiseks lisati esialgsel testimisel filter ainult ühele mootorikontrolleri CAN-võrgu ühendusele. See võimaldab võrrelda CAN logide põhjal filtri efektiivsust. Aga peale mõningast testimist ei esinenud üheski mootorikontrolleri sõnumis müra, mis ei võimalda filtri efektiivsust hinnata. Tulenevalt ECU asukohast vormelis on keeruline ka ostsilloskoobiga mõõta CAN signaale, et filtri efektiivsust hinnata. Mõõtejuhtmete parasiit mahtuvus ja induktiivsus häirivad CAN-võrgu toimimist.

Kuna aga ilma filtrita CAN-võrgus ei esinenud nähtavat müra, siis filtril ei ole eesmärki. Filter võib just teatud olukordades häirida CAN-võrgu toimimist [25]. Sellest võib eeldada, et FEST23 ECU-l olev probleem oli põhjustatud trükkplaadi välisest probleemist, mida FEST24 puhul ei eksisteeri. Samas ei saa välistada, et probleem oli tingitud ECU tarkvarast, kuna tarkvaras on erinevuseid.

4.2 Tekkinud probleemide analüüs

Testperioodi ajal tekkis elektroonika kontrollüksusega mitmeid probleeme, valdav enamus neist olid põhjustatud lihtsatest tootmisvigadest või koodivigadest. Allpool on aga kirjeldatud suuremad probleemid, mis tulenesid otseselt ECU disainist.

4.2.1 CAN-võrgu müra ja hangumine

Esialgsel testimisel oli kasutusel sarnane CAN sõnumite saatmise ja vastuvõtmise loogika nagu varasematel aastatel. Sõnumite saatmise funktsioon on näha Joonis 18. See võimaldas probleemi edasi analüüsida ja ei takistanud teiste alamsüsteemide ja vormeli üldist testimist. Siiski sarnaselt varasema aastaga oli ikka probleem ECU hangumisega. See kinnitas hüpoteesi, et probleem tuleneb CAN sõnumite peegeldamise loogikast.

```
void canCtrlLeftTransmit(CANMsg *msg){

    CAN_TxHeaderTypeDef txHeader;
    uint32_t txMailbox;

    txHeader.DLC = msg->len;
    txHeader.StdId = msg->id;
    txHeader.IDE = CAN_ID_STD;
    txHeader.RTR = CAN_RTR_DATA;

    // Lisa sõnum saadetavate sõnumite registrisse
    if (HAL_CAN_AddTxMessage(hcan_ctrl_left, &txHeader, msg->data,
        &txMailbox) != HAL_OK) {
        Error_Handler();
    }

    // Oota sõnumi saatmist
    while (HAL_CAN_GetTxMailboxesFreeLevel(hcan_ctrl_left) != 3) {
    }
}
```

Joonis 18. Funktsioon CAN sõnumite saatmiseks

ECU koodi profileerimine aitab probleemi paremini mõista. Profileerise eesmärk on mõõta aega saatmise funktsioonis olevas *while* tsüklis. Osa profileerimise tulemustest on näha Joonis 19. *loop_start* tähistab *while* tsükli algust ja *loop_end* tähistab lõppu. CAN-võrgus saadetakse sõnumeid kõige kõrgema sagedusega 200 Hz ehk iga 5 ms tagant. Seda on näha ka profileerimise tulemustest, kus iga umbkaudu iga 5 ms tagant on pikem paus

tsükli lõpu ja alguse vahel, näiteks ajahetkedel 57486 μs ja 62359 μs . Mõõtmiste põhjal on kood tsükli kinni keskmiselt 103 μs . 6 sõnumi saatmiseks kulub 1060 μs , millest 58% ajast on kood *while* tsükli kinni. Profileerimise ajal on simuleeritud ainult kahe mootorikontrolleri sõnumite peegeldamist ning CAN-võrgus pole muid seadmeid, mis tähendab, et reaalses olukorras on võrgukoormus märgatavalt kõrgem ning aeg *while* tsükli on veel pikem.

loop_end	:	53057 us		+	117 us
loop_start	:	57486 us		+	4429 us
loop_end	:	57587 us		+	101 us
loop_start	:	57729 us		+	142 us
loop_end	:	57831 us		+	102 us
loop_start	:	57850 us		+	19 us
loop_end	:	57964 us		+	114 us
loop_start	:	57976 us		+	12 us
loop_end	:	58041 us		+	65 us
loop_start	:	58174 us		+	133 us
loop_end	:	58292 us		+	118 us
loop_start	:	58429 us		+	137 us
loop_end	:	58546 us		+	117 us
loop_start	:	62359 us		+	3813 us
loop_end	:	62474 us		+	115 us
loop_start	:	62489 us		+	15 us

Joonis 19. CAN sõnumite saatmisfunktsiooni profileerimise tulemused. Vasakpoolses tulbas on mõõdetavad ajahetked, keskmises tulbas on üldine aeg ja parempoolses tulbas ajadelta eelmise punktiga

Lisaks ECU hangumisele esines CAN sõnumites uus probleem. Joonis 20 on näha vedrustussensori mõõtetulemused sõidu ajal. CAN logist on selgelt näha müra, kus suvalistel hetkedel saadetakse CAN-võrku ebaloogiline väärtus. Probleem esines ka muude ECU sõnumitega, mida saadetakse sagedusega 200 Hz. Madalama sagedusega sõnumitel sellist probleemi ei esinenud. Samuti ei esinenud erinevalt eelmisest aastast probleeme mootorikontrolleri sõnumitega.

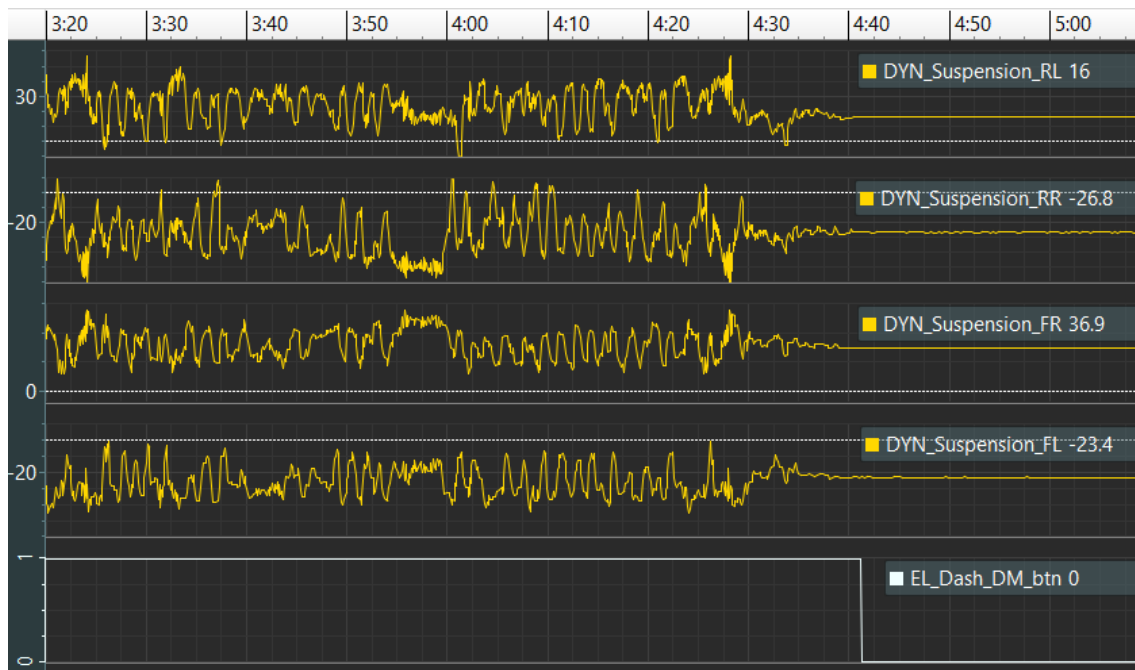
Samuti on alati kõik ühes CAN kaadris olevad andmed ebaloogilised, mis kinnitab, et terve kaader on korrumpeerunud, mitte ainult üksikud biti vead. Andmed peavad korrumpeeruma enne kui kaader lisatakse mikrokontrolleri saadetavate sõnumite registrisse, või siis registrisse kirjutamise hetkel. Vastasel juhul oleks vea ka CRC väärtuses, mis arvutatakse riistvaras. Kui CRC väärtuses oleks viga, siis seda sõnumit ei võetaks vastu [4]. See kinnitab veelkord, et CAN sõnumite saatmisloogika on

problemaatiline. Kõige tõenäolisem põhjus on, et mitme samaaegse katkestuse korral saadetavad andmed kirjutatakse osaliselt üle.



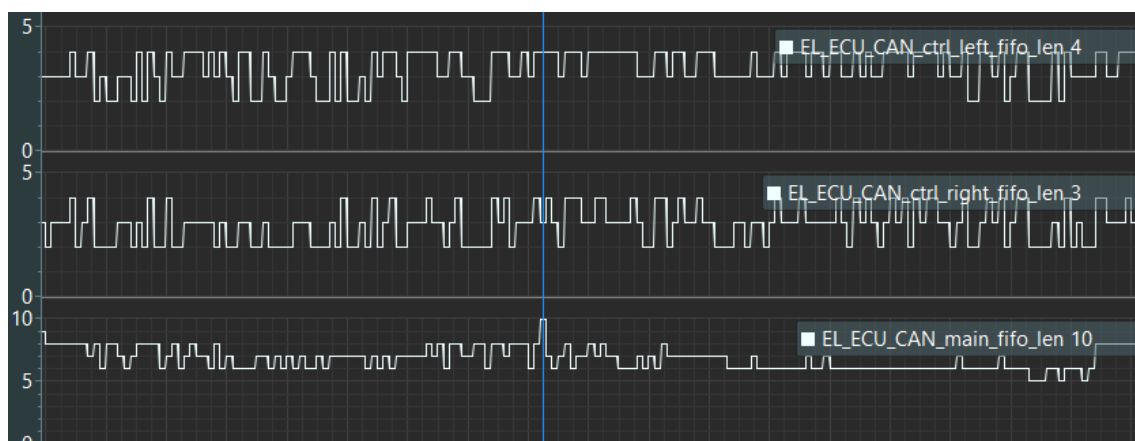
Joonis 20. Vedrustus sensorite mõõtetulemused algse CAN saatmise loogikaga

Joonis 21 on näha vedrustussensori mõõtetulemused peale Peatükis 3.2 kirjeldatud loogika implementeerimist. Mõõtmistulemustes pole enam ebaloogilisi väärtusi, mis olid nähtavad eelnevalt. Samuti peale uue loogika kasutusele võtmist kadus probleem ECU hangumisega. CAN-võrgu logi ja juhi tagasiside põhjal ei mõjutanud lisandunud latentsus ka kuidagi vormeli sõidetavust ega ühegi süsteemi tööd.



