

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Oliver Paljak 232070IACM

Optimeeritud joonejärgimisroboti prototüübi arendamine

Magistritöö

Juhendaja: Priit Ruberg
PhD

Tallinn 2026

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: Oliver Paljak

03.01.2026

Annotatsioon

Käesolev magistritöö annab ülevaate optimeeritud joonejärgimise roboti arendamisest 2025. aasta robotikavõistluse Robotexi reeglite järgi. Töös selgitatakse välja disaininõuded, mida on vaja optimeeritud ehk konkurentsivõimelise joonejärgimise roboti projekteerimiseks. Disaininõuete välja selgitamisel lähtuti Robotexi reeglitest ja ka varasemate aastate Jaapani joonejärgimise Robotrace võistluste tulemuste analüüsist. Töös tutvustatakse optimeeritud joonejärgimisroboti arendusprotsessi ja disainiotsuseid. Põhjalikult on käsitletud elektromehaanika ja elektroonika disain: tuuakse välja erinevate komponentide valikukriteeriumid ning tehakse komponentide vahel võrdlusi. Vajadusel testitakse ka komponente töö seisukohalt tähtsate parameetrite osas, et valitud komponendid vastaks disaininõuetele. Töö käigus valmis joonejärgimise roboti prototüüp, mis vastas seatud eesmärkidele ja disaininõuetele.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 52 leheküljel, 7 peatükki, 74 joonist, 40 tabelit.

Abstract

Development of an Optimized Line-Following Robot Prototype

The primary goal of this thesis is to develop an optimized line-following robot based on the Robotex competition rules for line-following. Line-following is a popular category in competitive robotics and this thesis tries to show what is required to build a high performance line-following robot from scratch.

An analysis was conducted on the Robotex line-following rules as well as on the results of the Japan Robotrace competition to determine the design requirements. From this analysis the key mechanical design requirements were identified. The robot's mass must not exceed 1 kg, its maximum dimensions are 250x250x250 mm and its top speed should be 9 m/s. From electronics side, the most important requirement was the robot's ability to follow a line. That meant having a line sensor and additional sensors that could be used in Robotex competitions. It was also determined that the robot should have all the necessary electronic components to enable racing line optimization. The primary software requirement was full autonomy – the robot had to follow the line without external assistance. Implementing racing line optimization in software would have been a desirable additional feature.

After determining the design requirements, the development process began. First, all the mechanical and electromechanical components were chosen. Next, the electronic components were selected followed by the design of multiple PCBs for the robot. Although software was not developed, several ideas for the robot's software architecture were proposed: PID for the motor level control and the steps required to implement racing line optimization. The result of this thesis is a line-following robot prototype that is mechanically and electronically optimized for the 2025 Robotex competition.

The thesis is in Estonian and contains 52 pages of text, 7 chapters, 74 figures, 40 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

CPU	<i>Central Processing Unit</i> ; Keskprotsessor
ROM	<i>Read-Only Memory</i> ; Püsimälu
RAM	<i>Random Access Memory</i> ; Suvapöördusmälu
LiPo	<i>Lithium Polymer (battery)</i> ; Liitiumpolümeeraku
IR	<i>Infrared (light)</i> ; Infrapunakiirgus
LED	<i>Light Emitting Diode</i> ; Valgusdiod
DC	<i>Direct Current</i> ; Alalisvool
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> ; Analoog-digitaalmuundur
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> ; Inertsiaalandur
MCU	<i>Microcontroller Unit</i> ; Mikrokontroller
RPM	<i>Revolution per Minute</i> ; Pöörded minutis
BLDC	<i>Brushless DC (Motor)</i> ; Harjadeta DC mootor
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i> ; Sädemetöötlusmasin
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> ; Raalprojekteerimine
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i> ; Elektrooniline kiiruse draiver
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> ; Impulsslaiusmodulatsioon
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> ; Trükkplaat
ENOB	<i>Effective Number of Bits</i> ; Efektiivne bittide arv
CPR	<i>Counts per Revolution</i> ; Sammud pöörde kohta
PPR	<i>Pulses per Revolution</i> ; Pulsid pöörde kohta
FFC	<i>Flexible Flat Cable</i> ; Ribakaabel
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor</i> ; Isoleeritud paisuga väljatransistor
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
LDO	<i>Low Dropout (Regulator)</i> ; Vähese pingelanguga lineaarpingeregulaator
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> ; Universaalne digitaalne sisend/väljundsignaal

Sisukord

1 Sissejuhatus.....	13
2 Joonejärgimise tutvustus ja disaini nõuded.....	14
2.1 Disaini nõuded tulenevalt Robotexi reeglitest.....	14
2.2 Disaini sisendid Jaapani Robotrace võistluste analüüsist.....	16
2.2.1 Robotite keskmise kiiruse analüüs.....	17
2.2.2 Poodiumikoha saanud robotite tehniline analüüs.....	17
2.3 Lõplikud disaini nõuded.....	19
2.4 Peatüki kokkuvõte.....	21
3 Roboti mehaanika ja elektromehaanika.....	22
3.1 Veomootorite valik.....	22
3.2 Veomootorite ülekanded.....	29
3.2.1 Lõputöö autori poolt loodud ülekande lahendus.....	30
3.3 Turbiini valik.....	31
3.3.1 Turbiinide efektiivsuse test.....	32
3.4 Roboti kere ja muu mehaaniline disain.....	34
3.5 Peatüki kokkuvõte.....	36
4 Roboti elektroonika.....	37
4.1 Enkoodri trükkplaat.....	37
4.2 Joonesensor.....	40
4.3 Põhiplaat.....	42
4.3.1 Veomootorite draiver.....	42
4.3.2 Inertsiaalandur.....	43
4.3.3 Püsimalu.....	44
4.3.4 Raadiomoodul.....	45
4.3.5 Lisa mikrokontroller.....	46
4.3.6 Puldi vastuvõtja ja ekraan.....	47
4.3.7 Toide: pingeregulaatorid ja aku.....	48
4.3.8 Toide: lülitusahel ja polaarsuskaitse.....	51

4.3.9 Põhimikrokontroller.....	56
4.3.10 Trükkplaat.....	59
4.4 Peatüki kokkuvõte.....	60
5 Roboti tarkvara kavand.....	61
6 Testid ja tulemused.....	63
7 Kokkuvõte.....	65
Kasutatud kirjandus.....	66
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	76
Lisa 2 – Jaapani joonejärgimise võistluse Robotrace keskmise kiiruse analüüsi lähteandmed.....	77
Lisa 3 – Jaapani joonejärgimise võistluse Robotrace poodiumikoha robotite tehnilised andmed.....	80
Lisa 4 – Veomootorite testide mõõtetulemused.....	91
Lisa 5 – Vadim Kokurini poolt tehtud ülekanne.....	94
Lisa 6 – Turbiinide efektiivsustesti mõõtetulemused.....	96
Lisa 7 – Enkoodri trükkplaat ja elektriskeem.....	101
Lisa 8 – Joonesensori trükkplaat ja elektriskeem.....	105
Lisa 9 – Põhiplaadi trükkplaat ja elektriskeem.....	111
Lisa 10 – Pildid kokkupandud robotist.....	123

Jooniste loetelu

Joonis 1: Kuvatõmmis Robotexi raja ja roboti mõõtmetest. [6].....	16
Joonis 2: Robotrace 2023. aasta finaali raja kuju. [33].....	19
Joonis 3: Roboti üldplokkskeem ja olulisemad disaini nõuded.....	21
Joonis 4: Ühiku g·cm illustratsioon. [36].....	24
Joonis 5: Illustratsioon mootori pöördemomendi testpingist (lati pikkus r algab mootori völli keskelt).....	27
Joonis 6: (a) Pilt testpingist (mootor on NSR-3027); (b) Sama pilt koos terminifoga...28	
Joonis 7: Mootorite pöördemoment sõltuvus toitepingest (NSR3027 põles 12 V juures läbi).....	28
Joonis 8: Mootorite maksimaalne voolutarve sõltuvus toitepingest (NSR3027 põles 12 V juures läbi).....	29
Joonis 9: Erinevad ülekande tüübid juhtrajamudelautodes. [41].....	30
Joonis 10: Autori ülekande kavand pealtvaates.....	31
Joonis 11: Turbiini testpink ja selle illustratsioon (läbipaistev plastikkast lisati turvalisuse huvides).....	33
Joonis 12: Turbiinide efektiivsustest (tõmbemass vs voolutarve).....	34
Joonis 13: Roboti joonesensori joonis (ühikud on mm).....	35
Joonis 14: Roboti põhi trükkplaadi joonis (ühikud on mm).....	35
Joonis 15: Roboti mehaaniline koost CAD-is.....	36
Joonis 16: Enkoodri AB väljund. [77].....	39
Joonis 17: Enkoodri trükkplaadi: (a) 2D altvaade ja (b) 3D altvaade.....	40
Joonis 18: Joonesensori trükkplaat (üleval 2D ülaltvaade; keskel 2D altvaade; all 3D altvaade trükkplaadile).....	41
Joonis 19: Roboti elektroonika plokkskeemi seis pärast lisaplaatide projekteerimist ja elektromehaaniliste komponentide väljavalimist.....	42
Joonis 20: Võrdlus erinevate polaarsuskaitse skeemide vahel. [111].....	53
Joonis 21: Näide ideaalse diodi lahendusest koos toiteliini lülitusega. [115].....	55
Joonis 22: Roboti toiteahela plokkskeem.....	55

Joonis 23: Elektroonika plokk skeem põhimikrokontrolleri valimise hetkel.....	56
Joonis 24: Roboti elektroonika lõplik plokk skeem.....	59
Joonis 25: Põhitrukkplaadi 3D ülaltvaade sektsioonidega.....	60
Joonis 26: Töö käigus disainitud robot Joonus.....	63
Joonis 27: Robot LN3.9D [19].....	82
Joonis 28: Robot Cartis 04.9D4 [20].....	83
Joonis 29: Robot RS-116 [22].....	84
Joonis 30: Robot Lsens 2.6D [23].....	85
Joonis 31: Robot Aegis2023 [24].....	86
Joonis 32: Robot UnderBird_2.0 [26].....	87
Joonis 33: Robot Aegis2024 [9].....	88
Joonis 34: Robot hayabusa2.2 [31].....	89
Joonis 35: Robot Solomon 2nd [32].....	90
Joonis 36: Mootorite vaba jooksu voolutarve sõltuvus toitepingest (NSR3027 ei ole läbi põlemise tõttu graafikul kujutatud).....	91
Joonis 37: Kuvatõmmised Vadim Kokurini poolt tehtud ülekande 3D mudelist.....	94
Joonis 38: Vadim Kokurini ülekande hammasrattad.....	94
Joonis 39: Vadim Kokurini ülekanne koos enkoodri trükkplaadiga.....	95
Joonis 40: 3D vaade enkoodritrükkplaadile.....	95
Joonis 41: Enkoodri trükkplaadi mehaaniline joonis (ühikud mm; tehtud Vadim Kokurini etteantud mehaanilise info põhjal).....	101
Joonis 42: Enkoodri trükkplaadi peamine kiht.....	102
Joonis 43: Enkoodri trükkplaadi alumine kiht.....	102
Joonis 44: Enkoodri trükkplaat 2D altvaates.....	102
Joonis 45: Enkoodri trükkplaat 2D pealtvaates.....	102
Joonis 46: Enkoodri trükkplaat 3D pealtvaates.....	103
Joonis 47: Enkoodri trükkplaat 3D altvaates.....	103
Joonis 48: Enkoodri elektriskeem.....	104
Joonis 49: Joonesensori trükkplaadi mehaaniline joonis (ühikud mm).....	105
Joonis 50: Joonesensori trükkplaadi peamine kiht.....	106
Joonis 51: Joonesensori trükkplaadi esimene sisemine kiht.....	106
Joonis 52: Joonesensori trükkplaadi teine sisemine kiht.....	106
Joonis 53: Joonesensori trükkplaadi alumine kiht.....	107

Joonis 54: Joonesensori trükkplaat 2D pealtvaates.....	107
Joonis 55: Joonesensori trükkplaat 2D altvaates.....	107
Joonis 56: Joonesensori trükkplaat 3D pealtvaates.....	108
Joonis 57: Joonesensori trükkplaat 3D altvaates.....	108
Joonis 58: Joonesensori elektriskeem lk 1.....	109
Joonis 59: Joonesensori elektriskeem lk 2.....	110
Joonis 60: Põhitrükkplaadi mehaaniline joonis (ühikud mm).....	111
Joonis 61: Põhitrükkplaadi peamine kiht.....	112
Joonis 62: Põhitrükkplaadi esimene sisemine kiht.....	113
Joonis 63: Põhitrükkplaadi teine sisemine kiht.....	114
Joonis 64: Põhitrükkplaadi alumine kiht.....	115
Joonis 65: Põhitrükkplaadi 2D ülaltvaade.....	116
Joonis 66: Põhitrükkplaadi 2D altvaade.....	117
Joonis 67: Põhitrükkplaadi 3D pealtvaade koos joonesensoriga.....	118
Joonis 68: Põhitrükkplaadi 3D altvaade koos joonesensoriga.....	119
Joonis 69: Põhiplaadi elektriskeem lk 1.....	120
Joonis 70: Põhiplaadi elektriskeem lk 2.....	121
Joonis 71: Põhiplaadi elektriskeem lk 3.....	122
Joonis 72: Robot Joonus (pilt 1).....	123
Joonis 73: Robot Joonus (pilt 2).....	124
Joonis 74: Robot Joonus (pilt 3).....	124

Tabelite loetelu

Tabel 1: Keskmise kiiruse analüüsi tulemused.....	17
Tabel 2: Robotrace võistlusel poodiumikoha saavutanud robotite olulisemad tehnilised parameetrid.....	18
Tabel 3: Mootori pöörlemiskiirus sõltuvalt ratta diameetrist.....	23
Tabel 4: Mootori pöörlemiskiirus ja pöördemoment sõltuvalt ratta diameetrist.....	25
Tabel 5: Potentsiaalsed mootorid robotile.....	26
Tabel 6: Potentsiaalsed turbiinid robotile.....	32
Tabel 7: Potentsiaalsed enkoodrid robotile.....	38
Tabel 8: Potentsiaalsete mootori draiverite võrdlus.....	43
Tabel 9: Erinevate Espressif Systemsi mikrokontrollerite võrdlustabel.....	47
Tabel 10: Süsteemi voolutarve ja koguvõimsus erinevate pingete juures.....	48
Tabel 11: Erinevate STM32 mikrokontrollerite ja ADC kiipide ADC muundamisajad.....	58
Tabel 12: 2017. aasta Robotrace võistluse [12] keskmised kiirused.....	77
Tabel 13: 2021. aasta Robotrace võistluse [13] keskmised kiirused.....	78
Tabel 14: 2022. aasta Robotrace võistluse [14] keskmised kiirused.....	78
Tabel 15: 2023. aasta Robotrace võistluse [15] keskmised kiirused.....	79
Tabel 16: RS-100 tehnilised andmed (Robotrace 2017 I koht) [12].....	80
Tabel 17: Cartis04.5 tehnilised andmed (Robotrace 2017 II koht) [12].....	81
Tabel 18: Ning3 tehnilised andmed (Robotrace 2017 III koht) [12].....	81
Tabel 19: LN3.9D tehnilised andmed (Robotrace 2021 I koht) [19].....	82
Tabel 20: Cartis 04.9D4 tehnilised andmed (Robotrace 2021 II koht) [20].....	83
Tabel 21: RS-116 tehnilised andmed (Robotrace 2021 III koht) [22].....	84
Tabel 22: Lsens 2.6D tehnilised andmed (Robotrace 2022 I koht) [23].....	85
Tabel 23: Aegis2023 tehnilised andmed (Robotrace 2022 II koht) [24].....	86
Tabel 24: UnderBird_2.0 tehnilised andmed (Robotrace 2022 III koht) [26].....	87
Tabel 25: Aegis2024 tehnilised andmed (Robotrace 2023 I koht) [9].....	88
Tabel 26: hayabusa2.2 tehnilised andmed (Robotrace 2023 II koht) [31].....	89
Tabel 27: Solomon 2nd tehnilised andmed (Robotrace 2023 III koht) [32].....	90
Tabel 28: Mootori SIMN08CH [37] mõõtetulemused.....	92

Tabel 29: Mootori SC-0012B [38] mõõtetulemused.....	92
Tabel 30: Mootori NSR3023 [39] mõõtetulemused.....	93
Tabel 31: Mootori NSR3027 [40] mõõtetulemused.....	93
Tabel 32: OFLY+AEO ESC (40%) mõõtetulemused.....	96
Tabel 33: OFLY+QX ESC (40%) mõõtetulemused.....	96
Tabel 34: OFLY+ZTW ESC (60%; turbiin põles läbi) mõõtetulemused.....	97
Tabel 35: AEORC+AEORC ESC (100%) mõõtetulemused.....	97
Tabel 36: QXMOTOR+QX ESC (100%) mõõtetulemused.....	98
Tabel 37: QXMOTOR+ZTW ESC (100%) mõõtetulemused.....	98
Tabel 38: QXMOTOR+AEO ESC (100%) mõõtetulemused.....	99
Tabel 39: AEORC+ZTW ESC (60%; turbiin kiilus kinni) mõõtetulemused.....	99
Tabel 40: AEORC+QX ESC (100%) mõõtetulemused.....	100

1 Sissejuhatus

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on arendada joonejärgimise robot, mis vastaks robotikavõistluse Robotexi joonejärgimise reeglitele. Lisaeesmärgiks seati, et robot võiks olla optimeeritud ehk võistlustel konkurentsivõimeline. Siinkohal tahab töö autor tänada Priit Rubergi töö juhendamise eest; Jaan Roopi, Kevin-Marc Aljast ja Martin Laanemetsa roboti elektroonika disaini kontrollimise eest; Vadim Kokurinit mehaanika alaste panuste eest ja mu isa Mihkel Paljakut erinevatel katsetel ja testidel assisteerimise eest. Kui töös peaks leiduma vigu, siis need on ainult ja täielikult omistatavad töö autorile.

Tulenevalt töös esitatud põhieesmärkidest – arendada konkurentsivõimeline Robotexi reeglitele vastav joonejärgimisrobot – seati magistritöös ülesanneteks järgnevad alameesmärgid:

- 1) selgitada välja, mis on roboti disaininõuded, et robot oleks Robotexi reeglitele vastav ja optimeeritud/konkurentsivõimeline;
- 2) projekteerida roboti mehaanika nii, et see oleks disaininõuetele vastav;
- 3) projekteerida roboti elektroonika nii, et see oleks disaininõuetele vastav;
- 4) kavandada roboti tarkvara vastavalt disaininõuetele.