Joonis 21. Vedrustussensorite mõõtetulemused uuendatud CAN sõnumite saatmise loogikaga

Võimalike uute probleemide lihtsamaks tuvastamiseks saadab ECU CAN-võrku ka saadetavate CAN sõnumite FIFO puhvri pikkust, mis võimaldab seda logida. Joonis 22 on näha CAN logi iga CAN-võrgu saadetavate sõnumite puhvri suurusest. CAN-võrku edastatakse iga 1 s tagant viimase sekundi maksimaalne puhvri suurus. Madal sagedus on tingitud sellest, et vältida võrgukoormuse suurenemist. Üld CAN-võrgu saadetavate sõnumite puhvris oli maksimaalselt samal ajal 10 sõnumit. See näitab selgelt, kui suur koormus oli eelneva loogika puhul, kus saadetavate sõnumite puhver mahutas maksimaalselt 3 sõnumit korraga.



Joonis 22. CAN logi iga CAN-võrgu saadetavate sõnumite maksimaalsest puhvri pikkusest vormeli sõitmise ajal

4.2.2 Mootori temperatuuri mõõtmine

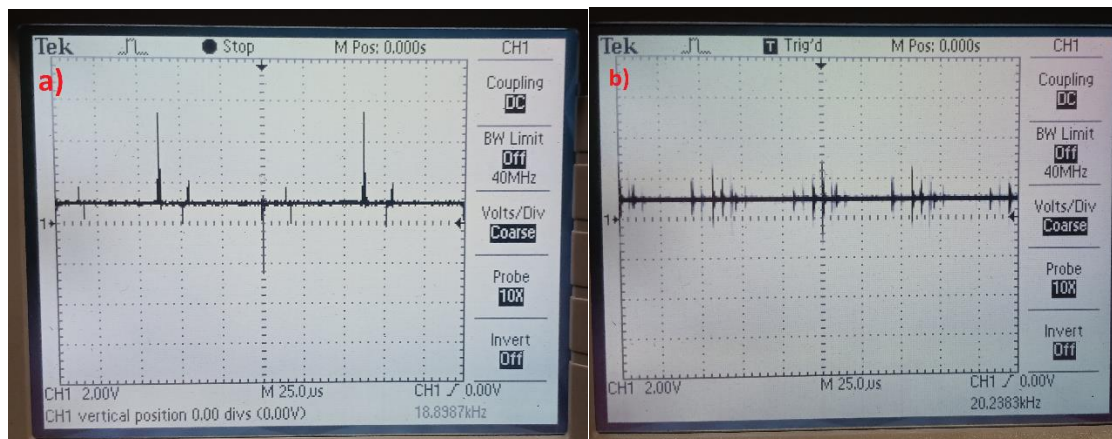
Teine suurem probleem, mis testimise käigus ilmnas, oli müra mootoritemperatuuri mõõteahelas. Joonis 23 oleval graafikul on näha lõik vormeli CAN-võrgu logist, hetkest kus vormel hakkab sõitma. Terve selle aja vältel on vormelil kõrgepinge aktiveeritud, mis tähendab, et pinge jõuab pingevahelditeni. Ajahetkel „1“ lülitatakse vormel sõidu režiimi, mis tähendab, et pingevaheldi väljund lülitakse sisse ja pinge jõuab ka mootoritesse. Ajahetkel „2“ hakkab vormel sõitma, mida on võimalik näha kiiruse graafikult. Joonisel on näha ka vasaku tagumise mootori temperatuuri graafik, kust on näha, et ajahetkel „1“ temperatuur langeb umbkaudu 3 °C ja ajahetkel „2“ temperatuur tõuseb tagasi algsele tasemele. Ajahetkede „1“ ja „2“ vahel vormel seisab ja ei toimu ühtegi protsessi, mis põhjendaks järsku temperatuuri langust. Sellest saab järeldada, et temperatuuri muutus on tingitud veast mõõteahelas, mitte reaalsest temperatuuri muutusest.



Joonis 23. Ekraanipilt CAN logist. Graafikul on näha ülevalt alla on vormeli kiirus, sõidu režiimi olek ja ühe mootori temperatuur.

ECU saadab mootoritempi andmeid CAN-võrku sagedusega 10 Hz mistõttu ei ole võimalik Joonis 23 näha müra karakteristikuid. Näha on ainult keskmestatud mõõtetulemuse muut. Müra sageduse ja amplituudi mõõtmiseks on vaja mõõta pinget ECU sisendis enne filtreid ja analoog-digitaal muundurit. Joonis 24 on näha mõõtetulemused ühe sensori *wheatstone*-i silla väljunditest. Vasakpoolsel mõõtmisel on

näha pingetippe amplituudiga 4 V ja sagedusega 8 kHz, mis kattub vaheldi lülitussagedusega [3]. Sellest saab selgelt järeldada, et viga temperatuuri mõõtmisest tuleneb vaheldi lülitustel tekkivast müra.



Joonis 24. Wheatstone silla väljundpinged referentsi suhtes. a) + väljund, b) – väljund. Mõlema mõõtmise ajal on vormel sõidurežiimis.

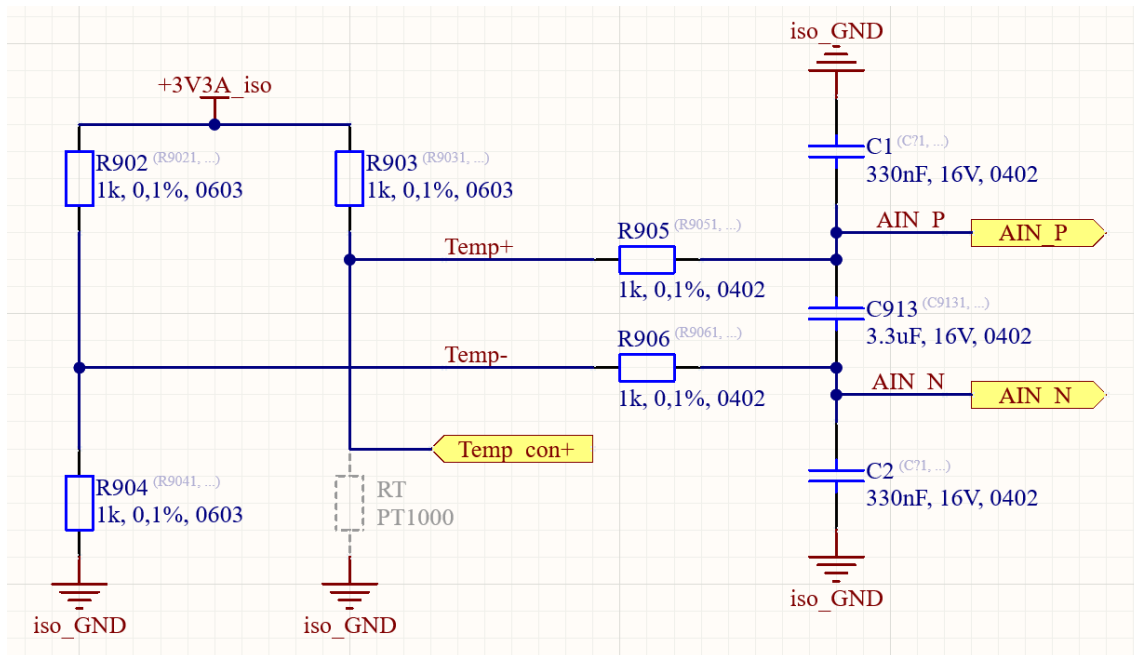
3-faasi kõrgepinge vaheldi on vormelis kõige suurem elektrilise müra allikas. Vaheldi lülitab kõrge sagedusega kõrget pinget ja suurt voolu. Tekitava müra saab jagada mitmeks komponendiks, millest üks on sünfaasmüra ehk *common-mode* müra. sünfaasvool liigub mööda kõiki faase ühes suunas ja liigub tagasi vaheldini kõige madalama impedantsiga teed [31]. Üldjuhul on selleks madalpinge referents ehk maa, aga see võib olla ka muu juhe või hoopis üle õhu. Tekkinud sünfaasvool tekib lülitushetkedel vastavalt valemile (9) [32] ning sõltub peamiselt sünfaaspinge muutumise kiirusest $\frac{dV}{dt}$. sünfaaspinge näitab vaheldi väljundis olevat faasipingete summat maa suhtes. Kuna 3-faasi vaheldi faaside lülitamisel on faasinihe 120° , siis vaheldi tavalisel toimimisel on sünfaaspinge sammfunktsioon astmega $\pm \frac{\text{vaheldi sisendpinge}}{3}$ [31] Valemis (9) on C parasiit mahtuvus maa ja kõrgepinge juhtmete vahel, mis loob kõrgesageduslikule mürale voolutee maani.

$$I_{CM} = C \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

Mootoritemperatuuri mõõtevea kõige tõenäolisem põhjus ongi vaheldi tekitatud sünfaasmüra. Sünfaasvool on kõige suurem just hetkel kui mootorid seisavad. Sellises olukorras lülituvad vaheldi kõik faasid samaaegselt täiteteguriga 50%, mis tähendab, et mootoris on kõikide faaside vaheline efektiivne pinge 0 V. See aga tähendab, et sünfaaspinge graafik ei ole enam sammfunktsioon, vaid on nelinurksignaali, mis

omakorda tähendab $\frac{dV}{dt}$ ning valemist (9) tulenevalt sünfaasvool on kolme kordne. See ka selgitab, miks probleem kaob nii pea kui vormel sõitma hakkab.

Probleemi lahendamiseks on 2 peamist võimalust: vaheldi tekitatud müra vähendamine või parendada ECU trükkplaadil signaali filtreerimist. Vaheldi tekitatud müra vähendamine on väga keeruline ja aeganõudev, mis nõuab põhjaliku simuleerimist ja testimist. See ei ole ka antud töö raames otstarbekas. Sünfaasmüra filtreerimiseks on näha Joonis 25 ühe mõõteahela täiustatud filter. Võrreldes Joonis 9, lk 29 oleva esialgse filtriga on lisatud kondensaatorid C1 ja C2. Erinevalt tavalisest madalpääsu filtrist, peab arvestama 2 erineva lõikesagedusega: diferentsiaalsignaali lõikesagedusega f_{DIF} ning sünfaassignaali lõikesagedusega f_{CM} . Lõikesagedused on võimalik arvutada valemitega (10)(11), kus R on jadatakistite väärtus C_{DIF} on diferentsiaal signaalide vahelise kondensaatori väärtus ja C_{CM} signaalide ja maa vaheline kondensaator. Joonis 25 olevate komponentide väärtustega on lõikesagedused $f_{DIF} = 22,9 \text{ Hz}$ ja $f_{CM} = 482,3 \text{ Hz}$. Lõikesagedused on valitud, et komponentide tolerantside ja radade pikkuste erinevuste tõttu ei muundataks sünfaasmüra diferentsiaal signaaliks [33].