Peatükis „2 Joonejärgimise tutvustus ja disaini nõuded” tutvustatakse joonejärgimist kui võistlusrobotika ala ja pannakse läbi erinevate analüüside paika roboti disaini nõuded, mis peaksid kindlustama roboti konkurentsivõimelisuse ja optimeerituse. Peatükis „3 Roboti mehaanika ja elektromehaanika” antakse ülevaade roboti mehaanikast ja elektromehaanika komponentide valikust koos tehtud katsetuste ja testidega. Peatükis „4 Roboti elektroonika” tutvustatakse roboti elektroonikadisaini ning elektroonika komponentide valikut. Peatükis „5 Roboti tarkvara kavand” antakse ülevaade potentsiaalsetest roboti juhtimistarkvara meetoditest ja sammudest, kuidas võiks rajaoptimeerimist robotil rakendada. Viimases peatükis „6 Testid ja tulemused” tuuakse välja töö tulemused ja vastavad testid, mis töö väljatoodud tulemusi kinnitavad.

2 Joonejärgimise tutvustus ja disaini nõuded

Joonejärgimine on üks populaarsemaid võistlusrobotika alasid [1]. Võistlusrobotika eesmärk on arendada roboteid võistlemiseks ehk roboti peamiseks eesmärgiks on valitud võistlusalal/-kategoorias – näiteks joonejärgimisel – olla parem teistest robotitest. Parema roboti antud kontekstis sõltub sellest, millisel alal robot võistleb. Enamasti on parema roboti kriteeriumid objektiivselt mõõdetavad ja hinnatavad: näiteks roboti kiirus või raja läbimiseks kulunud aeg, kuid leidub ka alasid, kus parema roboti määrab subjektiivne arvamus. Üheks subjektiivse võistluskategooria näiteks võib tuua paar aastat tagasi LIT-festivalil toimunud Tipp(ROBO)modell võistluskategooria, kus kõige parema/ilusama roboti valis žürii [2].

Kuigi täpsed tingimused ja reeglid on korraldavate võistluste vahel erinevad, siis peamiselt on joonejärgimisel kaks objektiivset kriteeriumit, millel ala põhineb: esiteks, kui täpselt suudab robot rada/joont järgida ja teiseks, kui kiiresti suudab robot rada läbida. [1] [3] [4] Lisaks on tihti võistlustel nõudeks ka see, et robot peab olema autonoomne ehk robot peab suutma iseseisvalt/ilma välise abita rada läbima. [6] Kuigi võistlusrobotika võib alguses tunduda lihtsalt toreda hobina, siis tegelikkuses põhinevad võistlusrobotikas lahendatavad ülesanded reaalsele probleemidele. Näiteks joonejärgimisel kasutatavaid tehnilisi lahendusi saab rakendada tööstuse automatiseerimisel kui ka muudes tööstuslikes ülesannetes. [3]

2.1 Disaini nõuded tulenevalt Robotexi reeglitest

Joonejärgimise võistlusi korraldatakse üle maailma: näiteks võistlusi korraldatakse nii Eestis [1], UK-s [3] kui ka Jaapanis [4] ja kuna nende võistlustel on tihtipeale erinevad reeglid/nõuded robotile, siis tuli otsustada, millise võistluse jaoks täpsemalt robot arendatakse. Autor otsustas Robotexi kasuks mitmel põhjusel:

- 1) Robotex on planeedi suurim robotikavõistlus [5] ;
- 2) Robotex ei toimu ainult Eestis, vaid Robotexi võistlussari on esindatud nii Soomes, Küprosel, Kreekas, Hiinas, Indias, Armeenias, Türgis kui ka Lõuna-Koreas [5] ;
- 3) autor on TTÜ Robotiklubi liige ning Robotexil võistlemisega saab autor esindada nii ülikooli kui ka ülikooli robotiklubi rahvusvahelisel võistlusel.

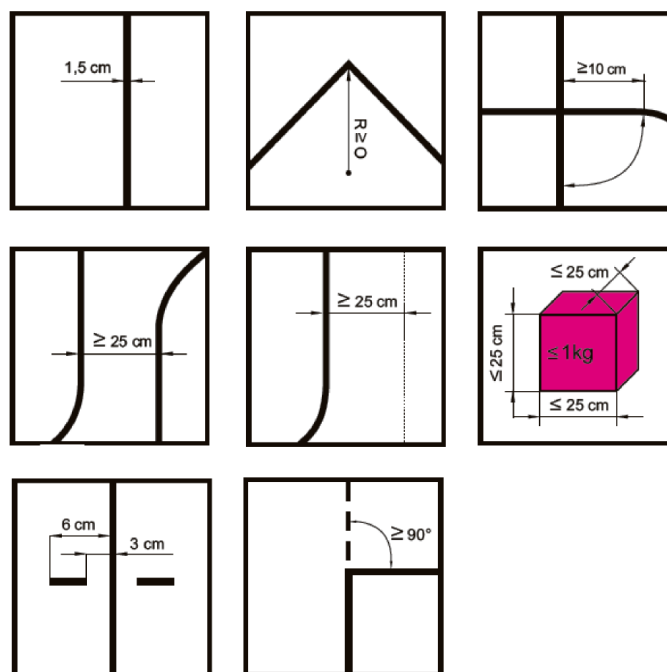
Selleks, et disainida robot Robotexil võistlemiseks on hea idee tutvuda Robotexi joonejärgimise reeglitega [6] , et sealt välja selgitada roboti disaininõuded. Otsesed roboti disaini nõuded Robotexi joonejärgimise reeglitest on järgmised:

- robot peab olema autonoomne;
- roboti maksimaalseteks mõõtmeteks on 25x25x25 cm;
- roboti maksimaalseks massiks on 1 kg;
- robot ei tohi töötada kõrgemal pingel kui 24 V;
- robotit peab saama käivitada ja peatada puldiga;
- robot peab täielikult katkestama 3 cm kõrgusel automaatse ajavõtusüsteemi valguskiire.

Robotexi reeglid määravad ära ka rajaparameetrid, mis on tegelikult roboti projekteerimise kohalt olulised: näiteks joone paksus, mille järgi saab joonesensori valida/teha jne. Seega tuleb vastavalt reeglitele [6] arvestada ka järgmiste tingimustega:

- väljak/tagataust on valge ja joone/raja värvus on must ning laius on 15 mm (see ja muud lisatingimused rajale on illustratiivselt väljatoodud Joonisel 1);
- ristmikul ristuvad jooned sirgelt täisnurga all, robot peab ristmikul jälgima sirget joont;
- rajale on märgitud stardi- ja finišijoon ning see võib kinnise raja puhul kattuda – kuigi reeglites ei ole seda otseselt kirjas, siis on mõistlik arvestada sellega, et robot peab finišijoonel seisma jääma;
- joone järgimisel peab robot joont pealtvaates katma;
- maksimaalne raja läbimise aeg on 2 minutit;
- robot võib väljuda 3 sekundiks rajalt, kuid peab seejärel jätkama raja jälgimist õiges suunas;
- võistlustel kasutatav valgustus tekitab suures koguses infrapunamüra – kui kasutusel on infrapuna sensorid, siis on soovitatav kasutada sensorite varjukoide.

8 Lisa 1 Väljaku ja roboti mõõdud



Joonis 1: Kuvatõmmis Robotexi raja ja roboti mõõtetest. [6]

2.2 Disaini sisendid Jaapani Robotrace võistluste analüüsist

Robotexi reeglistest tulenevad nõuded ja tingimused küll kitsendavad disaini sisendit, kuid siiski jääb väga palju aspekte ka reeglitega väljatoodud kriteeriumites lahtiseks. Näiteks, milline võiks olla roboti maksimaalne kiirus või milline oleks optimaalne roboti toitepinge jne.

Selleks, et tuua disaini nõutesse rohkem selgust, otsustati teha analüüs teiste joonejärgimisrobotitele. Analüüsi mõtteks oli näha, millised on varasemalt loodud robotite tehnilised parameetrid ning võtta eesmärgiks luua paremate või vähemalt samaväärsete parameetritega robot. Andmed analüüsiks võeti lähiaastate (täpsemalt 2017, 2021, 2022, 2023) Jaapani joonejärgimise võistluse Robotrace tulemustest [7] – seda kahel põhjusel: esiteks, Robotrace võistlusel avaldatakse lisaks tulemustele ka üsna täpselt võistelnud robotite tehnilised andmed [8] – näiteks 2023. aasta võitja tehnilised andmed võib leida allikast [9] (autor kasutas tööriista Google Translate [10], et tõlkida see inglise keelde); ja teiseks Jaapan on võistlusrobotika ringkondades tuntud kui tugeva tasemega maa. Analüüs tehti kahes osas. Kõigepealt kasutati võistluste tulemusi, et välja arvutada võitja, esikolmiku ja esimese kümne roboti keskmine kiirus. Teises osas uuriti poodiumikoha saanud robotite tehnilisi andmeid lähemalt.

2.2.1 Robotite keskmise kiiruse analüüs

Peatükis Lisa 2 võib näha Robotrace võistluse esikümne parima katse aegu ja ka parima katse keskmist kiirust. Keskmise kiiruse arvutamiseks kasutati ühtlase liikumise kiiruse [11] valemit:

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

Ilmselt ei ole robotite liikumine rajal ühtlane ja robotite maksimaalne kiirus sõltub ka rajast endast, kuid siiski annab keskmine kiirus aimdust, milline võiks olla disainitava roboti kiirus. Andmetest peatükis Lisa 2 saab omakorda teha kokkuvõtva tabeli, kus on leitud nii esikolmiku aritmeetiline keskmine kiirus kui ka esikümne aritmeetiline keskmine kiirus (Tabel 1). Tulemustest selgub, et aastast aastasse on keskmine kiirus kasvanud: saab tõdeda, et iga aasta kasvab keskmine kiirus ligikaudu 0.5 m/s võrra.

Tabel 1: Keskmise kiiruse analüüsi tulemused.

Aasta	Võitja keskmine kiirus [m/s]	Esikolmiku keskmine kiirus [m/s]	Esikümne keskmine kiirus [m/s]
2017	2.46	2.43	2.18
2021	3.84	3.38	2.42
2022	4.02	3.8	2.93
2023	5.01	4.46	3.62

2.2.2 Poodiumikoha saanud robotite tehniline analüüs

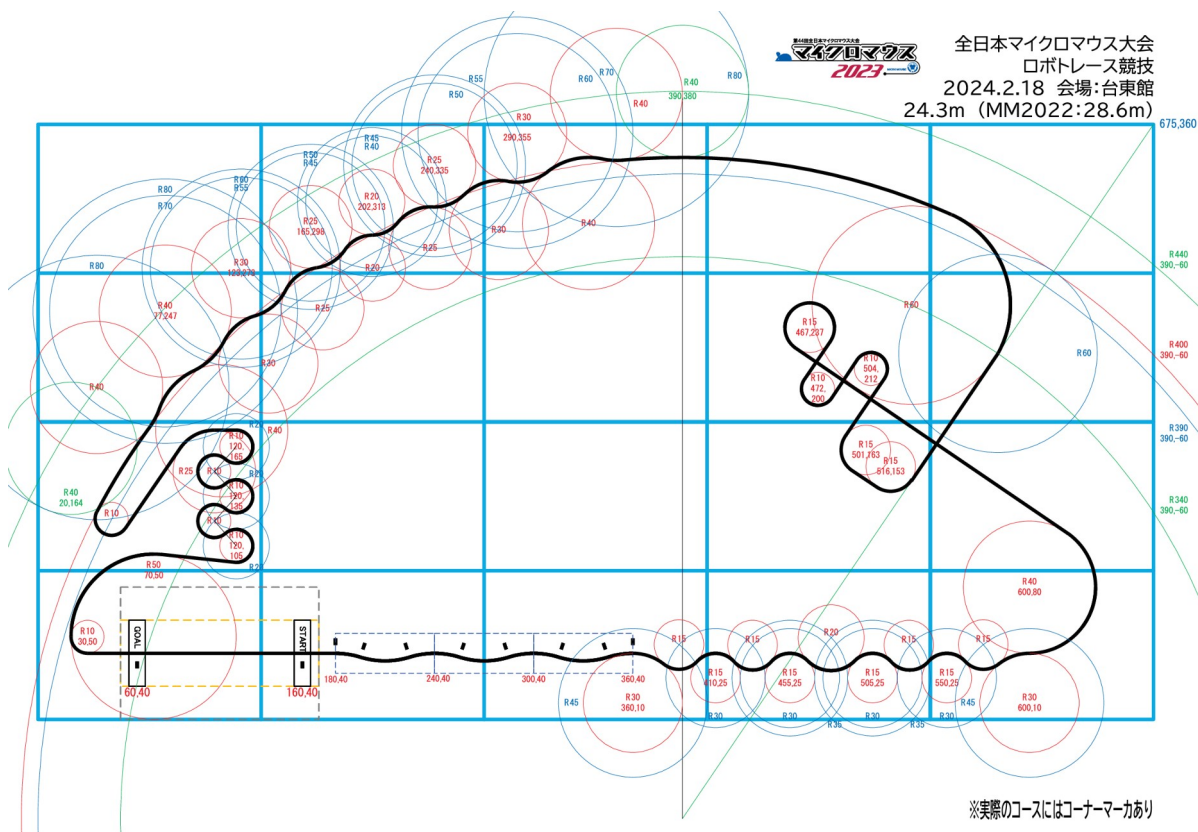
Vastavalt poodiumikoha robotite tehnilistele andmetele (peatükk Lisa 3) saab koostada tabeli (Tabel 2), kus on väljatoodud olulisemad tehnilised parameetrid iga aasta esikolmiku kohta. Mootori voolutarve on võetud vastavalt kasutatud draiverite andmelehtedest.

Tabel 2: Robotrace võistlusel poodiumikoha saavutanud robotite olulisemad tehnilised parameetrid.

Aasta	Kasutatud aku	Mootori voolutarve [A]	Joone-sensor	Lisa-sensorid	Roboti mass [g]	Rataste diameeter [mm]	Raja-algoritm
2017	LiPo 2S (max 8.4 V)	Max 1.5	Isetehtud; lugemine ADC-ga	IMU; ENC	≤ 150	≤ 30	Jah
2021	LiPo 3S (max 12.6 V)	Max 1.2	Isetehtud; lugemine ADC-ga	IMU; ENC	≤ 161	≤ 26	Jah
2022	LiPo 3S (max 12.6 V)	Max 1.2	Isetehtud; lugemine ADC-ga	IMU; ENC	≤ 130	≤ 25	Jah
2023	LiPo 4S (max 16.8 V)	Max 6	Isetehtud; lugemine ADC-ga	IMU; ENC	≤ 140	≤ 24.5	Jah

Tehniliste andmete põhjal on läbi aastate ka näha mitmeid detaile. Populaarsed on Maxoni DCX10L [28] mootorid ning vastavalt piltidele on paljudel robotitel turbiinid, et tekitada tõmbejõudu (*downforce*), mis suurendab roboti haakumist aluspinnaga. Andmete põhjal selgub ka, et robotite tippkiirus ulatub 7 m/s. Lisaks saab täheldada, et viimasel kolmel aastal domineerib diferentsiaalne juhtimine (*differential steering*) Ackermann tüüpi juhtimise üle ja enamikel robotitel on ehitatud aeglustav ülekanne, mis vähendab mootori kiirust, kuid tõstab pöördemoment, kusjuures diferentsiaalse juhtimisega robotile on ülekanne ehitatud nii, et üks mootor veab kahte ratast ehk robotil on kokku neli ratast.

Huvitava faktina saab välja tuua, et 2023. aasta võitja robotil Aegis2024 (Tabel 25) on tehnilistes andmetes kirjas, et roboti maksimaalne sirgejooneline kiirus on 5 m/s, kuid keskmise kiiruse analüüsist selgus, et sama roboti keskmine kiirus oli 5.01 m/s (Tabel 1). Arvestades tolle aasta finaali raja keerukust (Joonis 2) ei ole võimalik, et robot sõitis pidevalt maksimaalse kiirusega. Seega võib oletada, et päriselt on roboti Aegis2024 tippkiirus kiirem kui tehnilistes andmetes välja toodud.