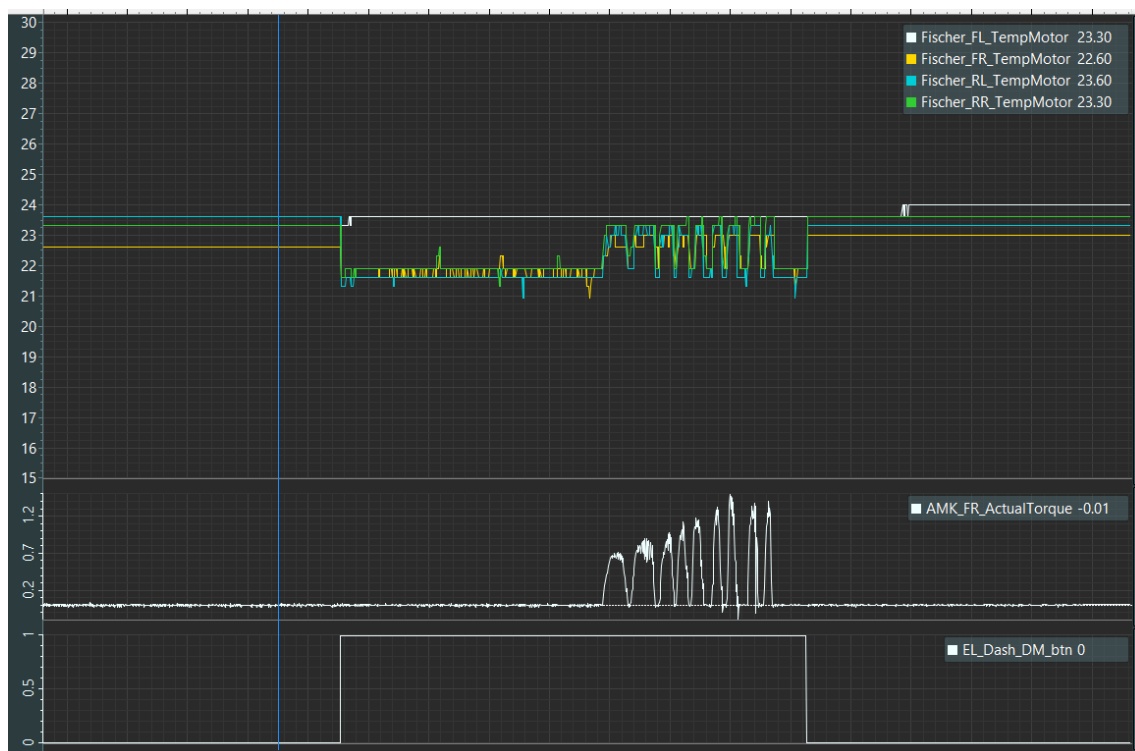


Joonis 25. Mootori temperatuuri sensori mõõtmiseks kasutatav wheatstone sild koos muudetud madalpääsufiltriga

$$f_{CM} = \frac{1}{2\pi RC_{CM}} \quad (10)$$

$$f_{DIF} = \frac{1}{2\pi(2R)(C_{DIF} + \frac{1}{2}C_{CM})} \quad (11)$$

Filtri testimiseks on filter lisatud vasaku esimese mootori temperatuuri mõõteahelale. Joonis 26 on näha mõõtetulemused pärast filtri muutmist, *Fischer_FL_TempMotor* graafik näitab selgelt filtri tõhusust. Kõikide teiste mootorite temperatuurid langevad sõidurežiimi sisse lülitamisel umbkaudu 2 °C ning taastuvad rataste pöörlemisel. Vasaku esimese mootori temperatuur püsib terve aja vältel loogilisel tasemel.



Joonis 26. CAN logi temperatuuri mõõtetulemustest pärast madalpääsfiltri muutmist

Kuna aga probleem esineb ainult vormeli seismise ajal kindlas olukorras ja ei mõjuta turvalisust sõitmise ajal, siis trükkplaadi muutmisest tulenev lisakulu ja aeg ei õigusta ennast. Samuti ei kahjusta kõrged pinged piigid analoog-digitaal muundurit, kuna muunduril on sisendites ülepinge kaitse diodid ning vool on limiteeritud jada takistitega. Parendatud filter tuleb kasutusele võtta järgneval aastal.

4.3 Nõuetele vastavus

Elektroonika kontrollüksuse funktsionaalsete nõuete verifitseerimist on kirjeldatud eelnevates peatükkides. Ka peale esialgset testimist toimus ECU kogu analüüsitava

perioodi vältel vastavalt püstitatud funktsionaalsetele nõuetele. Lisaks vastas ECU ka mõningate mööndustega kõikidele püstitatud mittefunktsionaalsetele nõuetele. Tulenevalt eelnevas peatükis kirjeldatud probleemidele vastas ECU kõikidele nõuetele 15 päeva enne võistlusperioodi erinevalt planeeritud 1,5 kuust. Järgnevalt on kirjeldatud kõikidele Tabel 3 olevatele nõuetele vastavus.

- Nõue 3 - FEST24 ECU trükkplaat on eelneva aasta ECU-st 17% väiksem. Seda koos lisandunud mootoritemperatuuri mõõtelogikaga. Varasema aasta ECU-ga samaväärne funktsionaalsus on 28% väiksemal pindalal. Joonis 27 on näha mõlemad trükkplaadid.



Joonis 27. FEST24 ECU (vasak) ja FEST23 ECU (parem) trükkplaatide võrdlus

- Nõue 1 - Kompaktsem komponentide paigutus on üldjuhul kompromiss signaali kvaliteediga. Korrektne elektriskeemi disain ja komponentide paigutus aga võimaldas signaali kvaliteedi probleeme vältida. Vormeli CAN logide ja trükkplaadi mõõtmiste põhjal ei ole ühelgi signaalil tuvastatavat müra, mis häiriks ECU või mõne muu süsteemi funktsionaalsust. Joonis 21 on näha FEST24 ECU vedrustussensorite mõõtetulemusi, mis olid varasema aasta ECU üks peamisi probleeme. Mõõtmistes ei ole näha tuvastatavat müra, nagu oli näha eelneval aastal. Erandiks on müra mootoritemperatuuri mõõtmistes. Kuna aga müra põhjus on teada koos lahendusega, siis saab ikkagi lugeda nõuet täidetuks.

- Nõue 2 - ECU trükkplaadi eri keskkondades toimimise testimiseks kasutati tudengivormelis elektroonika testimiseks valmistatud keskkonna testkambrit [34]. Kamber võimaldab trükkplaadi nõuetele vastavust testida 50 °C keskkonnas. Lisaks seadistati testi vältel relatiivne niiskus kambris 75%-ni, et simuleerida sooja niisket keskkonda, mis võib võistlustel esineda. Testi kestvus oli 20 minutit. Testi vältel ei esinenud ECU funktsionaalsuses ühtegi viga. Kogu testi vältel mõõdetu mikrokontrolleri ja 3,3 V toite lineaarregulaatori temperatuuri. Kummagi kiibi temperatuur ei tõusnud üle 53 °C. Temperatuurist tulenevaid probleeme ei tekkinud ka võistlusperioodi ajal, kus õhutemperatuur oli ka üle 40 °C ning vormelis sees 49 °C.
- Nõue 4 - Peale eelnevas peatükis kirjeldatud CAN-võrgu probleemide lahendamist ei esinenud ECU töökindlusega peaaegu ühtegi probleemi. Selle perioodi vältel esinesid ainult üksikud lihtsasti parandatavad vead tarkvaras seoses isejuhtiva süsteemiga, mis tähendab, et töövõime aeg ehk uptime on alla 100%. Sellele vaatamata on töövõime aeg juhiga sõitmisel jätkuvalt 100% ning sama ka võistluste ajal. Seega võib nõuet lugeda samuti täidetuks

4.4 Edasised arendused

Elektroonika kontrollüksuse analüüsist selgus, et pärast tekkinud probleemide lahendamist vastas disain mõningate mööndustega kõikidele püstitatud nõuetele. Sellele vaatamata on disainiaspekte, mida saaks parandada või edasi arendada. 3 peamist muudatust, mida järgmise aasta ECU-l implementeerida:

- Peatükis 4.2.2 kirjeldatud mootoritemperatuuri mõõteahela filtreerimise parendamine. Lisaks madalpääsu filtri muutmisele on otstarbekas implementeerida ülepinge kaitse, et kindlalt vältida ADC kahjustusi.
- Taas kasutusele võtta reaalaaja operatsioonisüsteem. See annab parema kontrolli protsesside haldamisele ning võimaldab teoorias väiksema latentsusega ja töökindlamalt lahendada CAN sõnumite saatmise.
- Edasi arendada valvetaimeri implementatsiooni. Valvetaimeri rakendumine peaks olema tuvastatav CAN logist, et lihtsustada võimalike probleemide lahendamist. Samuti peaks ECU olek olema salvestatud mikrokontrolleri püsimälsusse, et

taaskäivitamise korral säilitada eelnev olek. See aga tähendaks ka lisa turvafunktsionaalsuste lisamist.

Lisaks eelpool mainitud muudatustele oleks võimalik ECU disaini lihtsustada, kui muuta elektroonika süsteemi kontseptsiooni. Kõige suurem muudatus oleks, kui VCU suhtleks otse mootorikontrolleritega. Selle peamine eelis on, et ECU ei pea eri CAN-võrkude vahel sõnumeid peegeldama, mis lihtsustaks märgatavalt ECU disaini. Samuti vähendaks see kogu süsteemi võimalike veakohti, samal ajal oleks võimalik säilitada turvalisus. VCU otse suhtlusel mikrokontrolleritega tekitab aga mitmeid teisi probleeme, mille analüüs ei kattu antud töö teemaga.

Kokkuvõte

Magistritöö eesmärk oli arendada tudengivormelile FEST24 elektroonika kontrollüksus. Töö käsitleb kogu arendusprotsessi ning valminud trükkplaadi analüüsi 8 kuu pikkuse testperioodi vältel. Peamine rõhk on varasema aasta probleemide lahendamisel ning muude vajalike muudatuste implementeerimisel. Eelneva aasta disaini analüüsist selgus mitu suurt probleemi, millele tuli lahendus leida. Samuti lisandus ECU-le mootoritemperatuuri mõõtmise funktsionaalsus ning omitmeid väiksemaid muudatusi. Vastavalt kõikide sisendite põhjal püstitatud nõuetele disainiti ECU riistvara ja tarkvara.

Testperioodi ajal ilmnas elektroonika kontrollüksusel 3 suuremat probleemi. Mootorikontrolleritest tulenev sünfaasmüra mõjutas mootoritemperatuuride mõõtmistäpsust ning tarkvarast tulenevad probleemid põhjustasid ECU hangumist ja müra CAN-sõnumites. Kõikide probleemide põhjalik analüüs võimaldas selgitada vea allikad ja need lahendada. Kokkuvõttes ei ole perioodi lõpuks ECU-l ühtegi varasemal aastal esinenud probleemi ega ühtegi muud püsivat probleemi, mis häiriks vormeli toimimist.