Joonis 2: Robotrace 2023. aasta finaali raja kuju. [33]

2.3 Lõplikud disaini nõuded

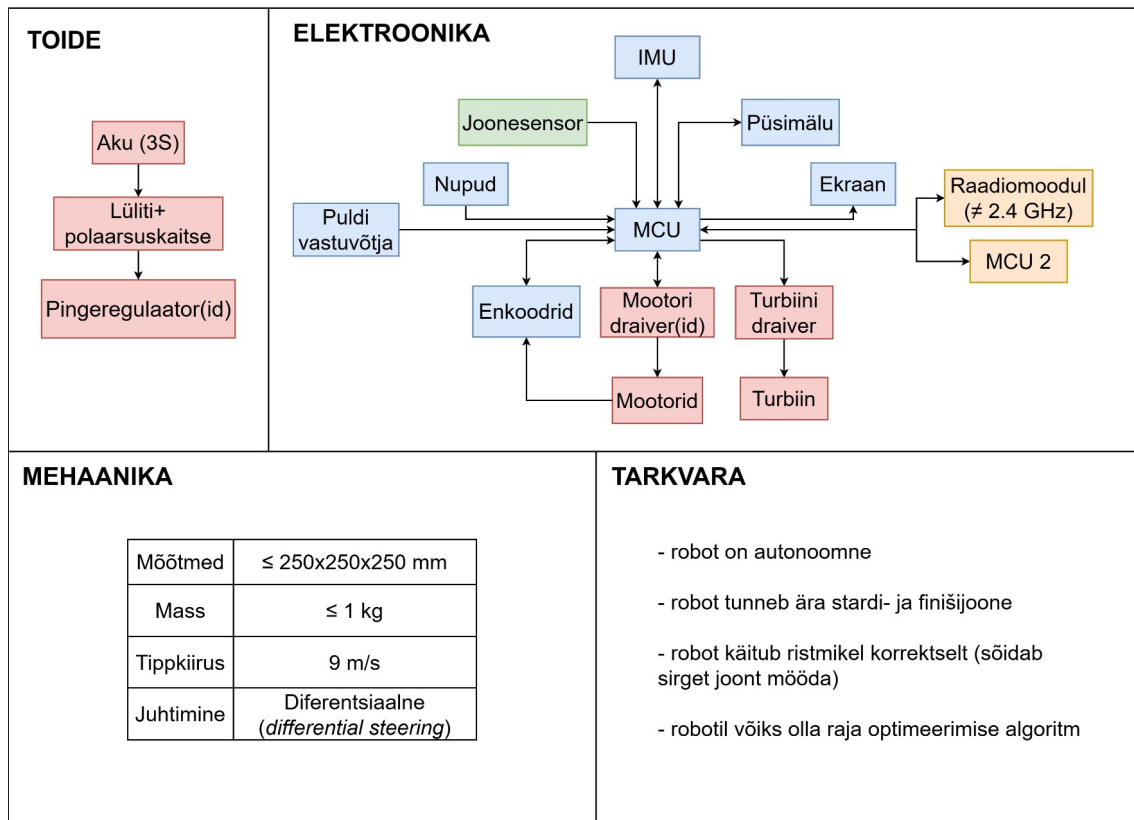
Selleks, et arendada konkurentsivõimeline võistlusrobot peatükis 2.2 analüüsitud robotitele ja mis vastaks Robotexi reeglitele, võeti disaini nõueteks järgmised parameetrid:

- roboti maksimaalseteks mõõtmeteks peab olema 250x250x250 mm (Robotexi reeglitest tulenev nõue);
- robot peab katkestama täielikult 30 mm kõrgusel oleva ajavõtusüsteemi valguskiire (Robotexi reeglitest tulenev nõue);
- roboti mass ei tohi ületada 1 kg (Robotexi reeglitest tulenev nõue), optimaalselt võiks robot olla nii kerge kui võimalik;
- toitepingeks võiks olla 12 V, seega on mõistlik kasutada toiteks LiPo 3S akusid, vastab ka Robotexi nõudele, et robot ei tohi kasutada kõrgemat pinget kui 24 V;
- roboti tippkiirus peaks olema 9 m/s;
- robot peaks kasutama diferentsiaalselt juhtimist;

- robotil peaks olema turbiin, et suurendada tõmbejõudu;
- robotil võiks olla isetehtud joonesensor parameetritega, mis oleks optimaalne Robotexil kasutavale rajajoone laiusele (15 mm);
- joonesensor peaks kasutama varjukit infrapunamüra eest (Robotexi reeglite soovitus);
- joonesensorit võib lugeda ADC-ga;
- lisasensoritena peaks robotil olema IMU ja enkoodrid (vajalik nii juhtimise kui ka rajaoptimeerimise algoritmi jaoks);
- robot peab sõitma autonoomselt (Robotexi reeglitest tulenev nõue);
- robot peab sõitma raja ristumisel otse (Robotexi reeglitest tulenev nõue);
- robot peab ära tundma Robotexi stardi- ja finišijoone;
- robotil võiks olla rajaoptimeerimise algoritm;
- kuigi poodiumikohtade robotitest oli ainult ühel robotil kirjas, et kasutati püsimalu (Tabel 25), siis võib oletada, et ka teistel robotitel oli püsimalu kasutusel, kuna vastasel juhul peab igakord, kui robotil vool ära kaob, uuesti raja läbima ja analüüsima – seega võiks robotil olla ka püsimalu;
- robotit peab saama käivitada ja peatada puldiga (Robotexi reeglitest tulenev nõue).

Mõistlik on veel juurde lisada paar disaini nõuet, mis tulenevad äsja kirjapandud disaini nõuetest endist. Selleks, et muuta rajaoptimeerimise algoritmi arendamine lihtsamaks on kindlasti otstarbekas kuidagi robotist kätte saada erinevaid sensori andmeid/diagnostikat: näiteks joonesensori ja enkoodrite väljundid ning väärtused. Ideaalis võiks selline andmevahetus käia sõitmise ajal ja kuna juhtmega ühendus sõitval robotil ei ole kõige praktilisem, siis see tähendab, et robotil võiks olla raadioside/juhtmevaba andmevahetuse võimalus. Kindlasti on diagnostika ka võistluste ajal oluline, kuid võistlustel on tihtipeale 2.4 GHz põhinevad võrgud üsnagi koormatud: võistlusel kasutavad Wi-Fi võrgud, osalejate/pealtvaatjate poolt kasutatav Bluetooth jne. Selletõttu on mõistlik luua raadioside mõnele muule sagedusele kui 2.4 GHz. Raja optimeerimine ise aga võib nõuda sardsüsteemide kohapealt suurt ressursi, seega on mõistlik lisada igaks juhuks disaini kaks mikrokontrollerit, mis suudavad omavahel andmeid vahetada.

Roboti käsitlemise lihtsamaks muutmiseks otsustati veel roboti disaini lisada ekraan ja ka nupud ning turvalisuse huvides otsustati disaini lisada polaarsuskaitse. Lisaks roboti toiteks on LiPo 3S aku, kuid arvatavasti enamikele elektroonikakomponentidele on tegemist liiga kõrge pingega, mille tõttu on disaini vajalik lisada vähemalt üks pingeregulaator. Joonisel 3 võib kokkuvõtvalt näha roboti üldplokk skeemi ja disaini olulisemaid nõudeid.



Joonis 3: Roboti üldplokk skeem ja olulisemad disaini nõuded.

2.4 Peatüki kokkuvõte

Peatükis tutvustati joonejärgimist kui võistlusrobotika ala (peatükk 2). Lisaks pandi paika vajalikud roboti disaininõuded, mis tulenesid Robotexi reeglitest (peatükk 2.1) kui ka Jaapani Robotrace võistluse tulemuste analüüsist (peatükk 2.2). Lõplikke disaini nõudeid võis näha peatükist 2.3.

3 Roboti mehaanika ja elektromehaanika

Roboti disaini alustati elektromehaaniliste komponentide – eelkõige mootorite – välja valimisega, kuna nendest sõltus edaspidi nii mehaanika disain kui ka elektroonika disain: näiteks mootorite draiverid, turbiini draiver ja enkoodri lahendus.

3.1 Veomootorite valik

Sõidumootorite valikul on olulised kaks parameetrit: pöörlemiskiirus ja pöördemoment. Kui on teada, millist pöörlemiskiirust ja pöördemomenti on robotile vaja, siis saab ka nende põhjal mootorid välja valida. Pöörlemiskiirust aitab määrata roboti planeeritav kiirus. Üheks disaini nõudeks oli, et roboti tippkiirus peaks olema 9 m/s. Roboti kiirust on võimalik välja arvutada ringkiiruse [11] valemiga:

$$v = \pi d n \quad (2)$$

kus d on ratta diameeter ja n on pöörlemiskiirus. SI-ühikutele vastavalt on valemis eeldatud, et kiirus on meetrid sekundis (m/s), diameetri ühikuks on meetrid ja pöörlemiskiiruse ühikuks on pöörret sekundis (s^{-1}), kuid kuna töös on kasutusel eelkõige millimeetrid ja mootorite pöörlemiskiirust avaldatakse tavaliselt RPM-ides, siis on mõistlik teisendada valem nii, et diameeter on millimeetrites ja pöörlemiskiirus RPM-ides:

$$v = \pi \cdot \frac{d}{1000} \cdot \frac{n}{60} = \frac{\pi d n}{60000} \quad (3)$$

Järelikult vastavalt valemile (3) tuleb leida ratta diameetri ja mootori pöörlemiskiiruse kombinatsioon, mis annaks kiiruseks 9 m/s. Matemaatiliselt muidugi on neid kombinatsioone lõpmata palju, kuid ka mehaaniliselt võib olla neid väga palju, kui vähemalt ühte parameetrit valemis ei piirata. Pöörlemiskiirust ei olnud töös väga mõistlik piirata mitmel põhjusel:

- pöörlemiskiiruse põhjal valitakse mootor;

- pöörlemiskiirus ei ole faktor, mida on lihtne pärast muuta – kui näiteks leida mootor, mille pöörlemiskiirus veidi erineb välja arvatud teoreetilisest kiirusest, siis on palju lihtsam muuta ratta diameetrit;
- Robotrace poodiumikoha robotitel (peatükk 2.2.2) oli rataste läbimõõduks 20-30 mm ehk ratta diameetri puhul on teada vähemalt mingigi suurusjärk, mida võiks robotil kasutada: mootorite pöörlemiskiirust ei olnud Robotrace robotitel eraldi välja toodud ja enamus neist kasutasid nagunii ülekandeid.

Seega on mõistlik piirata ratta diameetrit. Kuna valemist (3) on teada kiirus ja ratta läbimõõdu suurust kitsendatakse, siis on kasulik avaldada antud valemist pöörlemiskiirus n :

$$n = \frac{60000 v}{\pi d} \quad (4)$$

Ideaalsel juhul on ratta diameeter võimalikult väike, kuna siis on roboti kliirens väiksem ja turbiinil on lihtsam tekitada tõmbejõudu. Autor isegi proovis võtta ratta diameetriks 15 mm ehk mootori pöörlemiskiiruseks oleks sellisel juhul tulnud umbes 11500 RPM, kuid probleemiks tekkis see, et ei leitud vastava pöörlemiskiirusega mootorit, mis ei oleks olnud diameetrilt suurem kui ratas ise. Seega oleks tulnud sellisele mootorile ehitada 1:1 ülekanne, mis oleks lubanud rattal reaalselt maaga haakuvust tekitada, kuid kui juba ülekanne ehitada, siis see võiks midagi teha: ideaalsel juhul aeglustav ülekanne, mis annab pöördemomenti juurde.

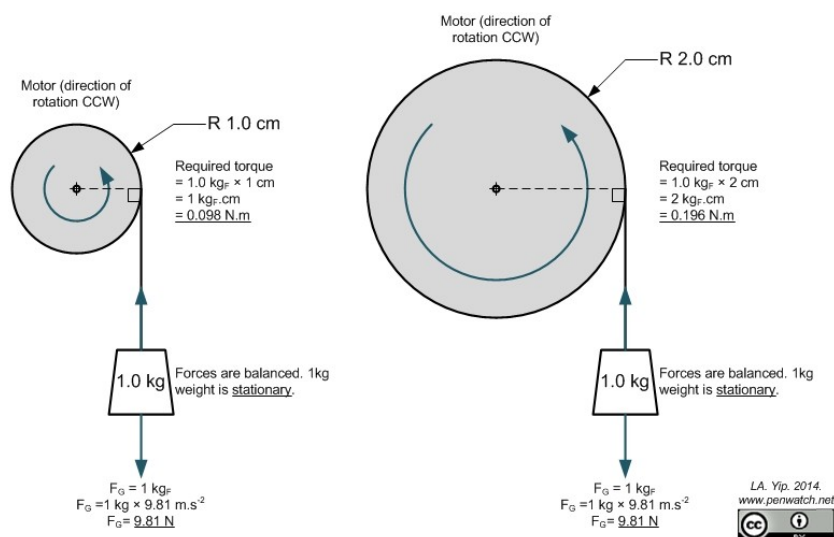
Pärast mõnda kaalumist otsustati võtta ratta diameetri aluseks just see 20-30 mm vahemik. Kasutades valemit (4) arvutati 1 mm sammuga välja igale ratta diameetrile vastav mootori pöörlemiskiirus (Tabel 3):

Tabel 3: Mootori pöörlemiskiirus sõltuvalt ratta diameetrist.

Kiirus v [m/s]	Ratta diameeter d [mm]	Pöörlemiskiirus n [RPM]
9	20	8594.37
9	21	8185.11
9	22	7813.06
9	23	7473.36
9	24	7161.97

Kiirus v [m/s]	Ratta diameeter d [mm]	Pöörlemiskiirus n [RPM]
9	25	6875.49
9	26	6611.05
9	27	6366.20
9	28	6138.83
9	29	5927.15
9	30	5729.58

Roboti maksimaalseks massiks hinnati umbes 500-600 g. Kuna robotile tuleb kaks mootorit, siis üks mootor võiks jaksata vedada 300 g suurust massi. Kuigi antud juhul mootor ei pea tõstma 300 g, kuid kui valida selline mootor, mis suudab 300 g tõsta või vähemalt õhus hoida, siis see esiteks garanteerib, et mootorid jaksavad kindlasti robotit vedada: vedamiseks vajalik jõud on palju väiksem kui tõstmiseks vajalik jõud; ja teiseks robotile paigaldatakse turbiin, mis tekitab tõmbejõudu, mis märkimisväärselt takistab roboti vedamist. Lisaks sellele garanteerib suur pöördemoment väga hea kiirenduse. Kiirendust kui parameetrit disainis eraldi ei käsitleta. Kui mootoril on märgitud pöördemoment, siis sellistel väikest/mudelauto mõõtu mootoritel on see tavaliselt väljendatud $\text{g}\cdot\text{cm}$, mis ei ole SI-ühik (pöördemomendi SI-ühik on $\text{N}\cdot\text{m}$ [11]), kuna aga see on andmetes väga levinud ja maa gravitatsioonis annab korrektse tulemuse, siis kasutati seda mootori pöördemomendi välja selgitamiseks. See ühik näitab, kui suurt massi suudab mootor maa raskuskiirenduse juures hoida paigal/õhus, kui mootori võlli otsa on kinnitatud 1 cm raadiusega taliratas (Joonis 4) [36].



Joonis 4: Ühiku $\text{g}\cdot\text{cm}$ illustatsioon. [36]

Näiteks, kui mootoril on märgitud, et selle pöördemoment on 500 g·cm, siis see tähendab, et mootor suudab 1 cm raadiuse taliratta puhul hoida paigal 500 g massi (maa raskuskiirenduse juures). Kui aga suurendada taliratta raadius 2 cm peale, siis suudab sama mootor (pöördemomendiga 500 g·cm) hoida 250 g raskust. Vajaliku mootori pöördemomendi g·cm ühikutes saab lihtsalt välja arvutada valemiga:

$$t = m r \quad (5)$$

kus t on pöördemoment (g·cm); m on mass (g), mida peab liigutama ja r on ratta raadius (cm). Kasutades valemit (5) saab Tabelit 3 täiendada järgnevalt (ühe mootori liigutavaks massiks võeti 300 g; Tabel 4):

Tabel 4: Mootori pöörlemiskiirus ja pöördemoment sõltuvalt ratta diameetrist.

Kiirus v [m/s]	Ratta diameeter d [mm]	Pöörlemiskiirus n [RPM]	Pöördemoment t [g·cm]
9	20	8594.37	300
9	21	8185.11	315
9	22	7813.06	330
9	23	7473.36	345
9	24	7161.97	360
9	25	6875.49	375
9	26	6611.05	390
9	27	6366.20	405
9	28	6138.83	420
9	29	5927.15	435
9	30	5729.58	450

Seega, tuleb leida mootor (kas ilma või koos tootjapoolse ülekandega), mille parameetrid vastaksid (ligilähedaselt) ühele reale Tabelis 4. Siinkohal tuleb autoril tunnistada, et keeruline oli leida korrektsete parameetritega mootorit, kuna sellistes mõõtudega mootoritel tavaliselt ei ole väga palju infot parameetrite kohta antud: heal juhul on antud mootori pöörlemiskiirus, kuid pöördemomenti ei ole; ja nendel tootja mootoritel (näiteks Pololu [34]), kes avaldavad üsnagi täpselt mootorite parameetrid ei leitud sobivat mootorit: kas pöörlemiskiirus/pöördemoment oli liiga madal või mootor oli jälle mõõtmetelt liiga suur, et oli vaja teha 1:1 ülekanne. Kaaluti ka DC mootorite

asemel BLDC mootorite kasutamist, kuid nende juhtimise keerukuse tõttu, otsustati jääda DC mootorite juurde.

Mehaanika osas otsustas autor konsulteerida Robotiklubi mehaanikuga Vadim Kokuriniga, kes ütles, et ta on suuteline roboti jaoks valmis tegema kolmekordse aeglustava ülekande. See muutis mootori otsingu parameetreid – nüüd oli võimalus kasutusele võtta mootoreid, mille pöörlemiskiirus jäi vastavalt Tabelile 4 17100-25800 RPM-i ja pöördemoment (minimaalselt) 100-150 g·cm juurde. Pärast mõningast otsimist leiti järgmised mootorid, mis potentsiaalselt robotile sobiksid (Tabel 5):

Tabel 5: Potentsiaalsed mootorid robotile.

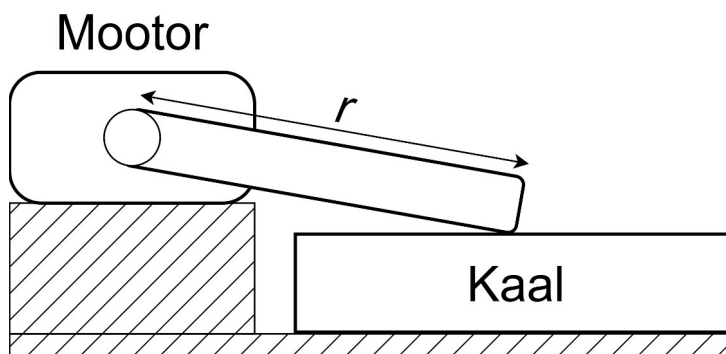
Mootor	Tootja	Toitepinge U [V]	Max pöörlemiskiirus n [RPM]	Max pöördemoment t [g·cm]
SIMN08CH [37]	Slot.it	12	21500	340
SC-0012B [38]	Scaleauto	12	25000	360
NSR3023 [39]	NSR	12	21400	350
NSR3027 [40]	NSR	12	30000	365

Kõikidel Tabelis 5 olevatel mootoritel oli väljatoodud just olulisemad mehaanilised parameetrid, aga elektroonilistest parameetritest oli puudu nii vabajooksu (*no load*) kui ka maksimaalse koormuse (*stall*) voolutarve. Nende parameetrite välja selgitamiseks otsustati iga mootorit testida. Lisaks otsustati, et kuna nagunii mootoreid testitakse, siis igaks juhuks mõõdetakse ka üle tootjate poolt välja toodud parameetrid: pöörlemiskiirus ja pöördemoment. Pöörlemiskiirust mõõdeti tahhomeetriga samaaegselt vaba jooksu testiga ja pöördemomenti mõõdeti kangi ja digitaalse kaaluga samaaegselt maksimaalse koormuse testiga.