Töö tulemusena valmis elektroonika kontrollüksus, mis vastas kõikidele püstitatud funktsionaalsetele nõuetele. Samuti vastas ECU mõningate mööndustega mittefunktsionaalsetele nõuetele. Rohkema funktsionaalsusega oli trükkplaat 17% väiksem võrreldes varasema aastaga. Samuti ei tekkinud võistlusperioodil ühtegi probleemi, mis oleks takistanud vormeli sõitmist.

Edasiste arendustena tuleb korrektselt trükkplaadile lisada mootoritemperatuuri ahelasse filter, et filtreerida mootorikontrollerite tekitatud sünfaasmüra. Lisaks saab tarkvaras edasi arendada CAN sõnumite saatmis loogikat ja valvetaimerit.

Kasutatud kirjandus

- [1] „Formula Student Rules 2024,“ 2024. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf. [Kasutatud 23 Aprill 2025].
- [2] „Formula Student Team Tallinn,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.formulastudent.ee/et/>. [Kasutatud 02 Mai 2025].
- [3] „AMK RACING KIT 4 wheel drive "Formula Student Electric",“ Märts 2020. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 15 Aprill 2025].
- [4] „CAN Specification Version 2.0,“ Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Stuttgart.
- [5] „The FreeRTOS™ Reference manual,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.freertos.org/media/2018/FreeRTOS_Reference_Manual_V10.0.0.pdf. [Kasutatud 30 Märts 2025].
- [6] H. W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [7] STMicroelectronics, „Datasheet - STM32H735xG,“ November 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h735zg.pdf>. [Kasutatud 29 Aprill 2025].
- [8] STMicroelectronics, „Datasheet - STM32F765xx STM32F767xx STM32F768Ax STM32F769xx,“ August 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f767vi.pdf>. [Kasutatud 29 Aprill 2025].
- [9] O. Järg, „Oleku hindamise arendus tudengivormeli FEST23 momendijaotus,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2024.
- [10] STMicroelectronics, „Integrated development environment for STM32 products,“ 26 November 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.st.com/resource/en/data_brief/stm32cubeide.pdf. [Kasutatud 01 Mai 2025].
- [11] „STM32CubeIDE errata,“ STMicroelectronics, 25 Veebruar 2025. [Võrgumaterjal]. Available: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Category:STM32CubeIDE_errata. [Kasutatud 30 Aprill 2025].
- [12] „Temperature sensor PT1000 NTC,“ TMC, 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://tmc.eu/images/Data_sheet_S_series.pdf. [Kasutatud 16 Aprill 2025].
- [13] Micropump Inc., „MicroPump EagleDrive™ installation, operation and warranty information,“ Vancouver, 2023.
- [14] „San Ace 172 9HV type High Static Pressure Fan,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://docs.rs-online.com/3f48/0900766b814d9e57.pdf>. [Kasutatud 15 Märts 2025].
- [15] „SAC-8P-M12MR/ 5,0-PUR SH - Sensor/actuator cable,“ 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/en-us/products/sensoractuator-cable-sac-8p-m12mr-50-pur-sh-1522833?type=pdf>. [Kasutatud 30 04 2025].

- [16] J. Janesch, „Two-Wire vs. Four-Wire,“ Mai 2013. [Võrgumaterjal]. Available: https://download.tek.com/document/2Wire_4Wire%20Resistance%20Article.pdf. [Kasutatud 16 Aprill 2025].
- [17] Texas Instruments, „ADS130B04-Q1 Automotive, 4-Channel, 32-kSPS, Simultaneous-Sampling, 16-Bit, Delta-Sigma ADC,“ November 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads130b04-q1.pdf>. [Kasutatud 10 Mai 2025].
- [18] „Filter Basics: Anti-Aliasing,“ 11 Jaanuar 2002. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/guide-to-antialiasing-filter-basics--maxim-integrated.pdf>. [Kasutatud 03 Mai 2025].
- [19] K. Armstrong, „EMC techniques in electronic design Part 5 - Printed Circuit Board (PCB) Design and Layout,“ Mai 2009. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.emcstandards.co.uk/files/part_5_text_and_graphics_21_may_09.pdf. [Kasutatud 30 Aprill 2025].
- [20] R. Klinger ja S. Clark, „iCoupler® Isolation in CAN Bus Applications,“ [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 15 Aprill 2025].
- [21] Analog Devices, Inc., „Signal and Power Isolated CAN Transceiver with Integrated Isolated DC-to-DC Converter,“ Detsember 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adm3053.pdf>. [Kasutatud 30 Aprill 2025].
- [22] K. M. Meras, „Tudengivormeli FEST21 elektrisüsteemi elektromagnetilise ühilduvuse uurimine,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2022.
- [23] M. Cantrell, „Recommendations for Control of Radiated Emissions with isoPower Devices,“ Jaanuar 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/app-notes/an-0971.pdf>. [Kasutatud 13 Aprill 2025].
- [24] M. I. Montrose, Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance: A Handbook for Designers, Second Edition, Wiley-IEEE Press, 2000.
- [25] O.-K. Skroppa ja S. Monroe, „Common Mode Chokes in CAN Networks: Source of Unexpected Transients,“ Jaanuar 2008. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slla271/slla271.pdf?ts=1746368365005>. [Kasutatud 01 Mai 2025].
- [26] Texas Instruments, „ISO776x-Q1 High-speed, Robust EMC, Reinforced Six-channel Digital Isolators,“ Juuli 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ti.com/lit/gpn/ISO7762-Q1>. [Kasutatud 10 Mai 2025].
- [27] J. Hua, „Output Noise Filtering for DC/DC Power Modules,“ Aprill 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ti.com/lit/an/snva871/snva871.pdf?ts=1746189715041&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Kasutatud 14 Märts 2025].
- [28] Microchip, „MCP1826/MCP1826S,“ Mai 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://eu.mouser.com/datasheet/2/268/MCP1826_MCP1826S_1000_mA_2c_Low_Voltage_2c_Low_Qui-3441662.pdf. [Kasutatud 16 03 2025].
- [29] K. Armstrong, „EMC techniques in electronic design Part 2 - Cables and Connectors,“ Mai 2009. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.emcstandards.co.uk/files/part_2_text_and_graphics_21_may_09.pdf. [Kasutatud 30 Aprill 2025].

- [30] R. Sarapuu, „Elektrilise tudengivormeli elektroonilise juhtüksuse täiustamine,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2021.
- [31] A. Kempinski, R. Smolenski ja R. Strzeleck, „Common Mode Current Paths and Their Modeling in PWM Inverter-Fed Drives,“ University of Zielona Gora, Zielona Gora, 2002.
- [32] M. Amara, C. Vollaie, M. Ali ja F. Costa, „Black box EMC modeling of a three phase inverter,“ Amsterdam, 2018.
- [33] A. Kay ja T. Green, „Analog Engineer's Pocket Reference Guide,“ Texas Instruments Incorporated, 2025.
- [34] R. Seppago, D. Tiitma ja S. Õispuu, „Environmental testchamber development for Formula Student Team Tallinn,“ Tallinn, 2024.

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

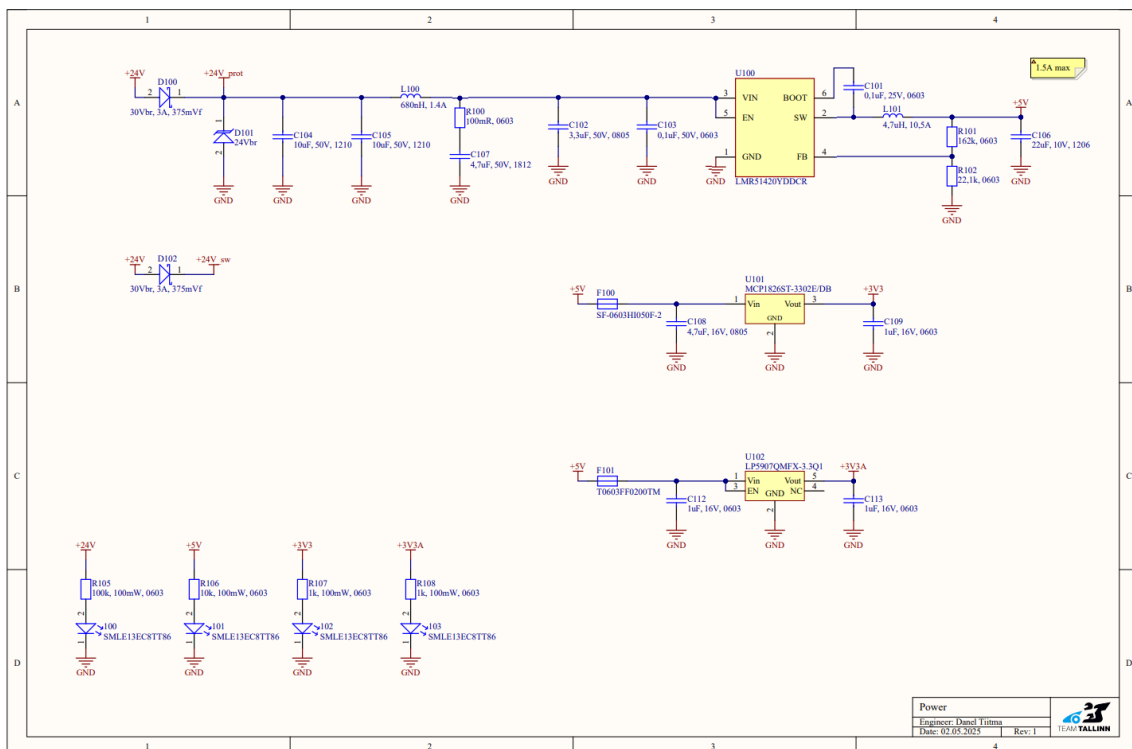
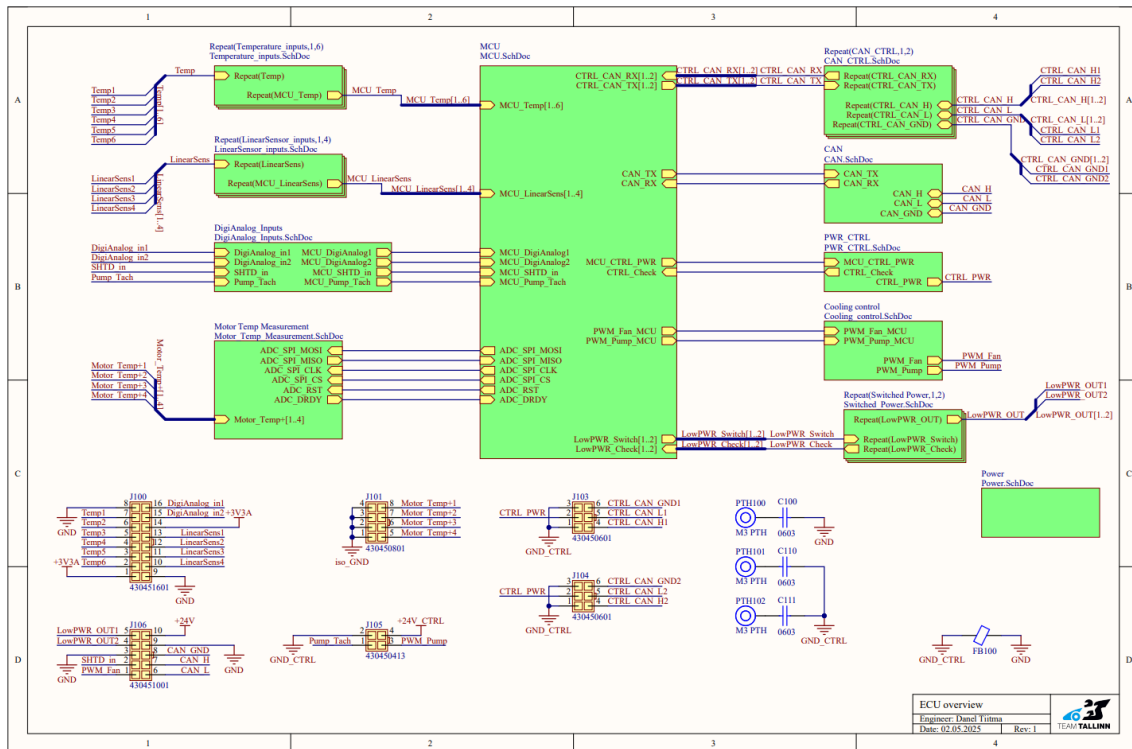
Mina, Danel Tiitma

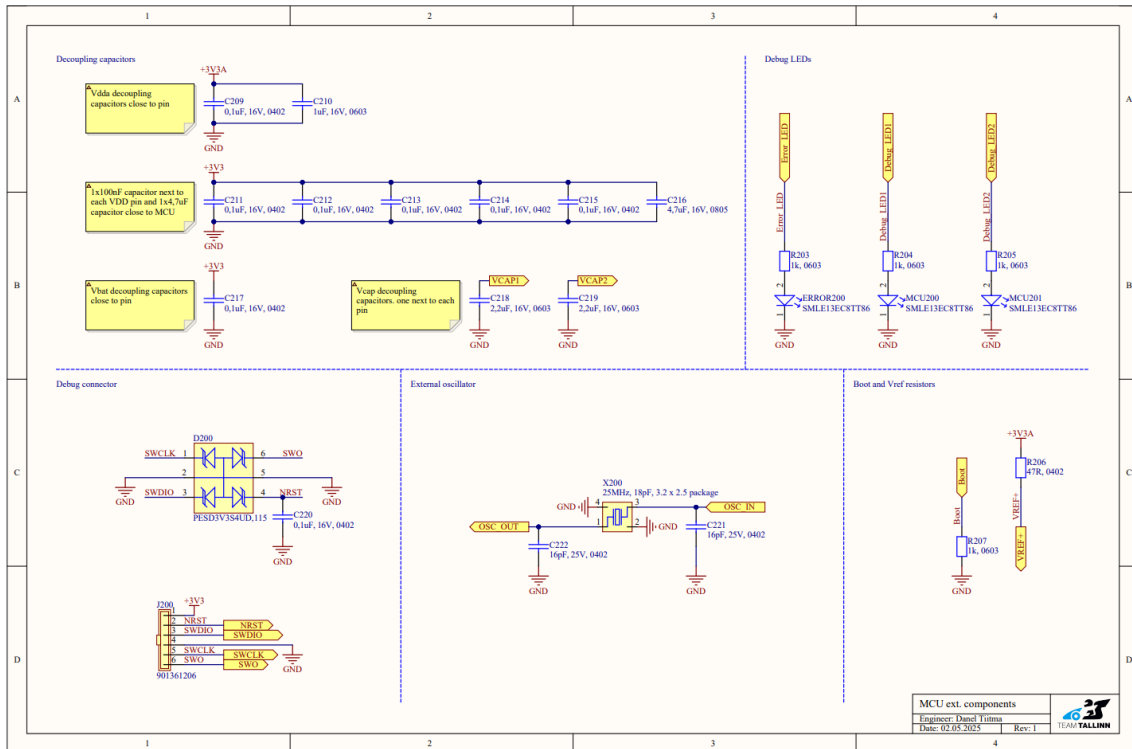
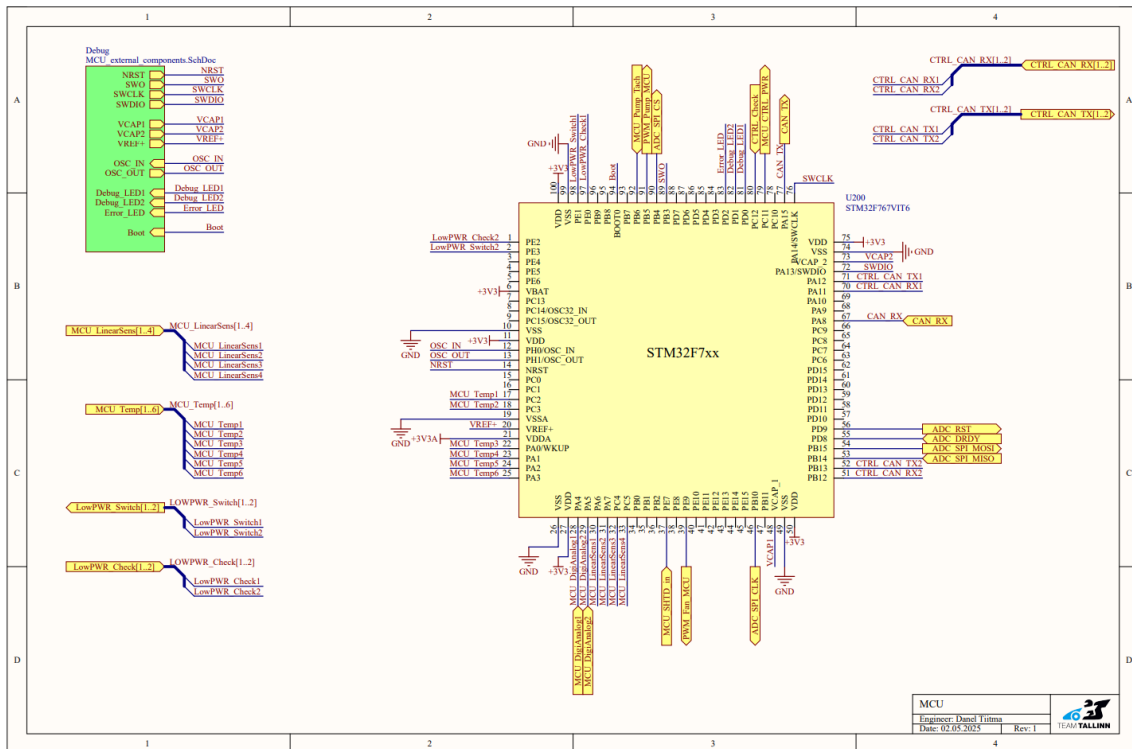
1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Elektroonika kontrollüksuse arendus tudenivormelile FEST24“, mille juhendaja on Peeter Ellervee
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

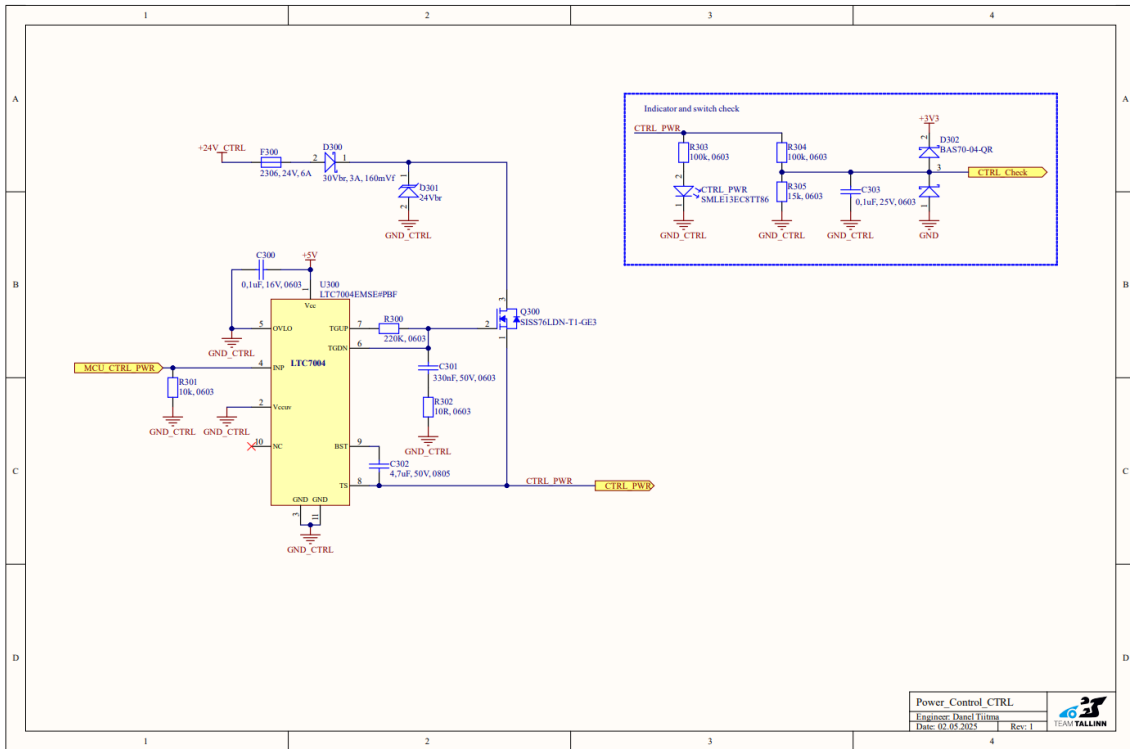
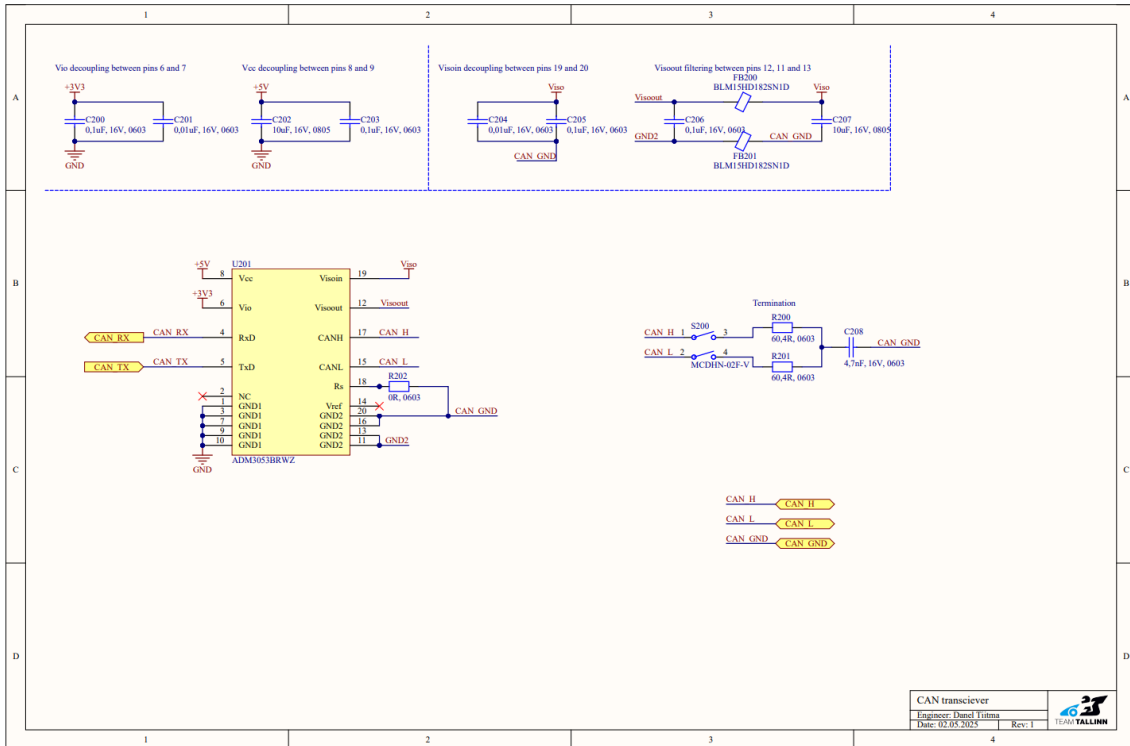
12.05.2025