Pöördemomendi test vajaks lahti seletamist. Joonisel 4 on välja toodud, et ühik g·cm näitab, kui suurt massi suudab mootor hoida paigal/õhus, kui mootori võlli otsa on kinnitatud 1 cm raadiusega taliratas. See on üks võimalus mootori pöördemomendi välja selgitamiseks: mootori võlli otsa tuleks külge ühendada kindla raadiusega taliratas ja siis erinevate raskustega testida, kas mootor suudab raskust üles tõsta või hoida. Kui mootor jaksab raskust hoida, aga üles ei tõsta, siis kasutades valemit (5) on võimalik arvutada mootori pöördemoment. Seda testi oleks töös keeruline kasutada, kuna esiteks

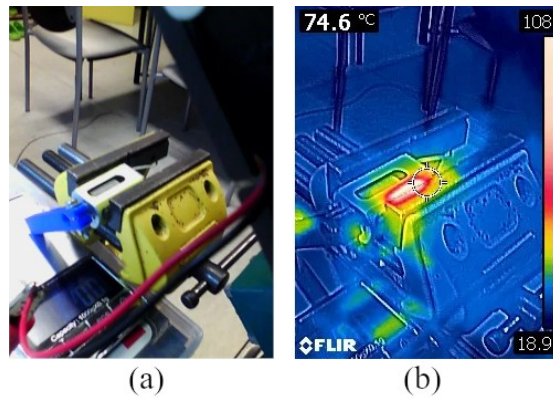
autoril puudusid kaaluvihud, et sellist testi täpselt läbi viia ja teiseks on sellist testi üsna ebamugav teha (eriti veel eri pingete juures). Lisaks tuleks arvestada muude faktoritega nagu näiteks taliratta enda mass. Küll aga on võimalus Joonisel 4 kujutatud test keerata „pea peale”: selle asemel, et mõõta palju mootor jaksab üles tõsta, saab mõõta palju mootor jaksab suruda. Valemis (5) on küll kasutatud (tali)ratta raadiust, kuid pöördemomendi saab ka vaadata läbi kangi/jõuõla pikkuse [11]. See tähendab, et kui mootori võlli otsa kinnitada kindlas pikkuses kang/latt ja mõõta näiteks kaaluga, kui palju jaksab mootor latiga suruda, saab arvutada valemiga (5) mootori pöördemomendi (r on antud juhul siis lati pikkus; Joonis 5).

Testimist tehti erinevate toitepingete juures: 1-12.6 V sammuga 1 V. Pöördemomendi testi kangi pikkuseks võeti 5 cm. Kõigepealt tehti mootori NSR-3027 pöördemomendi test, aga testimise käigus põles mootor läbi (Joonis 6), mille tagajärjel ei olnud võimalik vaba jooksu testi antud mootorile teha. Suure tõenäosusega oleks see mootor nagunii valikust välja jäänud oma suure pöörlemiskiiruse tõttu, kuid vigadest õppides tehti järgmiste mootoritel kõigepealt vaba jooksu test ja siis alles pöördemomendi test.



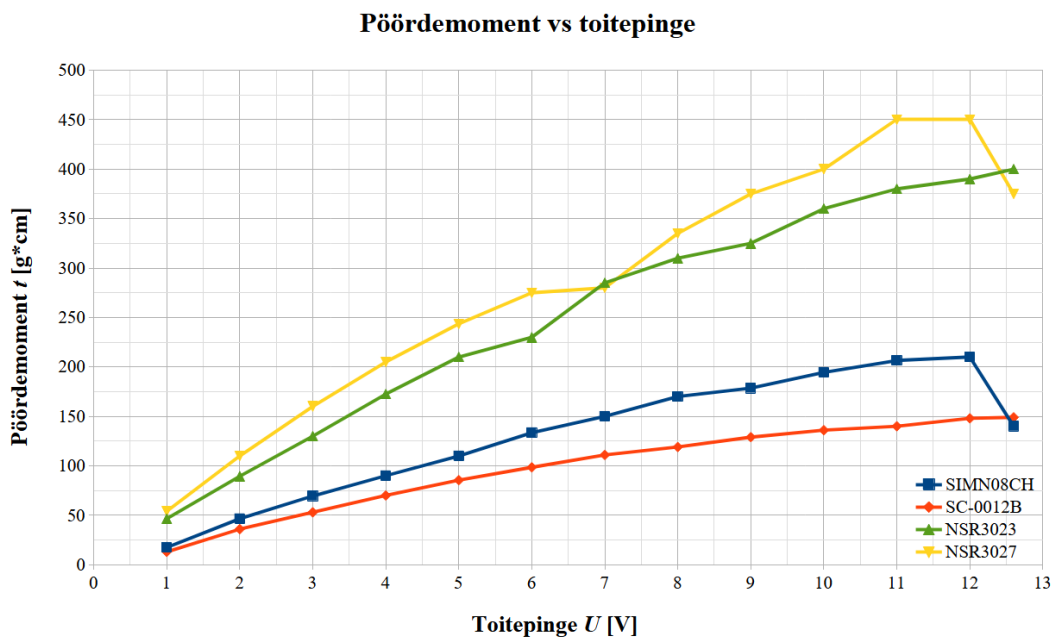
Joonis 5: Illustratsioon mootori pöördemomendi testpingist (lati pikkus r algab mootori võlli keskelt).

Mõõtetulemusi võib näha peatükist Lisa 4. Nendest tulemusest saab teha järgmised graafikud: vaba jooksu voolutarve sõltuvalt pingest (Joonis 36); pöördemomendi sõltuvus toitepingest (Joonis 7); maksimaalse koormuse (*stall*) voolutarve sõltuvalt toitepingest (Joonis 8). Eraldi graafikut ei tehtud mootori pöörlemiskiirusele, aga mõõtetulemustest on näha, et mootorite maksimaalne RPM vastab 5% ulatuses tootja poolt määratud pöörlemiskiirusele.



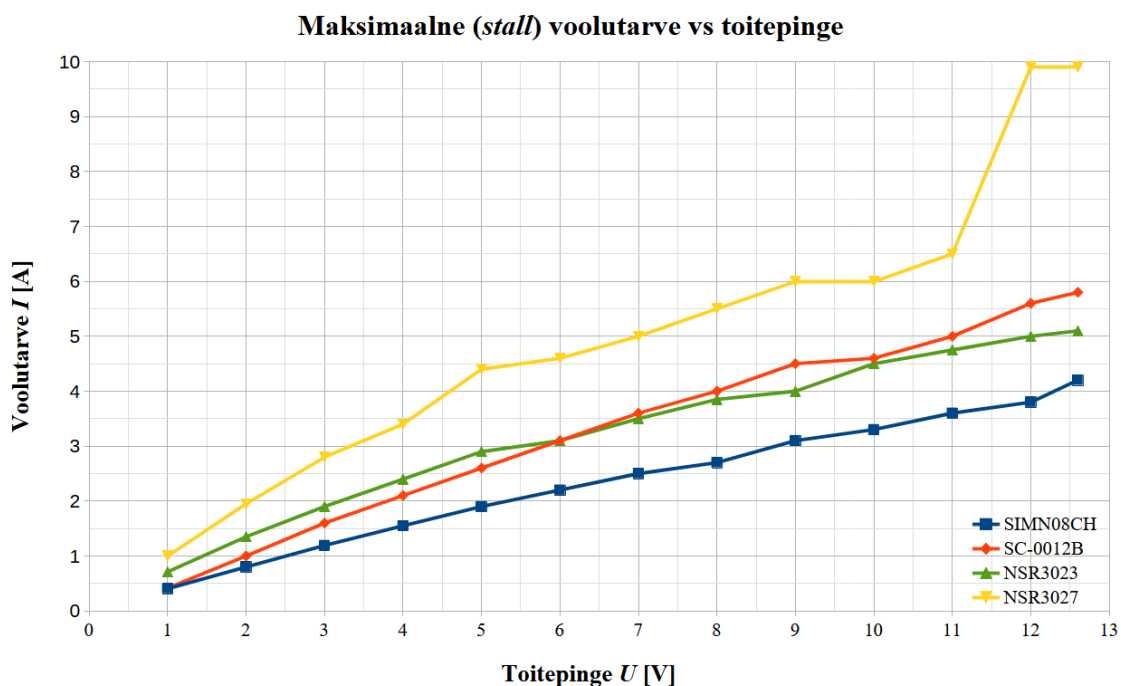
Joonis 6: (a) Pilt testpingist (mootor on NSR-3027); (b) Sama pilt koos termoinfoga

Tuleks mainida, et kõik tootjad on andnud mootorite spetsifikatsiooni 12 V toitepinge juures – töös katsetati neid kuni roboti kasutatava toitepingeni (12.6 V). Tulemustest (Joonis 7) on näha, et kahe mootori – SIMN08CH ja SC-0012B – pöördemoment on tegelikkuses palju madalam, kui tootja poolt märgitud (Tabel 5). SIMN08CH puhul peaks maksimaalne pöördemoment olema 340 g·cm, kuid mõõtmisel tuli välja, et see on tegelikult 210 g·cm: viimane mõõtmistulemus võis tulla antud mootori läbi põlemisest, kuigi maksimaalse voolutarve graafik (Joonis 8) sellele otseselt ei viita. SC-0012B puhul peaks maksimaalne pöördemoment olema 360 g·cm, kuid mõõtmisel selgus, et see on hoopis 149 g·cm. Huvitav on ka näha, et tootja NSR mootoritel on tegelikkuses suurem pöördemoment kui spetsifikatsioonis väljatoodud ja seda ka 12 V juures.



Joonis 7: Mootorite pöördemoment sõltuvus toitepingest (NSR3027 põles 12 V juures läbi).

Maksimaalse voolutarve (Joonis 8) kohapealt oli järjestus järgnev (madalamaist kõrgeimani): SIMN08CH, NSR3023, SC-0012B, NSR3027. Märkusena tuleb lisada, et kuna mootorite temperatuur maksimaalse voolutarve ja pöördemomendi testi ajal tõusis märkimisväärselt (Joonis 6), siis reaalne maksimaalne voolutarve ja pöördemoment on suure tõenäosusega mõõtetulemustest kõrgem, kuid siiski annavad mõõtetulemused hinnangu mootori parameetritele, mida saab töös kasutada [78]. Vaba jooksu voolutarve (Joonis 36) oli mõõdetud mootoritel praktiliselt sama. Tulemuste põhjal otsustati võtta veomootoriks NSR3023, kuna selle pöörlemiskiirus oli sobiv, pöördemoment on väga hea ning maksimaalne voolutarve oli võrreldes teiste mootoritega üks madalamatest.



Joonis 8: Mootorite maksimaalne voolutarve sõltuvus toitepingest (NSR3027 põles 12 V juures läbi).

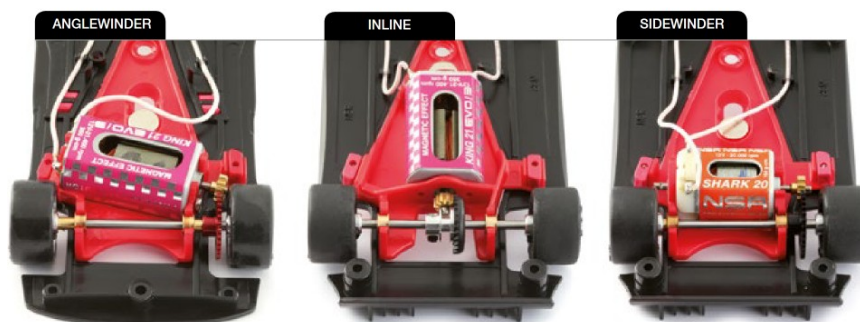
3.2 Veomootorite ülekanded

Nagu sai peatükis 3.1 mainitud, siis autorit oli nõus vabast ajast aitama tuttav mehaanik Vadim Kokurin, kes lubas roboti mootoritele teha 3:1 ülekanded, aga kuna Vadim Kokurin on ise ka tudeng ja Robotiklubi esimees, siis kahjuks ei jõudnud ta lõputöö tähtajaks ülekandeid valmis: autor sai kätte ainult ühe ülekande, millepärast tuli autoril endal ülekande süsteem välja mõelda. Vadim Kokurini poolt loodud ülekannet võib näha peatükist Lisa 5. Osad alamsüsteemid nagu näiteks enkoodri trükkplaat olid juba

Vadim Kokurini ülekande järgi disainitud, kui autor alustas enda ülekande süsteemi disainimist: neid valmis tehtud osi otsustati kohendada autori ülekandele.

3.2.1 Lõputöö autori poolt loodud ülekande lahendus

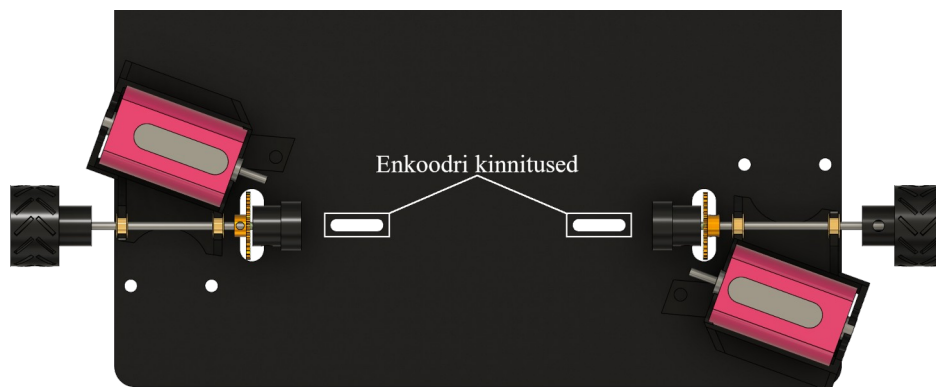
Alguses üritati uuesti leida selliste parameetritega mootorit, nagu on kirjeldatud Tabelis 4. Varasemalt aga oli juba teada, et sellist mootorit on keeruline leida. Otsustati jääda välja valitud mootori (NSR3023) juurde. See aga tähendas ikkagi, et on vaja 3:1 ülekannet. Siit tekkis mõte, et äkki müüakse ülekandeid eraldi. Alguses üritati leida terviklahendust, et ülekande saaks lihtsalt mootori võlli otsa kinnitada – sellist tüüpi ülekannet kahjuks ei leitud. Küll aga leiti, et mootori tootja (NSR) ise pakub erinevaid hammasrattaid, mida saaks ära kasutada. Nimelt on välja valitud mootor tegelikult juhtrajamudelauto (*slot car*) mootor ning nendes on ka ülekanded kasutusel. Ülekande tüüpe juhtrajamudelautodes on lausa kolme tüüpi (Joonis 9): täisnurkne (*inline*), paralleelne (*sidewinder*) ja teravnurkne (*anglewinder*). Muidugi need ülekanded on mõeldud eelkõige juhtrajautodele, kuid neid oli võimalik kohendada ka robotile.



Joonis 9: Erinevad ülekande tüübid juhtrajamudelautodes. [41]

Pärast mõningast kaalumist otsustati, et juhtrajamudelite ülekannete kasutamine on allesjäänud ajaraami mõistes kõige mõistlikum lahendus. Tol hetkeks oli ka enkoodri lahendus täielikult valmis tehtud Vadim Kokurini ülekandele, aga õnneks oli seda võimalik ka kohendada uuele ülekandele – kuna robot kasutab diferentsiaalset juhtimist (*differential steering*), siis peab tulema robotile kaks ülekannet (üks ülekanne ühele poole ja teine ülekanne teisele poole). See tähendab, et erinevalt Joonisest 9, kus ülekande telje küljes on kaks ratast, jääb üks telje pool vabaks (teisele poole tuleb vedav ratas) ja kuna kasutusel oli magneetiline tüüpi enkooder, siis oli võimalik vabaks jäänud telje poolele kinnitada magnet (Joonis 10).

Kõigepealt tuli ära otsustada, millist tüüpi ülekannet kasutada. Paralleelset tüüpi ülekanne jäi välja, kuna seal on kasutusel lühemat tüüpi mootorid (*short can*). Alguses eelistati täisnurkset ülekannet, kuna see tundus olevat mehaaniliselt lihtsam, aga kuna kõik telje külge minevad hammasrattad olid plastikust (võib arvata, et roboti vedamisel rakendub ülekandele suurem koormus kui mudelautode puhul ja selletõttu võiks ülekanne olla metallist), siis otsustati teravnurkse ülekande kasuks. Järgmisena otsiti sobivat väikse hammasratta (*pinion*) ja suure hammasratta (*crown*) paari. Kahjuks ei leitud tol hetkel täpset kolmekordset ülekannet, vaid leiti hammasrattaste paar 34:12 [42] [43] , mis teeb ülekandeteguriks umbes 2.83. Ülekande kinnitamiseks roboti külge kasutati sama tootja mootori (robotile kohaldatud) kinnitust ja ka telg ning muud vajalikud jupid võeti NSR toodangust. Kogu lahenduse kavandit on võimalik vaadata Jooniselt 10. 25 mm diameetriga rataste puhul tuleb roboti kliirens umbes 3.5 mm.



Joonis 10: Autori ülekande kavand pealtvaates.

3.3 Turbiini valik

Peatükist Lisa 3 võib näha, et turbiine võib robotile paigaldada kahel viisil. Esimene viis on, et turbiin imeb roboti vastu maad (näiteks Tabel 25). Teisel viisil turbiin surub roboti vastu maad (näiteks Tabel 23). Otsustati valida selline turbiin, mis imeks roboti vastu maad, kuna see variant on turvalisem. Näitedes võis näha, et tihtipeale on turbiine mitu: näiteks roboti erinurkades, aga töös otsustati kasutada ühte turbiini, kuna mitu „identset” turbiini ei pruugi sama palju tekitada tõmbejõudu, mis võib mõjutada roboti juhtimist. Lisaks turbiinid tekitavad kindlasti mingis ulatuses (mehaanilist) müra, mis võib mõjutada elektroonikat ning mitme turbiini kasutamine potentsiaalselt võib müra rohkem tekitada kui ainult ühe turbiini kasutamine.

Turbiine otsustati otsida AliExpressist, kuna Euroopast oleks sarnaste turbiinide tellimine läinud palju rohkem maksma (autor rahastas arendustööd ise). Igale turbiinile osteti saadavusel ka tootja poolt soovitatud/pakutud ESC. Kokku leiti kolm potentsiaalset sobivat turbiini (Tabel 6). Selleks, et selgitada välja parim turbiin, otsustati turbiine testida.

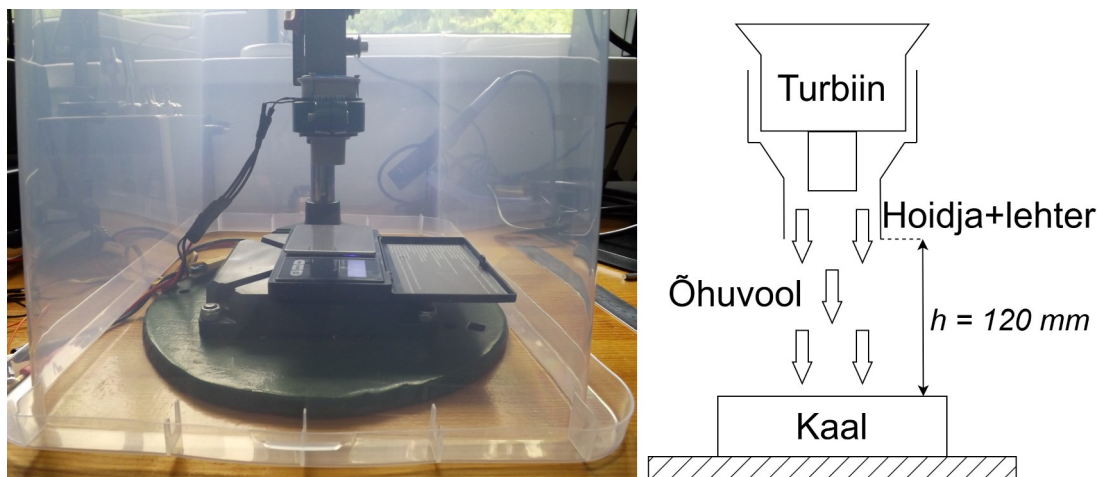
Tabel 6: Potentsiaalsed turbiinid robotile.

Turbiini mudel	Tootja	Max toitepinge U_{MAX} [V]	KV-väärtus	Max voolutarve I_{MAX} [A]	Tõmme m [g]
QF1611-6000KV [44]	QXMotor	14.8 (4 S)	6000	9.7	265
XDF3011-8000KV [45]	AEORC	12.6 (3 S)	8000	17.6	211
CW-EDF [46]	OFLY	12.6 (3 S)	8800	5.5	120

3.3.1 Turbiinide efektiivsuse test

Efektiivsuse testi eesmärk oli näha, milline turbiin puhub/imeb kõige rohkem võrreldes voolutarbega. Test viidi läbi nii, et turbiin kinnitati statiivi külge väikese lehtriga ja alusele asetati kaal. Statiiv seati üles nii, et leetri alumine ots oleks 120 mm kõrgusel kaalu pinnast (Joonis 11). Antud test ei anna turbiini absoluutset tõmmet, vaid näitab, milline on turbiini tõmme võrreldes teiste mõõdetud turbiinidega. Lehtrit kasutati kahel põhjusel: esiteks, aitas see turbiine statiivi kinnitada ja teiseks, lehter garanteeris, et turbiini poolt tekitatud õhuvool ei hajuks turbiini kuju tõttu laiali (lehter suunas õhuvoolu erinevatel turbiinidel üheselt). Turbiinidel kasutati toitepingeks maksimaalset robotil kasutatava aku pinget ehk 12.6 V. ESC-i kiiruse juhtsignaali muudeti 10% sammudega ehk igale mõõtepunktile vastab kindel juhtsignaali väärtus, eelmisest mõõtepunktist 10 protsendipunkti võrra suurem alustades 0% ja lõpetades 100% – 0% juhtsignaalile vastab turbiini seiskumine ja 100% juhtsignaalile maksimaalne turbiini kiirus. Voolutarve, tõmme ja füüsikaline pöörlemiskiirus erinevad turbiinidel sama väärtusega juhtsignaalide juures. Seda see test üritabki välja selgitada: milline turbiin on kõige efektiivsem ehk puhub/tõmbab kõige rohkem sama juhtsignaali juures võrreldes voolutarbega. Kuna ESC võib mängida rolli nii voolutarbes kui ka turbiini tõmbes, siis katsetati turbiine mitte ainult turbiini tootja poolt pakutud ESC-iga, vaid neid prooviti

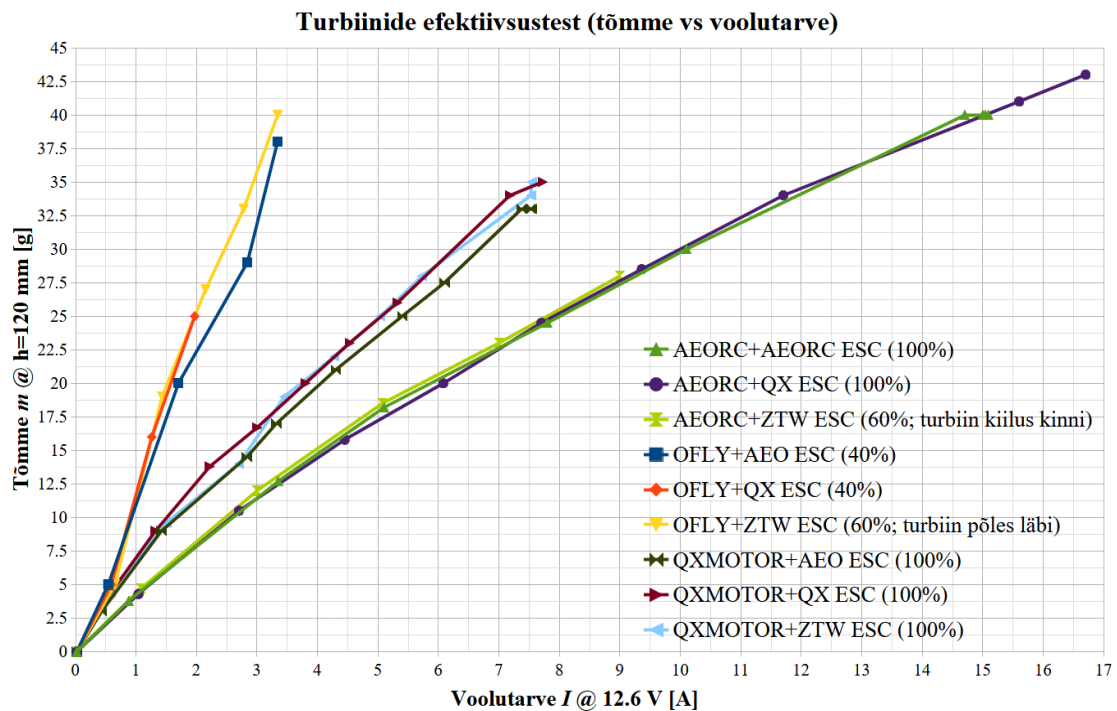
ka teiste tootjate (poolt pakutud) ESC-idega. Ainukene erand on OFLY poolt pakutud ESC, mis põles kohe esimesel katsetamisel läbi. Autoril oli varasematest aegadest olemas kolmanda osapoole ESC (ZTW Mantis Slim G2 20A [49]), mida kasutati OFLY ESC-i asemel.



Joonis 11: Turbiini testpink ja selle illustratsioon (läbipaistev plastikkast lisati turvalisuse huvides).

Mõõtetulemusi võib näha peatükist Lisa 6. Testid tehti alguses 40% maksimaalsest juhtsignaalist, kuna kardeti turbiine läbi põletada. Kui kõikidele turbiinidele oli 40% juhtsignaali testid tehtud, üritati minna 100% juhtsignaalile: OFLY turbiin põleski esimesel 100% juhtsignaali katsetusel läbi. Lisaks sellele kiilus AEORC turbiin ZTW ESC-iga jooksutamisel 60% juhtsignaali juures kinni. Nendel põhjustel ei ole mõõtetulemustes kõikidel turbiinide ja ESC-i paaridel 100% juhtsignaalideni ulatuvaid tulemusi. Vastavalt tulemustele otsustati luua graafik, kus on väljatoodud tõmbe sõltuvus voolutarvest erinevate juhtsignaali tasemete juures (Joonis 12). On näha, et kõige efektiivsem on OFLY turbiin, kuid erinevalt teistest turbiinidest esines sellel turbiinil mehaanilisi probleeme. Nimelt sulas turbiini korpus üles ja seda juba tegelikult esimeste testide ajal ehk kuni 40% juhtsignaalist. Kuigi lõplikult põles OFLY turbiin läbi kasutades ZTW ESC-i 60% juhtsignaali juures, siis ei ole päris lõpuni teada, kas turbiin põles läbi turbiini enda vea tõttu või ESC-i tõttu, kuna ka AEORC turbiinil tekkis tõrkeid 60% juhtsignaali juures, kui seda jooksutati ZTW ESC-iga (katsetamiseks oli ostetud igat turbiini üks tükk, millepärast ei saanud OFLY turbiini teiste ESC-idega lõpuni katsetada). Igal juhul ei oleks saanud OFLY turbiini kasutusele võtta, kuna ülessulamist täheldati juba eelnevatel, 40% juhtsignaalini, ulatunud testidel. Seega efektiivsuse kohapealt on QXMotor turbiin koos QX ESC-iga parim analüüsitud

variantidest. Tulemustest ka selgus, et erilist vahet efektiivsuses erinevad ESC-id (sama turbiini puhul) ei anna.



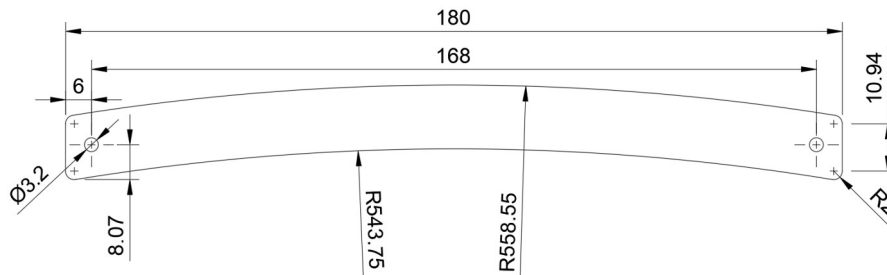
Joonis 12: Turbiinide efektiivsustest (tõmbemass vs voolutarve).

3.4 Roboti kere ja muu mehaaniline disain

Pärast elektromehaaniliste komponentide välja valimist (veomootorid ja turbiin) mõeldi välja ja modeleeriti roboti kere koos vajalikke kinnitustega. Otsustati, et roboti kereks jääb põhitrükkplaat ise, sest trükkplaat on tugev, mis ei paindu turbiini tõmbejõu tõttu läbi, kuid on piisavalt kerge. Lisaks roboti madala kliirensi tõttu, mis jääb alla 3.5 mm, saab trükkplaadile komponente lisada ainult ühele poole, mis omakorda tähendab, et trükkplaat peaks olema piisavalt suur, et kõik vajalikud komponendid ühele poole ära mahutada. PCB laiuseks otsustati võtta 180 mm, kuna Vadim Kokurini ülekandega, kui arvestada ka potentsiaalsete ratastega, tuleks roboti laius 248 mm, mis on disaini nõudele, et roboti maksimaalseks mõõtmeteks on 250x250x250 mm, väga lähedal. Autori poolt loodud ülekande lahendus on kitsam: roboti kogu laiuseks tuleb 235 mm.

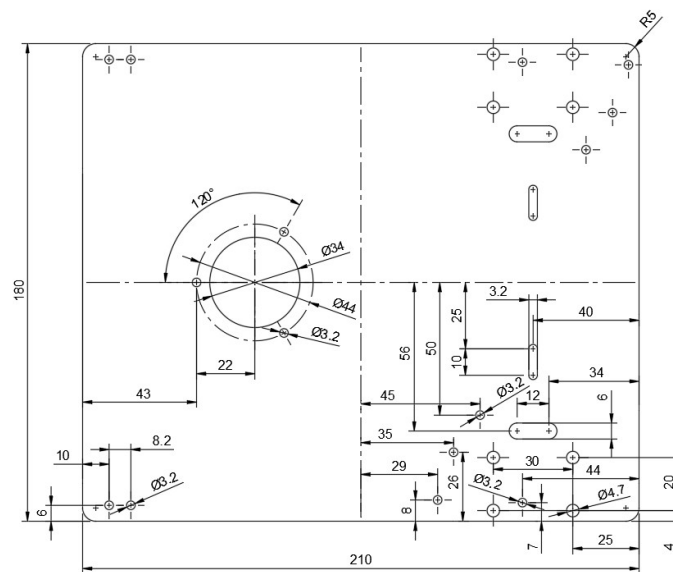
Joonesensor otsustati teha robotile eraldi, kuna see annab tulevikus võimaluse joonesensorit muuta ja võistluste ajal ka vahetada. Joonesensori laiuseks võeti roboti

laius ehk 180 mm ja võttes eeskujuks jaapani robotid, tehti joonesensor väikse kumerusega (Joonis 13).



Joonis 13: Roboti joonesensori joonis (ühikud on mm).

Põhiplaadi pikkus sõltus joonesensori disainist. Jättes veidi varu, otsustati, et põhitrükkplaadi pikkuseks tuleb 210 mm (Joonis 14): sellega tuli kogu roboti pikkuseks 245 mm.



Joonis 14: Roboti põhi trükkplaadi joonis (ühikud on mm).

Lisaks projekteeriti erinevad kinnitused: joone sensori hoidjad ja turbiini kinnitus. Veel joonestati valmis joonesensori varjuk ja ka autori ülekandele vajalikud detailid: rattaveljed (Joonis 10), ratta silikoonvorm ja enkoodri magneti hoidjad. Hiljem aga otsustati kasutada disainitud rataste asemel juhtrajamudelautode rattaid ja rehve. Ülekande kinnitamine tehti nii, et robotil on võimalik kasutada mõlemat (kas Vadim Kokurini või autori poolt loodud) ülekande süsteemi. Lõplikku mehaanilist koostu võib näha Jooniselt 15. Enamus disainitud kinnitus- ja lisakomponente 3D prinditi.



Joonis 15: Roboti mehaaniline koost CAD-is.

3.5 Peatüki kokkuvõte

Peatükis anti ülevaade veomootorite tähtsamatest parameetritest ning valiti katsetamise teel välja veomootor (peatükk 3.1), millele ka leiti sobiv ülekande lahendus (peatükk 3.2). Lisaks valiti katsetamise teel välja ka turbiin (peatükk 3.3) ja tutvustati roboti mehaanilist disaini (peatükk 3.4).

4 Roboti elektroonika

Roboti elektroonika projekteerimine algas lisaplaatidest ehk enkoodri ja joonesensori plaadist, kuna nende plaatide disain võis põhitrukkplaati projekteerimist mõjutada. Mis on lisaplaatide väljundsignaalid, milliseid ühendusi kasutatakse jne – need kõik on faktorid, mida tuleb arvestada põhiplaadi projekteerimisel.

Kõikide trükkplaatide disainimisel jälgiti, et radadel on kindel referentstasand/voolu tagasitee (*return path*), kuna see tagab signaalide kvaliteedi ja ka mürakindluse (*signal integrity*). Kõige lihtsam on referentstasand tekitada terve plaadi suuruste maanduskihtidega (*ground pour*) – see tähendab, et trükkplaadi kihid peaksid PCB ülesehituses (*stack-up*) olema paigutatud nii, et igal signaalikihil on tema peal või all maanduskiht. Näiteks, kui trükkplaadi esimene kiht on signaalikiht, kus jooksevad signaalirajad, siis teisel kihil peaks olema täielikult maanduskiht. Sama kehtib ka näiteks siis, kui signaalikiht on neljandal kihil – kolmas kiht peaks siis olema maanduskiht. [52] [53]

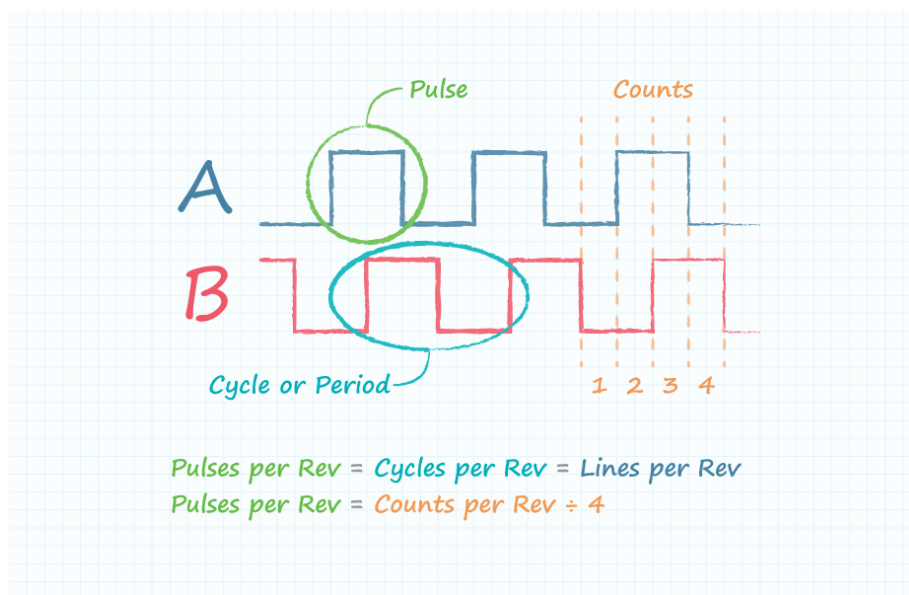
4.1 Enkoodri trükkplaat

Enkoodrit kasutatakse roboti rataste pöörete lugemiseks: see on otstarbekas nii roboti juhtimisel ja ka rajaoptimeerimise algoritmi jaoks, kus enkoodrist tulenevat infot saaks ära kasutada raja kaardistamisel ja ka roboti positsioneerimisel. Enne trükkplaadi disainimist, otsiti välja sobiv enkooder. Samal ajal käis ka konsulteerimine Vadim Kokuriniga ülekande osas, mille käigus sai ilmsiks, et mõistlik lahendus on see, et enkooder loeb rataste pöörded. Parimal juhul aga oleks enkooder lugenud pöörded mootori võllist, kuna siis oleks 3:1 ülekande puhul mahtunud enkoodri resolutsioon kolm korda ühte ratta pöördesse – antud juhul aga see ei olnud võimalik, kuna väljavalitud mootoril oli võll väljatoodud ainult ühel pool. Seega valitav enkooder peaks olema kõrge resolutsiooniga, et tagada piisav täpsus roboti juhtimisel. Enkoodrite valikul kaaluti erinevaid enkoodreid (Tabel 7).

Tabel 7: Potentsiaalsed enkoodrid robotile.