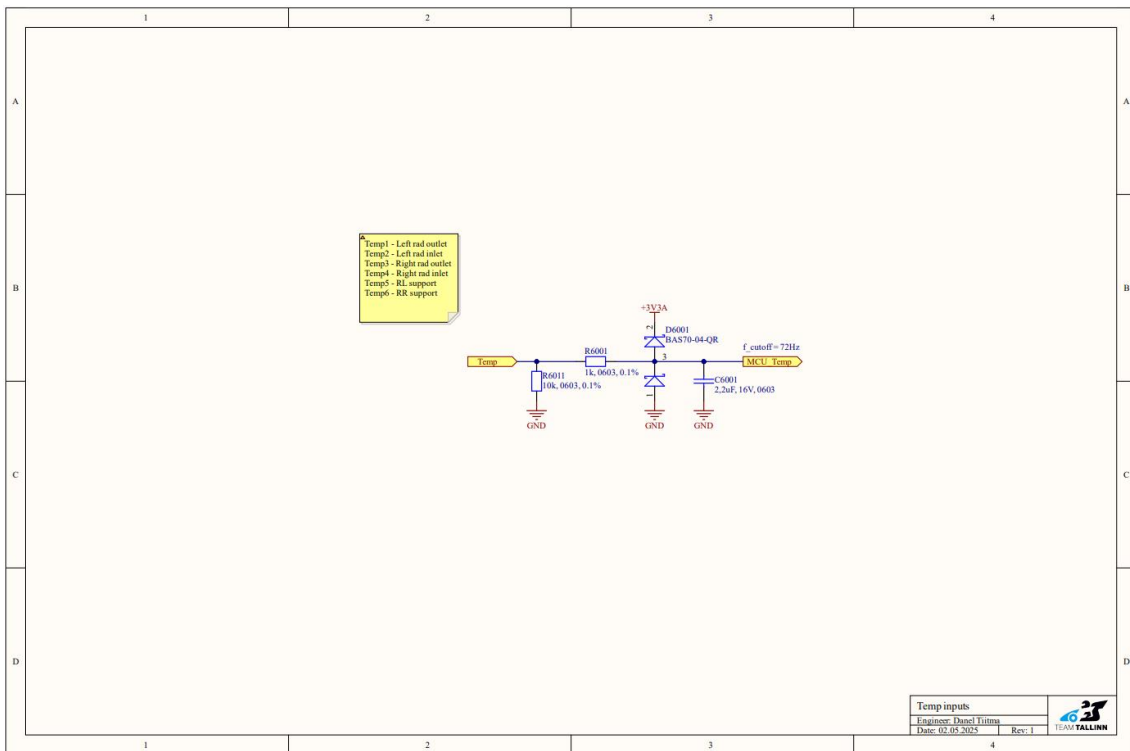
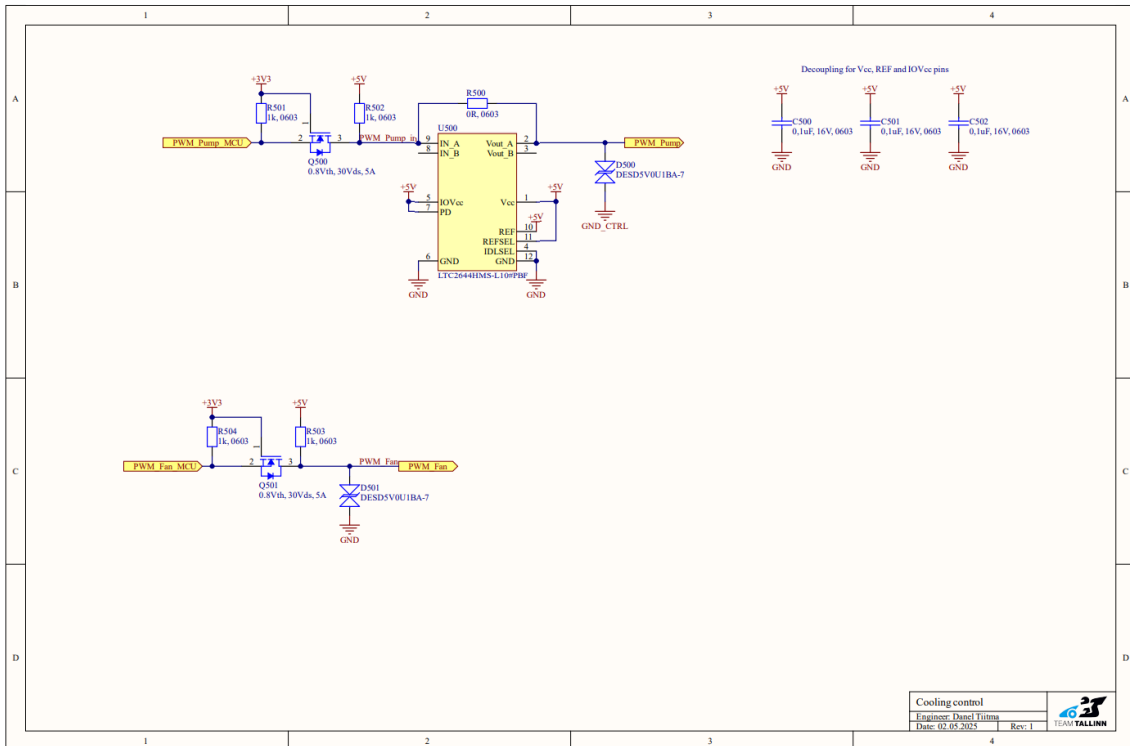
¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

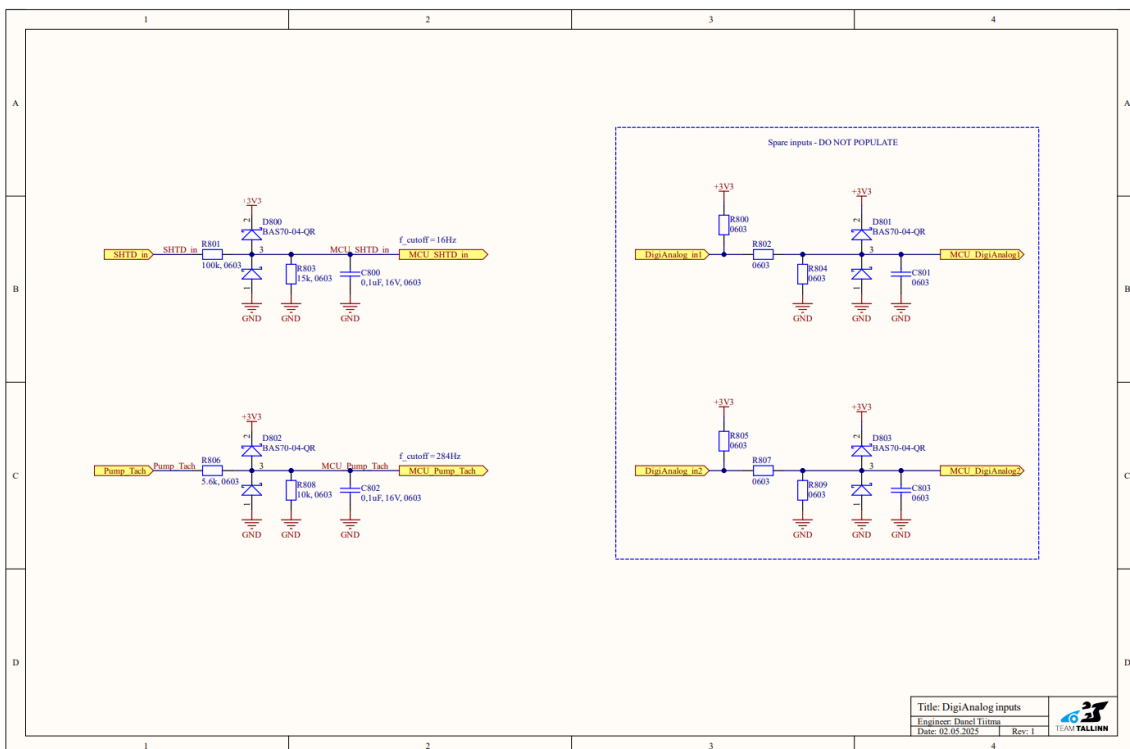
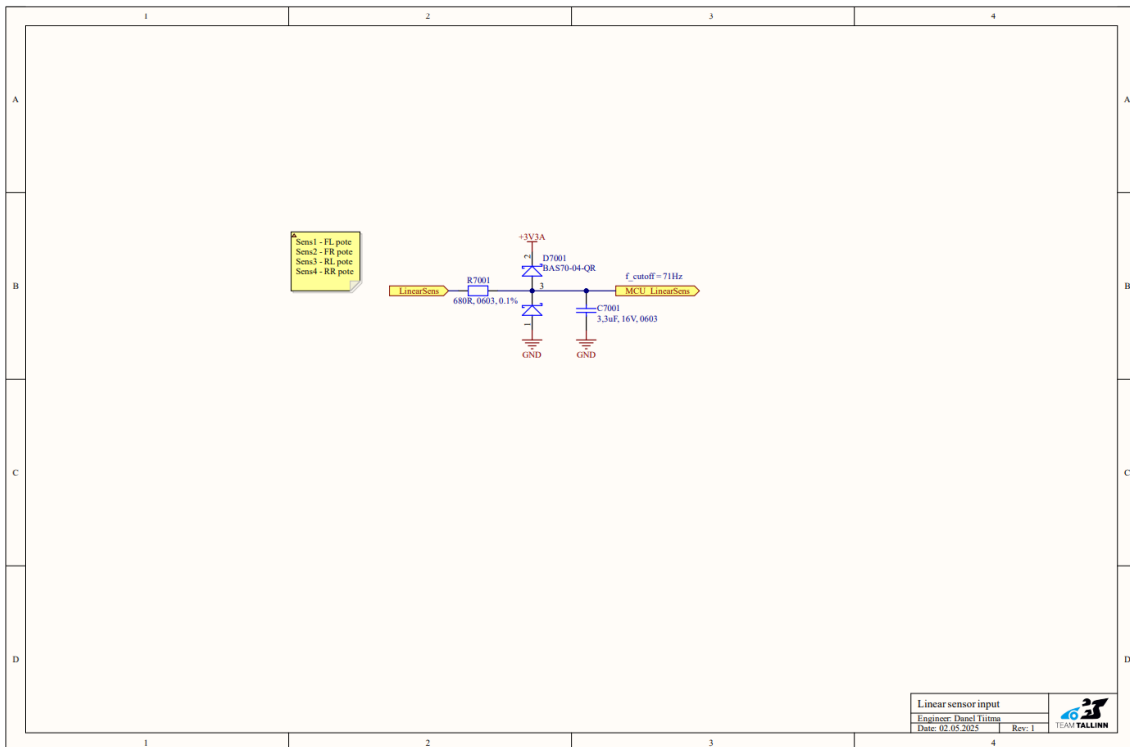
Lisa 2 – Elektroonika kontrollüksuse elektriskeem