Enkooder	Tootja	Väljundid	Suhtlus- protokoll	Toite- pinge [V]	Reso. [bit]	Max ABI CPR
AS5601 [54]	ams OSRAM	AB	I2C	3.3/5	12	2048
AS5147P [58]	ams OSRAM	ABI, SPI, UVW, PWM	SPI	3.3/5	14	4096
AS5047U [59]	ams OSRAM	ABI, SPI, UVW, PWM	SPI	3.3/5	14	16384
3499 [62]	Pololu	AB	-	2.7-18	5	20
ENX 10 EASY [68]	Maxon	AB, SSI	SSI, BiSS	5	12	1024
EMS22Q [69]	Bourns	ABI	-	3.3/5	8	256

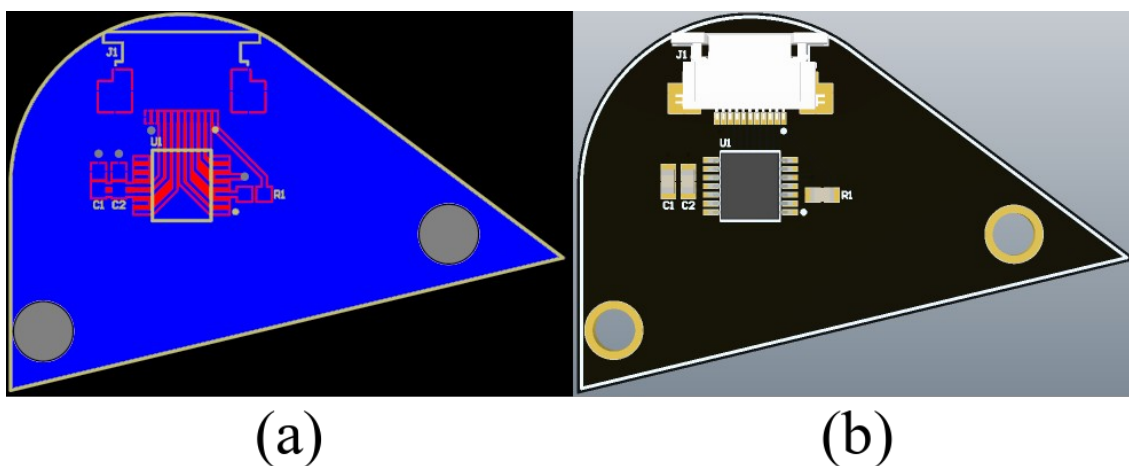
Tabelis 7 on osade enkoodrite resolutsioon suurem, kui nendele vastav ABI väljundi CPR näitab, kuna nendel enkoodritel on võimalik ka pöörlemist lugeda läbi suhtlusprotokolli, mille tulemus võib olla kõrgema resolutsiooniga kui ABI väljund. ABI väljund on üks enimlevinud (inkrementaalse) enkoodri väljundsignaale, kus A ja B on omavahel 90° nihkes olevad nelinurksignaaliid, millelt saab lugeda pöördeid ja ka pöörlemissuunda. [75] I signaal (vahel märgitud ka kui Z signaal) tähistab ühte täispöört [76]. ABI signaali resolutsiooni määramisel on kasutusel kaks terminit: CPR (*counts per revolution*) ja PPR (*pulses per revolution*), mis tegelikult annavad sama info edasi erineval kujul (Joonis 16). PPR näitab mitu impulssi teeb kas A või B signaal terve pöörde kohta. CPR aga näitab, mitu erinevat „sammu” on terves pöördes: kuna A ja B signaal on omavahel 90° nihkes, siis nende vahel on neli erinevat olekut. Näiteks vastupäeva pöörlemise puhul vastavalt A ja B olekud on 00; 10; 11; 01. Neid olekuid nimetatakse sammudeks ja samme on alati neli korda rohkem kui impulsse. [77]



Joonis 16: Enkoodri AB väljund. [77]

Tabelist 7 selgub, et võrdluses olevatest enkoodritest on kõige suurema resolutsiooniga AS5047U. Lisaks sellele on mehaaniliselt tegemist üsnagi universaalse enkoodriga: võrreldes näiteks Pololu või Maxoni enkoodritega, kus on juba eeldatud, kuidas enkooder mootori/ülekande külge peaks kinnituma, siis AS5047U puhul on vaja ainult, et magnet, mis on mootorile/ülekandele kinnitatud, oleks enkoodrile piisavalt lähedal. Muidugi universaalsema lahenduse puhul tuleb lahendus täpsemalt välja mõelda, kuid kuna nagunii oli plaan teha ülekanne erilahendusena, siis universaalsem lahendus sobis väga hästi. Seega valiti enkoodriks AS5047U.

Enkoodri trükkplaadi mehaanilise kuju andis ette Vadim Kokurin, kuna see oli esialgselt mõeldud just Vadim Kokurini ülekandele. Hiljem kohandati trükkplaat käsitsi ka autori poolt loodud ülekandele. Trükkplaat (Joonis 17) tehti kahekihiline: esimene kiht on signaalkiht koos komponentidega ja teine on vasekiht (*ground pour*). Enkoodri trükkplaat on põhitrükkplaadist eraldi ja selletõttu on vaja kuidagi tekitada ühendus nende kahe plaadi vahel – selleks otsustati kasutada ribakaablit (FFC). Enkoodri plaadi elektriskeem on üsnagi lihtne: koosneb enkoodri kiibist, kondensaatoritest (*decoupling capacitor*) ja ühest takistist SPI jaoks. Trükkplaadi elektriskeemi ja kõiki kihte võib näha peatükist Lisa 7.

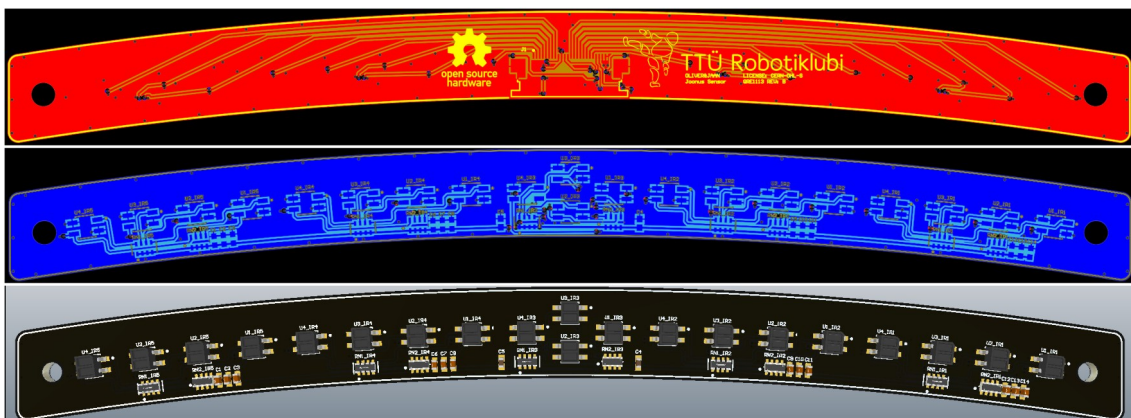


Joonis 17: Enkoodri trükkplaadi: (a) 2D altvaade ja (b) 3D altvaade.

4.2 Joonesensor

Joonesensor otsustati samuti teha erilahendusena, kuna oli soov luua suure resolutsiooniga jooneandur, mis oleks mõeldud just Robotexi võistluse jaoks. Lisaks joonesensori tegemine erilahendusena andis mehaanilise disaini vabaduse, mis lubas teha joonesensori Robotrace robotite eeskujul väikese kumerusega (Joonis 13). Inspiratsiooni joonesensori tegemisel võeti Robotrace robotite, Pololu [70] ja Sparkfun [71] jooneanduritest, kus sensorplaat koosneb peegeldusanduritest. Nende peegeldusandurite tööpõhimõtteks on kasutada IR LED-i (infrapuna valgusdiod) ja fototransistori: IR LED tekitab infrapuna valgusvihu, mis peegeldub aluspinnalt tagasi ja tagasi peegeldunud valgusest sõltub fototransistori küllastatavuse tase. Seega on võimalik mõõta fototransistori kollektorilt pinget, mis on proportsionaalne tagasi peegeldunud infrapuna valgusega. Kui mõõdetav pind on valge/heleda pinnaga, siis enamusest välja kiirgatud valgusest peegeldub pinnalt tagasi ning fototransistor lülitub sisse ehk kollektor ja emitter on lühises, aga kui mõõdetav pind on must/tume, siis enamusest valgusest neeldub ja fototransistor lülitub välja ehk kollektor ja emitter on tühises. Hallide või selliste pindade puhul, kus osa valgusest neeldub ja osa peegeldub tagasi, on fototransistor aktiivses olekus (*active region*), kus kollektori pinge (õigemini kollektori ja emitteri juhtivus) on lineaarselt seotud tagasi peegeldunud valgusest [72]. Seega on tegemist analoogsignaali, mida oleks võimalik näiteks analoog-digitaalmuunduriga (ADC) mõõta. Kui panna sellised peegeldusandurid ühte ritta, siis on nendega võimalik edukalt joont tuvastada ja ka robotit juhtida.

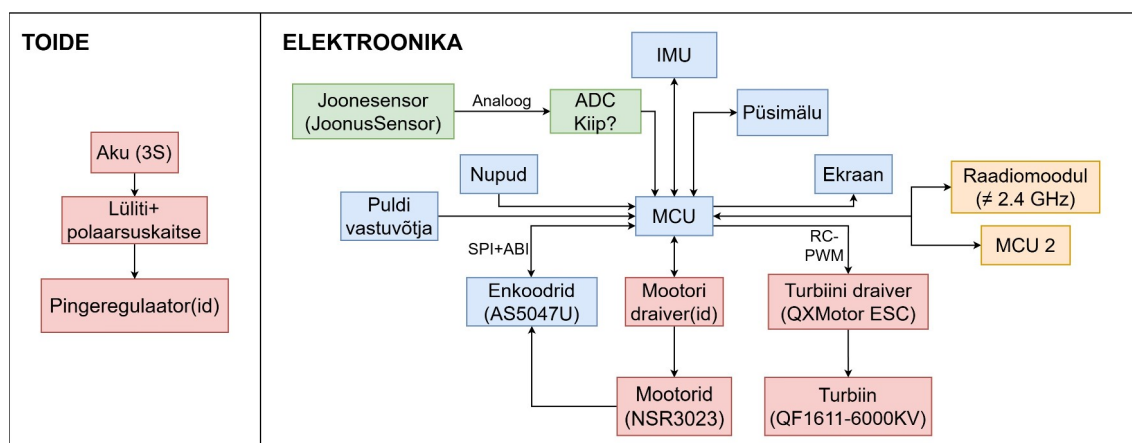
Selleks, et disainida suure resolutsiooniga joonesensor, otsustati trükkplaadil kasutada 20 QRE1113 [73] peegeldusandurit, mis on paigutatud nii, et ühe sensori äärest järgmise sensori keskele on 7.5 mm. See tagab, et 15 mm joone puhul, nagu Robotexil on kasutusel, on vähemalt üks sensor alati sensorplaadi ulatuses joone peal. Joonesensori keskel otsustati peegeldusandurid panna tihedamalt, et oleks lihtsam robotit hoida joone suhtes keskel. Joonesensor otsustati teha põhitrükkplaadist eraldi, kuna see võimaldab tulevikus joonesensori disaini muuta ilma, et peaks muutma põhitrükkplaati. Lisaks võimaldab see ka joonesensorit lihtsalt vahetada, kui joonesensoriga peaks midagi juhtuma: näiteks robot sõidab millelegi otsa. See aga tähendab, et nagu ka enkoodri plaadi puhul, peab kuidagi looma ühenduse põhitrükkplaadi ja jooneanduri vahel – otsustati jällegi ribakaabli kasuks. Otsustamise koht oli ka, et mis jääb joonesensori väljundiks: kas joonesensoril peaks juba kollektorite väljundid muutma digitaalsignaalliks kasutades näiteks eraldi ADC kiipi, millelt saaks lugeda suhtlusprotokolliga tulemusi või jätma konversioon põhiplaadile ehk joonesensori väljunditeks jäävadki analoogsignaalid. Pärast mõningast kaalumist, otsustati jätta joonesensori väljundid analoogsignaalideks, kuna tol hetkel ei olnud veel kindel, millist mikrokontrollerit kasutatakse ja kas ADC-d teeb mikrokontroller või eraldi kiip. Joonesensori trükiplaat tehti neljakihiline: esimene ja viimane kiht on signaalikiht koos komponentidega ning kaks sisemist kihti on maandused. Trükiplaadi peamisi kihte võib näha Jooniselt 18 ning elektriskeemi ja kõiki kihte peatükist Lisa 8. Joonesensori toitepingeks on 3.3 V.



Joonis 18: Joonesensori trükkplaat (üleväl 2D ülaltvaade; keskel 2D altvaade; all 3D altvaade trükkplaadile).

4.3 Põhiplaat

Pärast enkoodri ja joonesensori trükkplaadi disainimist (peatükid 4.1 ja 4.2), alustati põhiplaadi projekteerimisega. Enne projekteerimist aga valiti välja enamus komponente, mis tooksid edasiste alamsüsteemide (toide, mootorite juhtimine, vajalikud signaalid põhimikrokontrollerist jne) disainimisse rohkem selgust. Kõigepealt vaadati üle roboti plokkskeem (Joonis 19), kuna nüüd olid juba mõningad komponendid paika pandud, mille parameetrid aitavad valida põhiplaadi komponente. Plokkskeemist võib näha, et veomootoriteks on NSR3023 ja turbiiniks on QF1611-6000KV, mida peab juhtima RC-PWM-iga (*Remote Control Pulse Width Modulation*). Tegemist on PWM signaaliga, kus pulsilaius jääb 1-2 ms vahemikku ja periood on 20 ms. Plokkskeemis on veel paigas enkoodrid (AS5047U), mis suhtleb SPI abil põhimikrokontrolleriga. Lisaks on enkoodri väljundiks ABI signaal. Joonesensor väljastab analoogsignaale, kuid veel ei olnud otsustatud, kas analoog-digitaal muundamist teeb eraldi ADC kiip või mikrokontroller ise.



Joonis 19: Roboti elektroonika plokkskeemi seis pärast lisaplaatide projekteerimist ja elektromehaaniliste komponentide väljavalimist.

4.3.1 Veomootorite draiver

Jooniselt 8 võib näha, et mootori maksimaalseks voolutarbeks on 5.1 A, kuid nagu sai tulemustes (peatükk 3.1) tõdetud, siis testimise ajal tõusis mootorite temperatuur märkimisväärselt (Joonis 6), mis omakorda vähendab maksimaalset voolutarvet: temperatuuri kasvades mootori/vase takistus tõuseb [78]. Seega tuleks tegelikult igaks juhuks arvestada kõrgema voolutarvega kui 5.1 A, eriti oluline oleks hetkeline (*peak*) voolutarve. Varuga võttes võiks mootori draiveri pidev vooluväljund olla 8-10 A ja hetkeline vooluväljund üle 10 A. Vastavalt toitepingele, peab draiver töötama 12.6 V

juures. Otsiti selliseid mootori draivereid, millel oleks vähemalt üks täielik H-sild (*full H-bridge*) juba kiipi sisse ehitatud ehk ei oleks vaja kasutada eraldi transistore/MOSFET-e või mitut kiipi ühe mootori juhtimiseks. Potentsiaalsed draiverid võib leida Tabelist 8. Põhinedes voolutarvetele valiti draiveriks DRV8243-Q1 – antud kiibis on üks täielik H-sild, seega on vaja kahte eraldi kiipi mootorite juhtimiseks (üks ühele mootorile, teine teisele mootorile). Draiver töötab küll akupinge pealt, kuid ühendub läbi SPI ja GPIO viikude (*pin*) mikrokontrolleriga: SPI ja GPIO viigud on 3.3 V ja 5 V ühildatavad [81].

Tabel 8: Potentsiaalsete mootori draiverite võrdlus.

Draiver	Tootja	Toitepinge [V]	Pidev voolu-väljund [A]	Hetkeline voolu-väljund [A]	Juhtimisvõimalused	Suhtlusmeetodid
DRV8873 [80]	TI	4.5-38	8	10	PWM (IN/IN, PH/EN); SPI	SPI, GPIO
PWD13F60 [84]	ST	6.5-600	8	32	PWM (IN/IN)	GPIO
DRV8243 [81]	TI	4.5-35	12	24	PWM (IN/IN, PH/EN); SPI	SPI, GPIO
DRV8244 [82]	TI	4.5-35	21	40	PWM (IN/IN, PH/EN); SPI	SPI, GPIO

4.3.2 Inertsiaalandur

Inertsiaalandurit (IMU) kasutatakse roboti kiiruse ja ka suuna määramiseks. See võib olla kasulik nii roboti juhtimisel kui ka rajaoptimeerimise algoritmis. IMU on võimalik kasutada koos enkoodritega, mis annab rohkem andmepunkte raja kaardistamiseks ja ka roboti positsioneerimiseks rajal. Inertsiaalandurite kohapealt otsesest võrdlust ei tehtud, vaid autor otsustas valida sellise inertsiaalanduri, mis on Robotiklubis varasemast ajast laialdaselt kasutusel olnud, kuna siis on teada, et tegemist on kindlasti toimiva lahendusega. Robotiklubis on olnud kasutusel peamiselt kolm erinevat IMU: MPU6050 [85], ICM-42670-P [86] ja BNO086 [87]. MPU6050 ja ICM-42670-P kuueteljelised inertsiaalandurid ehk nendel on güroskoop ja kiirendusandur (ICM-42670-P on tegelikult MPU6050 edasi arendus). BNO086 aga on üheksateljeline inertsiaalandur ehk güroskoop, kiirendusandur ja magnetomeeter ühes. MPU6050 tootja tegelikult ei soovita enam seda uutest disainides kasutada, mille tõttu otsustas autor selle välja jätta.

Autor otsustas lõpuks BNO086 kasuks, kuna see on üheksateljeline ja sellel tehakse ka osa signaalitööstusest kiibi peal juba ära, mis teeb IMU implementeerimise lihtsamaks (MotionEngine tarkvara) [87]. BNO086 lubab kasutada kolme kommunikatsiooniprotokolli: UART, I2C ja SPI [87]. Kuna aga nii mootori draiver kui ka enkooder kasutab kommunikatsiooniks SPI protokollit, siis otsustati ka BNO086 puhul kasutada SPI-d. BNO086 toitepingeks on 1.7-3.6 V [87].

4.3.3 Püsिमälu

Püsिमälu on vajalik rajaoptimeerimise algoritmi jaoks, täpsemalt raja kaardistamiseks. Otseselt ei ole robotil püsिमälu vaja, aga siis see tähendab seda, et nii pea, kui robotil vool ära kaob, peab robot uuesti raja kaardistama ja ka rada analüüsima/optimeerima. Kui aga robotil kasutada püsिमälu, mis salvestab andmed ka pärast voolu kadumist, siis saab robot salvestada kaardi püsिमällu ja see võimaldab robotil näiteks teha aku vahetust vms.