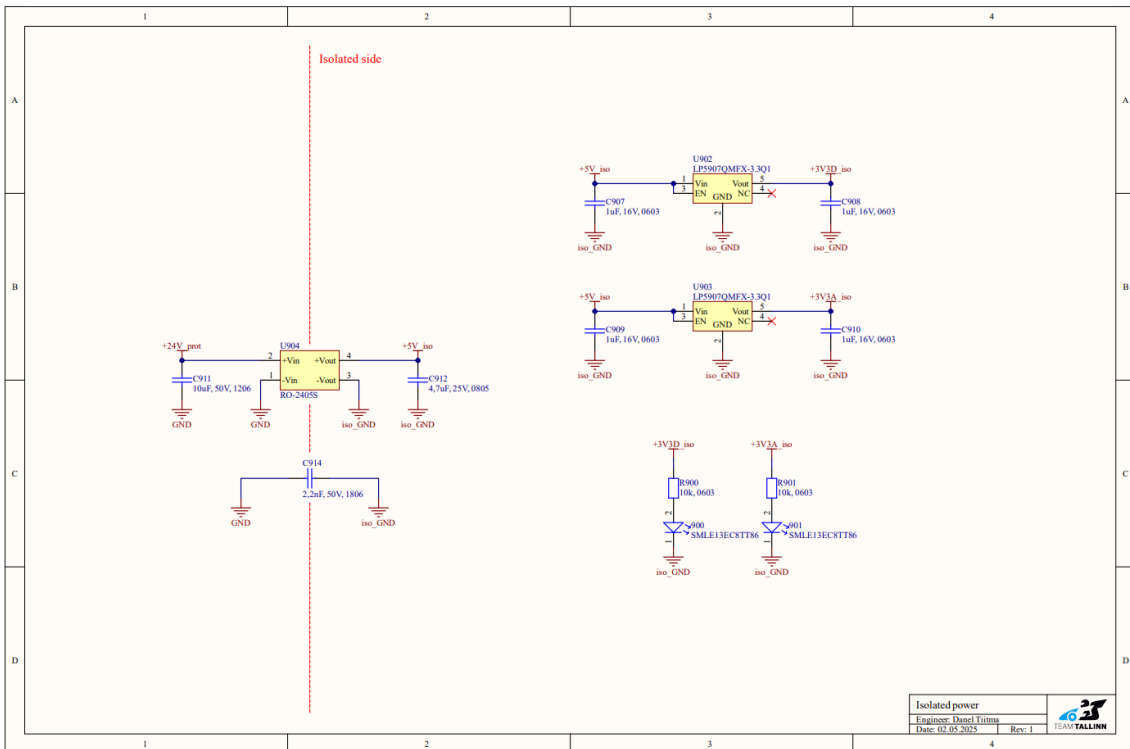
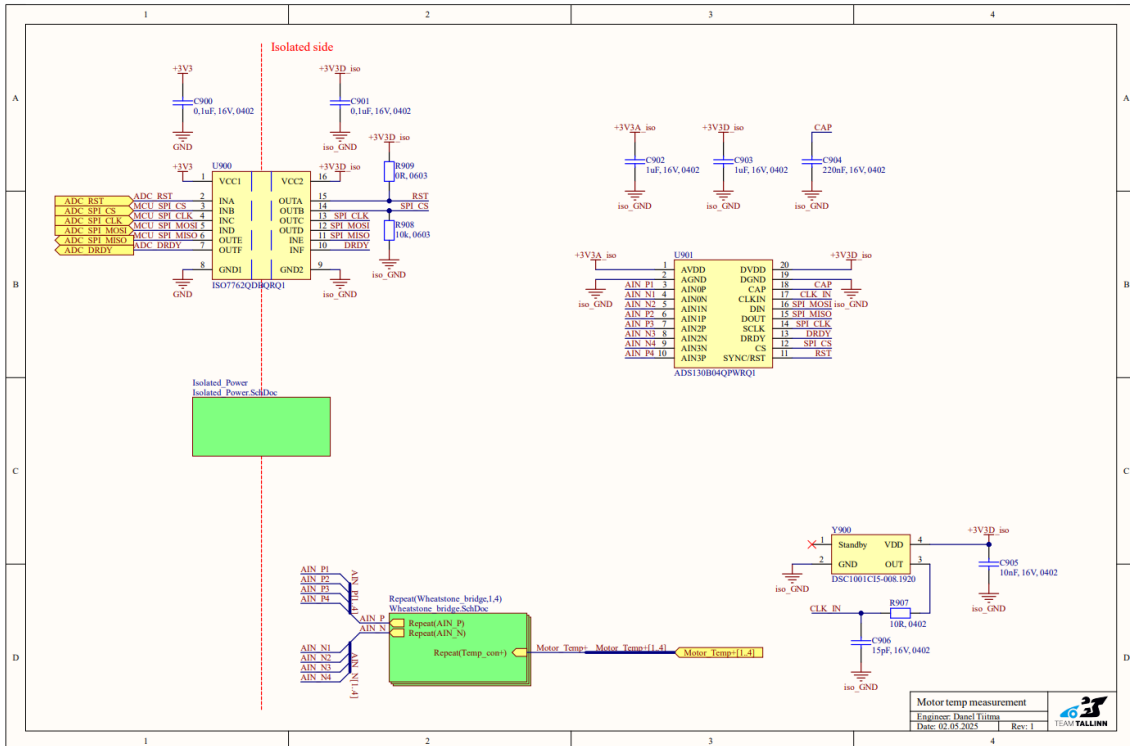