Peamiselt on tänapäeval levinud kolme tüüpi püsिमälu: EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), NOR välmälu (*flash*) ja NAND välmälu. EEPROM on mahult väike ja EEPROM-i kirjutamine on aeglane, kuid selle eest on võimalik mällu igat baiti kirjutada eraldi (tähendab mälusse ei pea kirjutama blokkide kaupa, vaid saab teha suvapöördmälule sarnaseid operatsioone). Lisaks on EEPROM-i lugemiskiirus üsna kiire: jääb 100 ns juurde. Välmälude eelis on suur mahtuvus, kuid nendel ei ole EEPROM-i paindlikkust: välmälusid peab lugema ja kirjutama blokkide kaupa ehk baidi kaupa lugemist ja kirjutamist teha ei saa. NOR välmälust on (suvapöördus)lugemine kiire, kuid kirjutamine väga aeglane: kirjutamise aegluse tagab NOR välmälu arhitektuur ja fakt, et kirjutamisel peab kõigepealt mälu (bloki) kustutama ja siis on võimalik mällu kirjutada. NAND välmälu on orienteeritud eelkõige suurele mahule. Andmete lugemine on NAND mäül kõigist kolmest kõige aeglasem, kuid tänu arhitektuurile on mällu kirjutamine kiirem kui NOR välmälul. Enne kirjutamist peab NAND mälu (bloki) kustutama, aga arhitektuuri erinevus NOR välmälust tagab kiirema kustutamise. NAND välmälu tasub ennast suurte andme mahtude puhul ära, kuna NOR välmälu on küll kiire suvapöörduslugemiste puhul, kuid suuremate andmemahtude (alates u 1 kB) lugemise korral suudab NAND paremini toime tulla. [88] [89] [90]

Ei olnud päris hästi teada, kui suurt mahtu oleks vaja raja salvestamiseks, mille pärast otsustati kalduda selle poole, et vaja on salvestada ennem rohkem andmeid kui vähem, mis muudab mäluahtuvuse oluliseks. Seega EEPROM tüüpi mälad jäeti valikust välja. NOR välmälul on küll eelis suvapöörduslugemisel, kuid kirjutamine on selle eest palju aeglasem kui NAND välmälul, seda eriti veel suuremate andmemahtude puhul. Nendel põhjustel otsustati robotil kasutada NAND välmälu. Tegelikult ei ole mälu tüüp väga oluline, kuna arvatavasti nagunii kogu rajaoptimeerimise töötus ja analüüs toimub mikrokontrolleri vahemälu – püsिमällu salvestatakse ainult vajalik info pärast töötlust, et roboti käivitamisel ei peaks uuesti rada läbima ja analüüsi tegema. Kui aga tõesti peaks tekkima selline olukord, et tervet rada ei ole võimalik mikrokontrolleri vahemällu salvestada, siis NAND välmälu peaks olema piisavalt kiire, et rada tuua vahemällu püsिमälust osade/blokkide kaupa, kusjuures sellises olukorras ei jää arvatavasti pudelikaelaks mitte mälu enda latentsus, vaid kommunikatsiooniprotokolli baudi kiirus. Nende kriteeriumite põhjal leiti NAND välmälu Winbond W25N512GVEIGS, mille mahuks on 512 Mbit (64 MB) ja mis toetab QPI (*Quad SPI*) protokolli (SPI variant, kus ühe andmeliini asemel on neli paralleelset andmeliini), mis muudab andmevahetuse kiiremaks. W25N512GVEIGS toitepingeks on 2.7-3.3 V [91].

4.3.4 Raadiomoodul

Raadiomoodul on vajalik diagnostika andmete saatmiseks sõidu ajal, eriti tuleks diagnostika kasuks roboti tarkvara arendamisel. Disaini nõuetest tuleneb, et raadiomoodul võiks töötada mingil teisel sagedusel kui 2.4 GHz, kuna võistlustel ja muudel konverentsidel on tavaliselt 2.4 GHz üsnagi koormatud: avalikud Wi-Fi võrgud, Bluetooth jne. Muidugi võib valida mingi (suvalise) sageduse, mis oleks 2.4 GHz piisavalt kaugel, kuid rolli mängivad ka seadused [92] ning ka raadiomoodulite saadavus soovitud sagedusel. Seega on mõttekas valida sagedus, mis on vabalt kasutatav (ilma sagedusloata) ja millele tehakse raadiomoduleid, kuid suure tõenäosusega ei kasutata seda võistluslaval või kui kasutatakse, siis väga vähe (võib olla mõne üksiku võistleja poolt). Üheks selliseks sageduseks on 868 MHz. Eelkõige kasutavad 868 MHz LoRaWAN seadmed, kuid seda võib kasutada ka muudeks otstarbeteks [93] ja kuna 868 MHz on levinud sagedusloata sagedus [92] [93], siis tehakse ka sellel sagedusel töötavaid raadiomoduleid. Oli soov leida valmislahendusena raadiomoodul ehk ei oleks vaja disainida antenni ja muud elektroonikat, mis oleks vajalikud raadiomooduli

töötamiseks. Ideaalsel juhul võiks raadiomoduleid saada lihtsasti ühendada nii roboti kui ka arvutiga: üks raadiomoodul on roboti peal ja teine on ühendatud arvutiga – see võimaldaks tekitada raadioside roboti ja arvuti vahel, kus arvutist oleks võimalik näiteks läbi UART-i diagnostikat lugeda. Pärast mõningast otsimist leiti Digi Xbee XR 868 (XB-8XR-DMST-101) [94] moodul, mida on lihtne robotil implementeerida ja läbi adapterplaadi [95] hõlpsasti arvutiga ühendada. Tegemist on valmislahendusega, kus roboti mikrokontroller saab edastada andmed raadiomoodulile UART-iga või ka SPI-ga [94] ja arvutiga ühendatud raadiomoodul võtab andmed vastu ja edastab need omakorda läbi adapterplaadi arvutisse (muidugi võib raadioühendus toimuda ka vastupidi, et arvutist saadetakse näiteks käsklusi robotile). Digi Xbee XR 868 toitepingeks on 2.1-3.6 V ja raadiolingi edastuskiiruseks 80 kb/s [94] .

4.3.5 Lisa mikrokontroller

Ei olnud teada, kui suurt arvutuslikku võimsust on vaja, et rajaoptimeerimise algoritmi robotil realiseerida. Seega otsustati robotile lisada teine mikrokontroller. Tegemist ei pea olema väga suure ja võimeka mikroprotsessoriga: selle eesmärk on aidata põhimikrokontrollerit arvutuslikult mahukate operatsioonide korral (kui neid üldse on). Antud põhjusel ei ühendata lisamikrokontrollerit ka muu perifeeriaseadmetega (sensorid, draiverid jne) – nii saab põhimikrokontroller perifeeriaseadmete väljundid kätte otse ilma lisalatentsuseta. Lisamikrokontrollerit otsustati otsida Espressif toodangust, kuna kui juba teine mikrokontroller lisada, siis see võiks pakkuda mingit lisa funktsionaalsust ja enamikel Espressif mikrokontrolleri moodulitel on sisse ehitatud Wi-Fi ja Bluetoothi võimekus. Seega oleks soovi korral robotil võimalik tekitada andmevahetus ka 2.4 GHz sagedusel. Pärast mõningast kaalumist ja võrdlemist (Tabel 9), otsustati ESP32-C6-MINI-1 kasuks, kuna see toetab nii Wi-Fi, Bluetooth kui ka Zigbee kommunikatsiooniprotokolle; on pindalalt kompaktne ning on süsteemi näitajate poolest päris võimekas: taktsagedus 160 MHz, DMA võimalus, 512 kB SRAM ja 8 MB välmälu [100] .

Tabel 9: Erinevate Espressif Systemsi mikrokontrollerite võrdlustabel.

Mikrokontroller	Wi-Fi	BL(E)	Zigbee	Takts. [MHz]	Välkmälu [MB]	RAM [kB]	ROM [kB]	Pindala [mm ²]
ESP8684-WROOM-07 [96]	Jah	Jah	Ei	120	4	272	576	107.95
ESP32-PICO-MINI-02 [98]	Jah	Jah	Ei	240	8	520	448	219.12
ESP32-C3-MINI-1 [99]	Jah	Jah	Ei	160	4	400	384	219.12
ESP32-C6-MINI-1 [100]	Jah	Jah	Jah	160	8	512	320	219.12

4.3.6 Puldi vastuvõtja ja ekraan

Robotexi reeglites [6] on kirjas, et „robotit peab olema võimalik käima panna ning peatada puldiga”, kuid ei ole täpsustatud, mis kvalifitseerub puldi alla. Kas näiteks eraldi trükkplaat, millel on nupp ja raadiomoodul, kus läbi raadioside edastatakse robotile käsklus käivitada/peatuda kvalifitseerub puldina? Kuigi selline lahendus oleks täiesti mõeldav, kuna raadioside võimekus on robotile planeeritud, siis otsustati, et eraldi erilahendusega trükkplaati ei hakata puldi funktsionaalsuse jaoks disainima. Muidugi oleks võimalik kasutada raadiomoodulit, mis on ühendatud arvutiga ja arvutist käivitamis/peatumiskäsklusi läbi raadioside edastada, kuid arvatavasti see ei kvalifitseeruks puldi alla. Seega otsustati robotile lisada infrapuna puldi vastuvõtja ehk oleks võimalik kasutada mingit teleka/DVD mängija pulti roboti käivitamiseks ja peatamiseks. Kui peaks juhtuma, et võistlustel ei peaks IR pult töötama (võistlustel on palju infrapuna müra, nagu ka Robotexi reeglid [6] hoiatavad), siis tagavara variandina saab kasutada raadiosidet läbi arvuti. Infrapuna vastuvõtjaks valiti TSOP75438 [102], mille toitepingeks on 2-5.5 V.

Ekraan oli mõeldud eelkõige roboti lihtsamaks käsitlemiseks ehk tegemist ei ole süsteemi kriitilise komponendiga. Otsiti ekraani, mis oleks väike (ei võtaks palju ruumi trükkplaadi peal) ja mida oleks võimalik trükkplaadi pealt ära võtta ehk ühenduks trükkplaadile läbi kaabli, eelistavalt läbi ribakaabli. Pärast mõningast otsimist leiti EA W096016-XBLW [103], mis on 0.84” OLED resolutsiooniga 96x16, mida on võimalik

konfigureerida läbi SPI ja millel on ribakaabel. Toitepingeks ekraanil on 2.8-3.3 V [103].

4.3.7 Toide: pingeregulaatorid ja aku

Toitesüsteemi komponendid valiti välja ja toitesüsteem ise projekteeriti enne põhimikrokontrolleri välja valimist. Tegelikult põhimikrokontroller lisati roboti disaini kõige viimasena, kuna siis oli selge, millised signaalid mikrokontrolleriga peavad ühenduma ning selle põhjal oli võimalik MCU välja valida. Toitesüsteemi komponentide välja selgitamiseks on kõigepealt vaja teada saada, kui palju voolu süsteem tarbib: süsteemi voolutarve saab kõikide komponentide voolutarbe kokku liitmisel. Kasutusel aga on erinevad pinged: 12.6 V elektromehaanika/jõuelektronika komponentide jaoks ja 3.3 V perifeeriakomponentide jaoks – seega on mõistlik arvutada välja süsteemi võimsus ja sellest tuletada lõplik süsteemi voolutarve (Tabel 10). Voolutarbe välja selgitamisel on alati mõistlik arvestada komponentide maksimaalse voolutarbega või isegi võtta need varuga, kuna siis on kindel, et toitesüsteem suudab kõik komponendid ära toita. Jooneseensoril üks peegeldusandur võtab 21 mA pingel 3.3 V – kokku on joonesensori peal peegeldusandureid 20, seega on joonesensori voolutarbeks $21 \cdot 20 = 420$ (mA) pingel 3.3 V. Kuigi põhimikrokontrollerit ei olnud välja valitud, siis arvestati selle maksimaalseks voolutarbeks 1 A pingel 3.3 V. Lisaks arvestati muude väiksemate komponentide voolutarbeks 500 mA pingel 3.3 V, mida potentsiaalselt soovitakse disaini lisada: näiteks LEDid, pingejagurid jne.

Tabel 10: Süsteemi voolutarve ja koguvõimsus erinevate pingete juures.

Komponent	Kogus	Kategooria	Toitepinge U [V]	Max voolutarve I [A]	Koguvõimsus P [W]
AS5047U [59]	2	Enkooder	3.3	0.032	0.106
JoonusSensor (QRE1113GR [73])	1 (20)	Jooneseensor	3.3	0.420	1.386
BNO086 [87]	1	IMU	3.3	0.014	0.047
W25N512GVEI GS	1	Välkmälu	3.3	0.035	0.116
XB-8XR-DMST-101 [94]	1	Raadio	3.3	0.102	0.337
ESP32-C6-MINI-1 [100]	1	MCU	3.3	0.382	1.261

Komponent	Kogus	Kategooria	Toitepinge U [V]	Max voolu- tarve I [A]	Koguvõimsus P [W]
TSOP75438 [102]	1	IR vastuvõtja	3.3	0.003	0.010
EA W096016- XBLW [103]	1	Ekraan	3.3	0.025	0.083
Põhi MCU	1	MCU	3.3	1.000	3.300
Varu	-	Varia	3.3	0.500	1.650
3.3 V KOKKU				2.513	8.294
DRV8243 [81]	2	Veomootor	12.6	24.000	302.400
QF1611- 6000KV [44]	1	Turbiin	12.6	10.000	126.000
12.6 V KOKKU				34.000	428.400
SÜSTEEM KOKKU				$\frac{436.694}{12.6} = 34.658$	436.694

Voolutarve võib tunduda küll suur, kuid siin tuleb arvestada, et kõikide süsteemi komponentide puhul on võetud nende maksimaalne voolutarve koos varuga. Arvatavasti näiteks mootorid ei jookse pidevalt maksimaalse voolutarbega (*stall current*), kusjuures Tabelis 10 on arvestatud mootori draiveri DRV8243 pideva maksimaalse väljundiga. Hinnanguliselt jääb ühe veomootori voolutarve alla 5 A, keskelt läbi võib olla 3 A juurde. Sama ka turbiini puhul – arvatavasti jääb selle voolutarve 5 A juurde. Suure tõenäosusega ka 3.3 V toiteliin ei ole maksimaalselt koguaeg koormatud, seega võiks ka selle koormuse võtta $3.3 \cdot 2 = 6.6$ (W), mis 12.6 V juures annab voolutarbeks 0.5 A. Seega võib süsteemi voolutarve jääda konstantselt kuskile $2 \cdot 3 + 5 + 0.5 = 11.5$ (A) juurde. Sellegipoolest, kui disainida toitesüsteem, mis suudab (teoreetiliselt) Tabelis 10 väljatoodud maksimaalsete/hetkeliste voolutarvete ja võimsustega toime tulla, siis on kindel, et see ka töötab.

Tabelist 10 selgub, et süsteem kasutab kahte pinget: 3.3 V ja 12.6 V ehk aku pinget. Aku tühjenemisel aku pinge langeb, kuid nii veomootorid kui ka turbiin jätkavad töötamist madalamatel pingetel: praktiliselt aku täieliku tühjenemiseni 9 V juures, seda muidugi väiksema efektiivsusega. Seega nii turbiini kui ka veomootoreid saab toita akust otse. Küll aga 3.3 V peal töötavad seadmeid otse akust toita ei saa ja lisaks sellele ei tohiks aku tühjenemine mõjutada 3.3 V toiteliini. Osad komponendid on veel sellised

(näiteks MCU-d, raadiomoodul, IMU), mis eeldavad üsnagi müravaba toiteliini – tähendab toitepinge peaks olema võimalikult konstantne, vastasel juhul võib toitemüra mõjutada nende toimimist. Järelikult on vaja akupinge teha/muuta 3.3 V. Seda on võimalik saavutada läbi pingeregulaatorite.

Pingeregulaatoreid on suures plaanis kahte tüüpi: lineaarregulaatorid (*linear regulators*) ja impulssregulaatorid (*switching regulators*). Need jagunevad veel omakorda erinevateks tüüpideks ja topoloogiadeks, kuid töö kohapealt on oluline just need kaks kategooriat. Impulssregulaatorid on palju efektiivsemad kui lineaarregulaatorid: sõltuvalt pingetest ja topoloogiast on impulssregulaatorite efektiivsus 80-95%, samal ajal kui lineaarregulaatorite efektiivsus jääb tavaliselt 50% juurde. Lineaarregulaatorite väljund aga on palju kvaliteetsem kui impulssregulaatorite väljund. Need erinevused tulenevad nende regulaatorite ülesehitusest: impulssregulaatoritel käib reguleerimine läbi (kõrge sageduse) lülitamise, kus väljundpinget reguleeritakse sisse-välja lülitamisega. See tagab kõrge efektiivsuse, kuid lülitamine tekitab väljundile müra. Lineaarregulaatorid aga kasutavad transistori (*pass transistor*), et väljundpinget reguleerida. See tagab puhta signaali, kuid transistor peab kogu lisaenergia enda peale võtma ja see energia muudetakse lihtsalt soojuseks ehk efektiivsus on madal. [88] [104]

Seega pinge 12.6 V muutmine 3.3 V pingeks, mis oleks müravaba, nõuaks lineaarregulaatorit, aga see on väga ebaefektiivne. Vastavalt lineaarregulaatori efektiivsuse valemile [105] oleks sellisel juhul regulaatori efektiivsus ainult $\frac{U_v}{U_s} = \frac{3.3}{12.6} = 26\%$. Teine võimalus on kasutada impulssregulaatorit, aga see tekitaks müra. Kolmas võimalus aga oleks kasutada mõlemat koos. Nimelt saaks impulssregulaatoriga tekitada 12.6 V pingest 5 V pinge ja siis omakorda 5 V pingest lineaarregulaatoriga 3.3 V pinge. See tagaks palju efektiivsema ja samal ajal müravaba 3.3 V pinge tekitamise. Lineaarregulaatori efektiivsus oleks sellisel juhul $\frac{U_v}{U_s} = \frac{3.3}{5} = 66\%$. Tavaliselt lineaarregulaatorid nõuavad üsna kõrget sisendpinget võrreldes väljundpingega, kuid kui kasutada LDO (*low-dropout*) tüüpi lineaarregulaatorit, siis saab edukalt 5 V reguleerida 3.3 V. Järelikult oleks vaja leida:

- 1) impulssregulaator, mille sisendpinge oleks aku vahemikus (9.6-12.6 V) ja mille väljundvool oleks Tabeli 10 põhjal vähemalt $I = \frac{P_{3V3}}{U} = \frac{8.294}{5} \approx 1.66$ (A);
- 2) lineaarregulaator (LDO), mille sisendpinge oleks 5 V ja väljundvool suurem kui 2.5 A.

Leiti MPM3630 [106] impulsspingeregulaator, mille sisendpinge on 4.5-18 V ja konstantseks väljundvooluks on 3 A. Lisaks sellele on MPM3630 induktor integreeritud kiibi sisse, mis teeb selle üsnagi kompaktses. Lineaarregulaatoriks leiti LMS1587 [107], millel on fikseeritud väljundpinge 3.3 V ja väljundvooluks on 3 A. Selle minimaalseks sisendpingeks on 4.75 V.