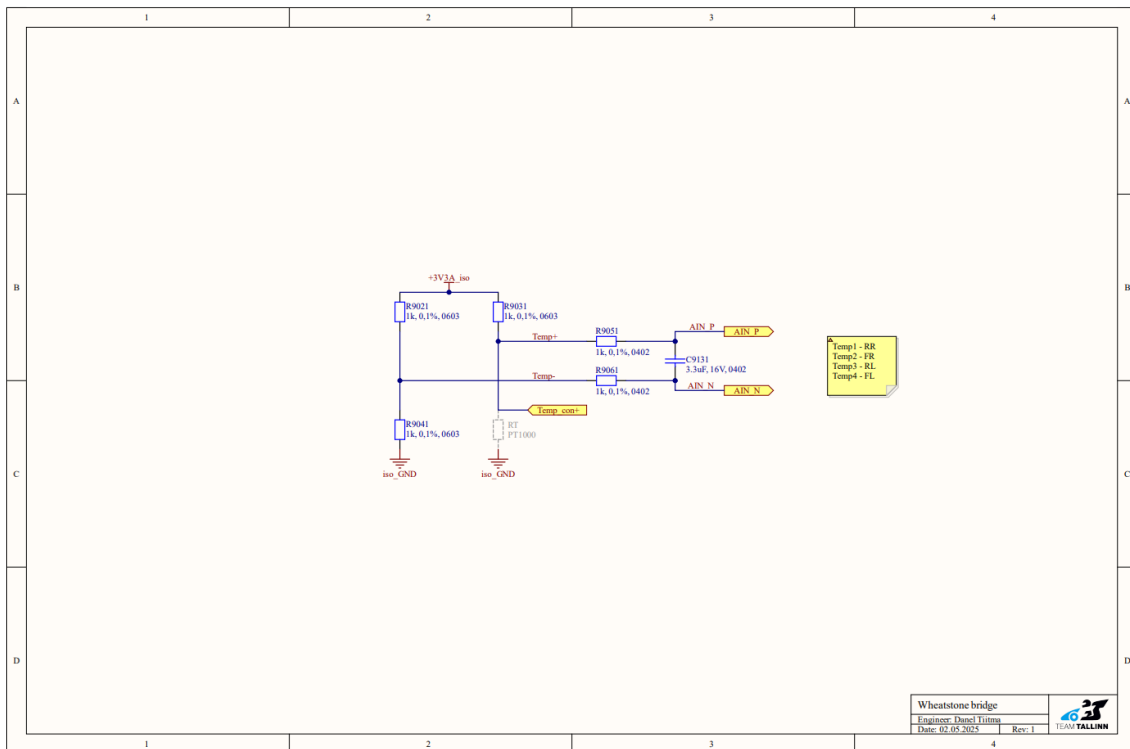




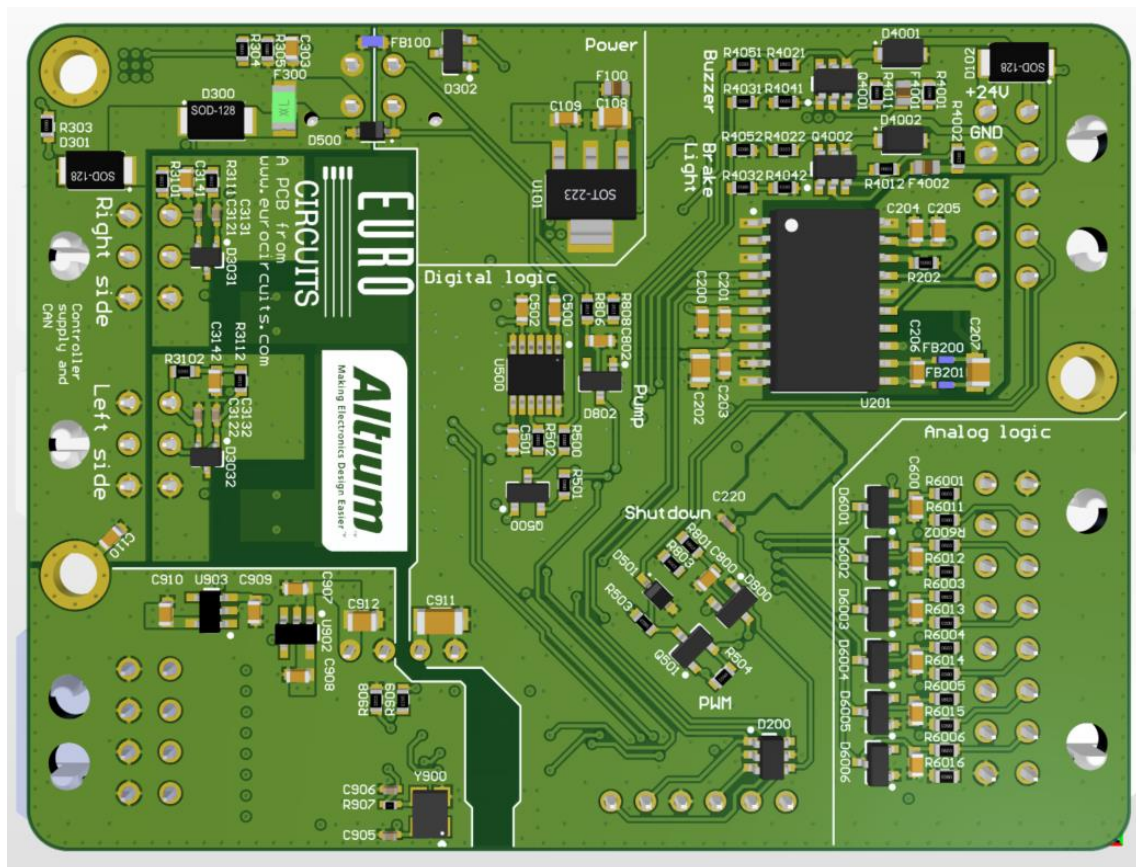
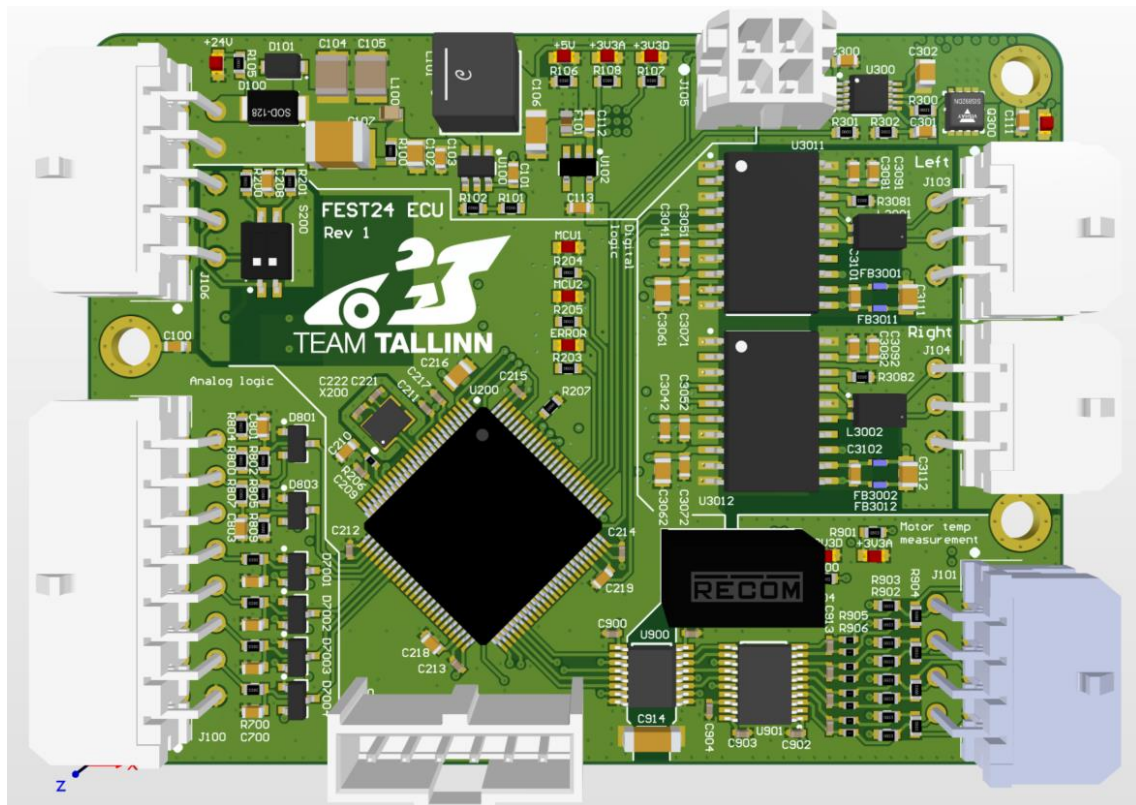




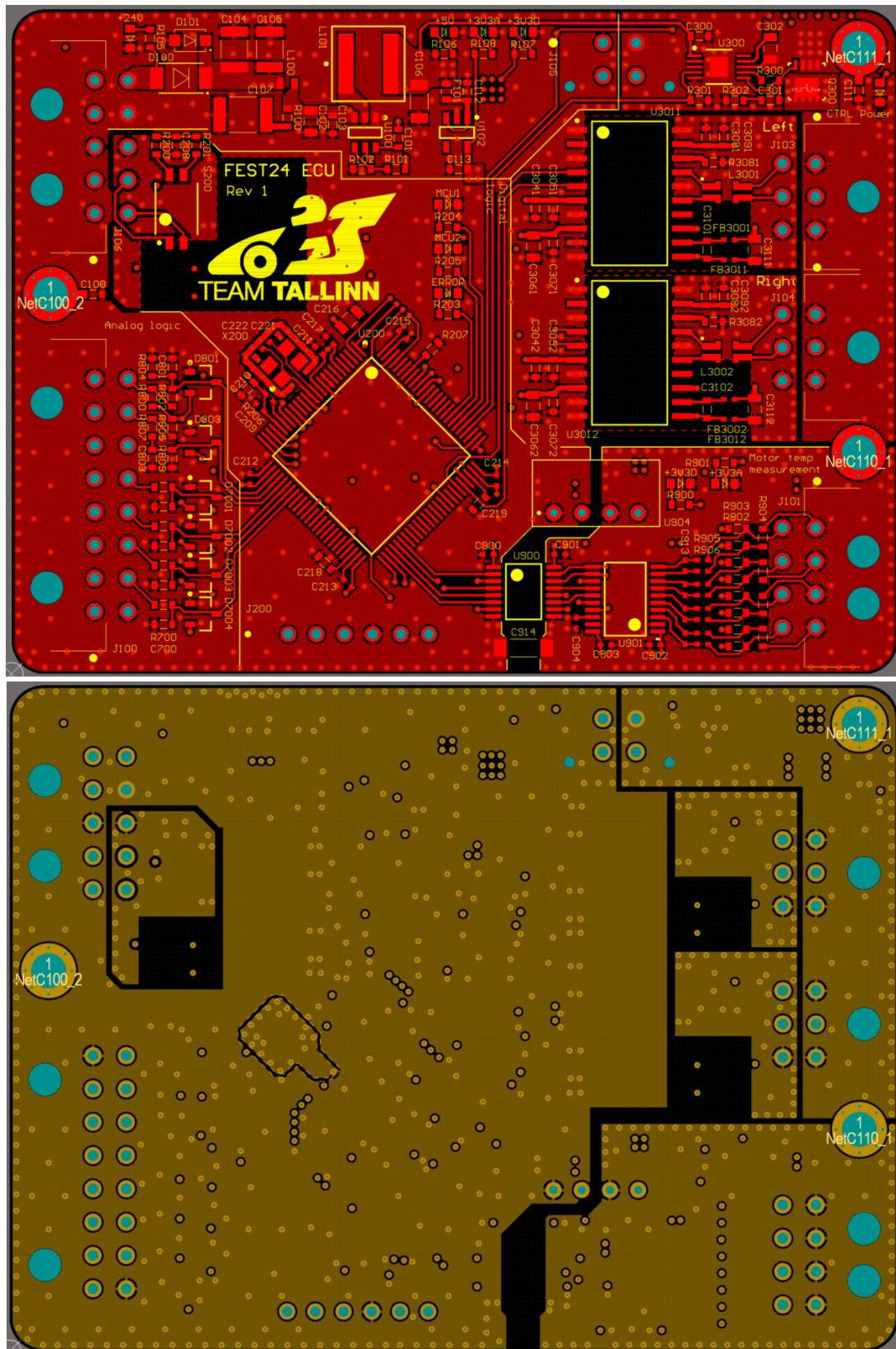




Lisa 3 – Elektroonika kontrollüksuse trükkplaadi 3D vaade



Lisa 4 – Elektroonika kontrollüksuse trükkplaadi kihid.





Lisa 5 – CAN sõnumite FIFO puhvri implementatsioon koodis

```
#define FIFO_LENGTH 64
#define FIFO_BUFFER_MASK 0x1F

typedef struct{
    volatile uint8_t fifo_length;
    volatile uint8_t fifo_head;
    volatile uint8_t fifo_tail;
    CANMsg buffer[64];
}CANFIFO;

CANFIFO mainTxFIFO;

void can_main_tx_enqueue(CANMsg *msg){
    if(mainTxFIFO.fifo_length < FIFO_LENGTH-1){
        HAL_CAN_DISABLE_IT(hcan_ctrl_left, CAN_IT_RX_FIFO0_MSG_PENDING |
                            CAN_IT_RX_FIFO1_MSG_PENDING);
        mainTxFIFO.fifo_tail = (mainTxFIFO.fifo_tail+1)&FIFO_BUFFER_MASK;
        mainTxFIFO.buffer[mainTxFIFO.fifo_tail] = *msg;
        mainTxFIFO.fifo_length = mainTxFIFO.fifo_length+1;
        HAL_CAN_ENABLE_IT(hcan_ctrl_left, CAN_IT_RX_FIFO0_MSG_PENDING |
                           CAN_IT_RX_FIFO1_MSG_PENDING);

        if(mainTxFIFO.fifo_length > can_tx_fifo_max_lenght[2]){
            can_tx_fifo_max_lenght[2] = mainTxFIFO.fifo_length;
        }
    }
    else{
        can_tx_errors++;
    }
}

CANMsg* can_main_tx_dequeue(void){
    CANMsg* msg = &(mainTxFIFO.buffer[mainTxFIFO.fifo_head]);
    mainTxFIFO.fifo_head = (mainTxFIFO.fifo_head+1) & FIFO_BUFFER_MASK;
    mainTxFIFO.fifo_length--;
    return msg;
}
```