Aku sooviti võtta võimalikult väike, et mitte lisada robotile üleliigset massi. Väikesete akude puhul on nende mahtuvus muidugi ka väike. Robotexi reeglites [6] on kirjas, et maksimaalne raja läbimise aeg on 2 minutit. Seega aku võiks vastu pidada 2 minutit (see muidugi tähendab, et praktiliselt iga katse jaoks on vaja täislaetud akut). Aku kestvust saab välja arvutada järgmise valemiga [104]:

$$t[\text{h}] = \frac{m[\text{Ah}]}{I[\text{A}]} \quad (6)$$

Siinkohal otsustati kasutada roboti konstantse voolutarve hinnangut (11.5 A), kuna ei ole realistlik, et süsteem töötab koguaeg Tabelis 10 väljatoodud maksimaalse koormusega. Avaldades Valemist (6) mahtuvuse m , saab välja arvutada (minimaalse) aku mahtuvuse: $m = t \cdot I = \frac{2}{60} \cdot 11.5 \approx 0.383$ (Ah). Arvutus aga eeldab ideaalseid tingimusi/ei arvesta kadudega (aku sisetakistus, temperatuur jne). Seega on mõistlik sisse arvestada väikene varu – näiteks võttes kadudeks 20%, tuleb aku mahtuvuseks $\frac{0.383}{(1-0.2)} \approx 0.479$ (Ah). Akuks valiti CNHL MiniStar 450 mAh 3S 70C [108] aku, kuna selle mahtuvus on ligilähedane välja arvutatud mahtuvusele ja selle mass on väike: 49 g. Kui tõesti peaks juhtuma, et konstantne voolutarve on hinnangust (palju) suurem ja aku tühjeneb liiga kiiresti, siis saab ühendada mitu akut paralleelselt.

4.3.8 Toide: lülitusahel ja polaarsuskaitse

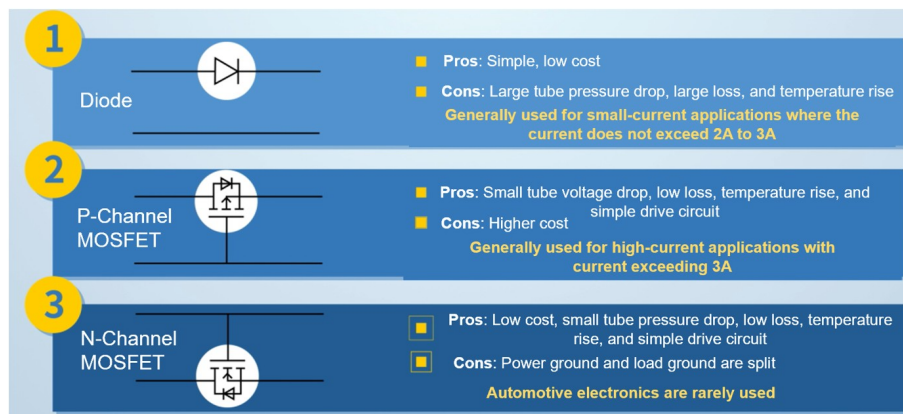
Kõige lihtsam lahendus lülitamiseks on kasutada tavalist lülitit ja kõige lihtsam lahendus polaarsuskaitseks on kasutada toiteliiniga järjestikku olevat diodi (Joonis 20)

[104] . Sellise lahenduse probleemiks aga on ebaefektiivsus: sõltuvalt kasutatavast diodist on diodil tekkiv pingelang 0.3-1 V [104] . See tähendab, et toitepinge on juba 0.3-1 V võrra väiksem diodi kasutamise tõttu. Lisaks on robotil ka voolutarve üsnagi suur – eeldatud konstantne voolutarve on 11.5 A ja maksimaalne voolutarve on 34.658 A (peatükk 4.3.7). Kui võtta aluseks konstantne voolutarve ja optimistlikult diodi pingelanguks 0.3 V, siis diod peab suutma hakkama saama $11.5 \cdot 0.3 = 3.45$ (W) hajutamise (dissipation), mis tähendab, et selline diod peab olema mõõtmetelt suur. Lisaks mängib rolli ka lüliti enda takistus (contact resistance), mis küll sõltub spetsiifilisest lülitist, kuid tavaliselt jääb see kümnete millioomide juurde [109] . Võttes näiteks lüliti takistuseks 10 mΩ [110] , siis tekib lülilil juba konstantse voolutarbe juures pingelang $11.5 \cdot 0.010 = 0.115$ (V). Seega juba toitesüsteemist endast tekib tervele ülejäänud süsteemile potentsiaalselt 0.4-1.1 V pingelang. Kuna aku sai valitud nii, et praktiliselt pärast 2 minutist sõitu ehk ühte katset tuleb iga kord akut vahetada täislaetud aku vastu, siis oleks soov ikkagi võimalikult efektiivselt akut kasutada.

Alternatiivselt on polaarsuskaitset võimalik teha läbi MOSFET-ide (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Nimelt saab kasutada P-kanaliga MOSFET-i toiteliinil nii, et neel (drain) on ühendatud akuga, läte (source) on ühendatud koormusega ja pais (gate) on läbi takisti ühendatud maandusega (Joonis 20). P-kanaliga MOSFET lülitub sisse, kui paisu-lätte vahel on paisu poolt vaadates negatiivne pinge. Seda fakti saab polaarsuskaitse disianimisel ära kasutada. Kui aku ühendada õigesti, siis MOSFET-i paisu-lätte vahele tekib negatiivne pinge (pais on ühendatud maandusega) ning MOSFET lülitub sisse. Lülitatav pinge/akupinge peab olema suurem kui MOSFET-i sisse lülitamiseks vajalik lävipinge (threshold voltage). Kui aga aku ühendada valesti, siis pais ja läte on samal pingepotentsiaalil, seega MOSFET ei lülitu sisse. [104] [111] [112]

MOSFET-id on palju efektiivsemad, kui diodid [111] : MOSFET-ide efektiivsust tähistab neelu-lätte takistuse parameeter $R_{DS(ON)}$ (ehk sisselülitatud MOSFET-i saab selle parameetri abil vaadata kui järjestikku takistust), mis sõltuvalt MOSFET-ist on kas millioomides või kümnetes millioomides [88] . Näiteks võttes aluseks päris P-kanaliga MOSFET-i NTTFS008P03P8Z [113] , mille maksimaalne neelu-lätte takistus on 3.8 mΩ, saab arvutada, et pingelang 11.5 A juures on $11.5 \cdot \frac{3.8}{1000} = 0.0437$ (V) = 43.7 (mV).

Lüliti asemel oleks võimalik kasutada veel ühte P-kanaliga MOSFET-i lülitamiseks (väiksem lüliti lülitab MOSFET-i, mis omakorda lülitab toidet) [113], mis toob terveks pingelanguks 11.5 A juures 87.4 mV (kaks MOSFET-i järjestikku). Küll aga saaks efektiivsust tõsta, kui kasutada P-kanaliga MOSFET-ide asemel N-kanaliga MOSFET-e: nende neelu-lätte takistus on 2-3 korda väiksem võrreldes sama suure N-kanali MOSFET-iga [112]. Lisaks ei paku eelkirjeldatud P-kanali MOSFET-iga polaarsuskaitse päriselt kaitset tagasivoolu eest: müra ja polaarsuse vahetamisel kondensaatorite laengud võivad tagasivoolu tekitada [111] [114] (kondensaatorite tõttu tekitatud tagasivool ei tohiks disainitaval robotil aga probleem olla, kuna see saab juhtuda ainult siis, kui aku suudetakse valesti ühendada nii kiiresti, et kondensaatorid ei ole ennast tühjaks laadinud). Kuigi N-kanaliga MOSFET-e saab sarnase konfiguratsioonis kasutada nagu P-kanaliga MOSFET-e, aga ainult maanduse pool (ehk pais ühendub toiteliiniga, läte koormuse maanduse ja neel toiteliini maandusega), aga seda tavaliselt ei tehta, kuna see lülitab maandust [111]: kuigi N-kanaliga MOSFET-id on üsna efektiivsed, siis siiski mingi pingelang nendele jääb ehk praktiliset juhtub selline olukord, kus maandus süsteemi komponentidele ei ole enam päriselt 0 V – jõuelektroonikale see tavaliselt probleem ei ole, aga sensorid, MCU ja muu madalamal pingel töötav elektroonika eeldab otseühendust maandusega [114].



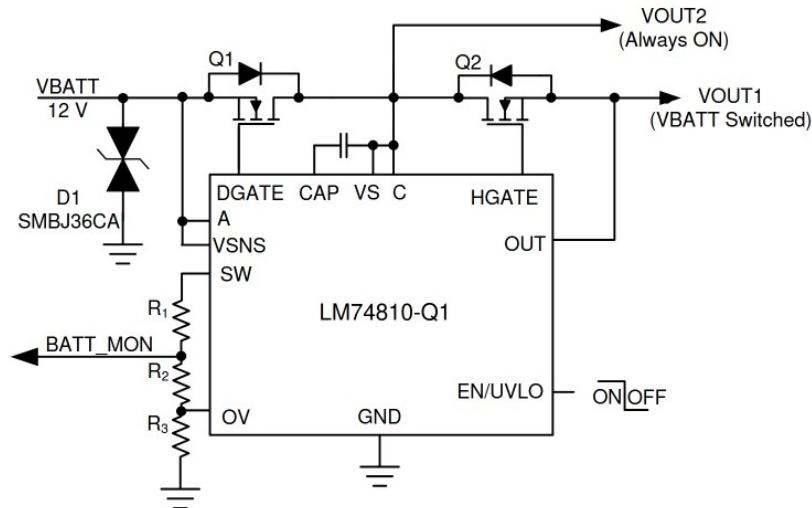
Joonis 20: Võrdlus erinevate polaarsuskaitse skeemide vahel. [111]

N-kanaliga MOSFET-ide probleemiks on see, et neid ei saa otse kasutada toiteliinide (*high-side*) lülititena (nii, et sama toitepinge lülitab ka MOSFET-i sisse), kuna N-kanali MOSFET-i sisselülitamiseks peab paisu-lätte pingevahe olema positiivne [104]. Kui lülitatav pinge on seesama, mis ka MOSFET-i sisse lülitab, siis juhtub nii, et MOSFET lülitab ennast koguaeg sisse ja välja: alguses lülitub MOSFET sisse ja lättel pinge

tõuseb kuni paisu-lätte pingevahe on väiksem kui sisselülitamiseks vajalik lävipinge ja siis MOSFET lülitab ennast välja ja see protsess algab otsast pihta – tulemuseks on see, et toiteliinil on toitepingest madalam pinge ja lülitatud toiteliini väljundimpedants on suur. Küll aga on olemas erinevad skeemid, mis lubavad N-kanaliga MOSFET-e kasutada toiteliinide (*high-side*) lülitajatena – trikk on selles, et MOSFET-i pais peab olema lihtsalt kõrgema pingega kui lülitatav toiteliini pinge. Seda on võimalik teha läbi käivitusskeemide (*bootstrapping*) [88], kusjuures üsna levinud on käivitusskeemide kiibid – seega seda skeemi ei pea ise välja mõtlema, vaid saab kasutada juba valmis olevat kiipi. Lisaks, neid käivitusskeemide kiipe valmistatakse koos lisafunktsionaalsustega – üheks selliseks lisafunktsionaalsuseks on ideaalse diodi (*ideal diode*) lahendus.

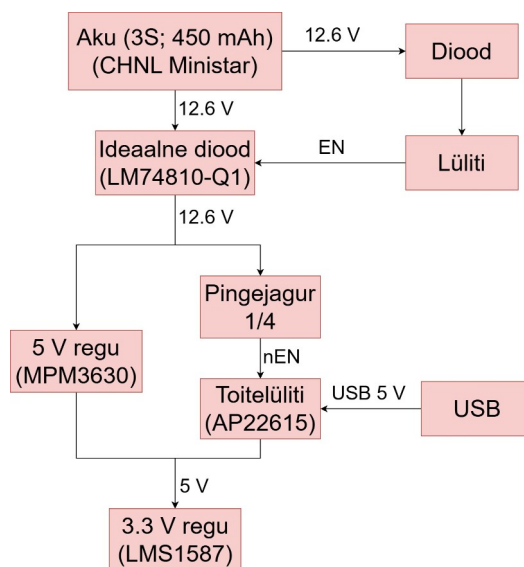
Ideaalse diodi lahenduse/juhtija eesmärk on jäljendada N-kanali MOSFET-iga ideaalset diodi ehk diodi, mille pingelang oleks 0 V ja mille tagasivool (*reverse current*) oleks 0 A. Päriselt muidugi ka ideaalse diodi lahenduses 0 V ja 0 A ei saavutata, kuid jõutakse lähedale (võrreldes näiteks päris diodidega). Siinkohal tuleb märkida, et ideaalse diodi juhtija ei suuda teha toiteliini lülitust, vaid see suudab ainult MOSFET-i välja lülitada negatiivse pingel puhul. Toiteliini lülituseks on vaja eraldi lahendust (kas siis tavalise lüliti kujul või teise MOSFET-i kujul kasutades näiteks käivitusskeeme), kuid valmistatakse ka selliseid kiipe, mis integreerivad ideaalse diodi ja toiteliini lülitamise ühte kiipi (Joonis 21): MOSFET-e on ikka vaja kahte, sest ainult üks ei suuda nii polaarsuskaitset kui ka lülitamist teha. [114]

Autor otsustaski sellise lahenduse kasuks, kuna see on kõige efektiivsem senistest analüüsitud lahendustest ja pakub ka tagasivoolu kaitset. Ideaalse diodi juhtijaks ja toiteliini lülitiks valiti LM7481-Q1 [115] ning MOSFET-ideks valiti IQE013N04LM6CGATMA1 [116]: selle MOSFET-i sisselülitatud neelu-lätte takistus on 1.35 mΩ, mis 11.5 A puhul teeb pingelanguks $11.5 \cdot \frac{1.35}{1000} \approx 0.0155 \text{ (V)} = 15.5 \text{ (mV)}$, seega kahe MOSFET-i puhul tuleb pingelang toiteliinile 31 mV. Väljavalitud MOSFET-i maksimaalselt neelu-lätte vooluks on 205 A – seega suudab see MOSFET ka kindlasti hakkama saada Tabelis 10 väljatoodud voolutarvetega.



Joonis 21: Näide ideaalse diodi lahendusest koos toiteliini lülitusega. [115]

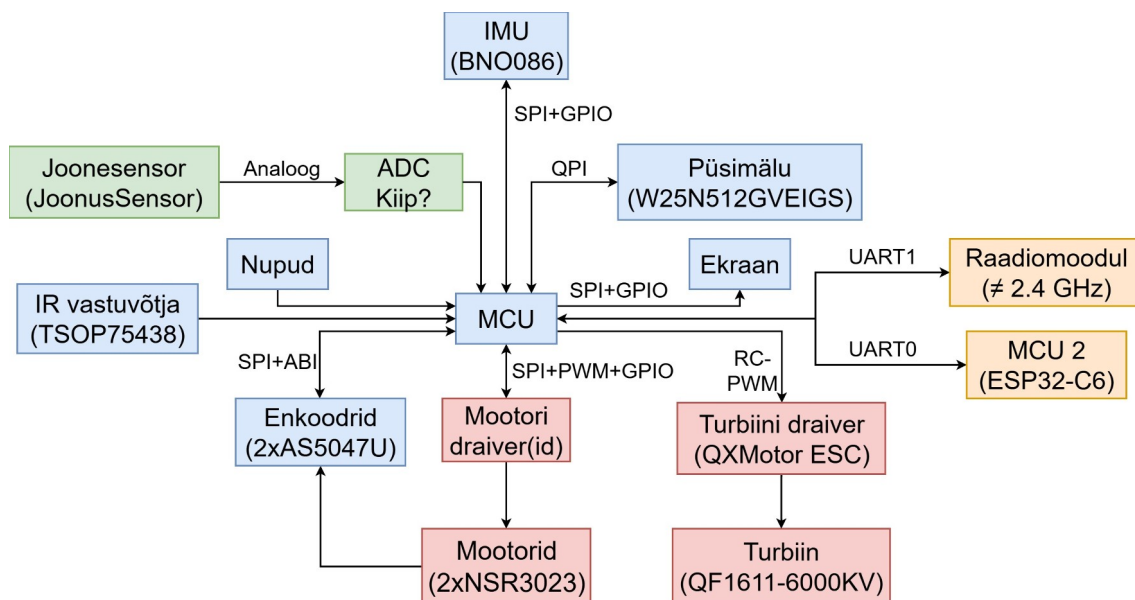
Toiteahelale tehti veel üks täiustus: otsustati, et läbi USB võiks toita 3.3 V süsteemi, kuid kui aku on järgi, tuleks 3.3 V toide ikkagi akust. Järelikult peaks USB 5 V minema samale toiteliinile, kus on roboti tavaline 5 V, et see reguleerida 3.3 V, aga ainult sellisel juhul, kui akut järgi ei ole. Otsustati kasutada valmis lahendust toitejaotus lüliti (*power distribution switch*) AP22615 [117] näol, kus aku toide ühendati läbi pingejaguri antud kiibi lubatud (*enable*) viiku: kui aku on järgi, siis USB 5 V ei jõua roboti 5 V liinile ja kui akut ei ole järgi, siis USB 5 V jõuab 5 V liinile. AP22615 lubab lisaks lülitamisele kontrollida ka väljundvoolu, mis teeb USB ühendamisel turvalisemaks nii robotile kui ka arvuti USB pordile. Lõplikku toiteahela plokkskeemi võib näha Jooniselt 22.



Joonis 22: Roboti toiteahela plokkskeem.

4.3.9 Põhimikrokontroller

Põhimikrokontroller valiti välja ja lisati disaini välja kõige viimasena, kuna siis oli teada kõik vajalikud signaalid, mis mikrokontrolleriga peavad ühenduma ja nende põhjal sai mikrokontrollerit välja valida. Kõiki 64 digitaalsignaali, mis põhimikrokontrolleriga vaja ühendada oli, siin töös välja ei tooda, kuid Jooniselt 23 võib saada struktuurse ülevaate tähtsamatest signaalidest. Enamik komponente kas ainult kasutasid või toetasid SPI suhtlusprotokolli – seega otsustati seda peamiselt robotil kasutada. Erandiks jäid IMU, mis kasutab QPI kommunikatsiooniprotokolli ning raadiomoodul ja lisamikrokontroller, mis otsustati viia eraldi UART liideste peale. Otsustamata oli veel ADC kiibi küsimus: kas ADC-d teeb põhimikrokontroller ise või teeb seda eraldi kiip/kiibid.



Joonis 23: Elektroonika plokkskeem põhimikrokontrolleri valimise hetkel.

Autor otsustas valida kahe mikrokontrolleri tootja vahel: kas ST (STM32 mikrokontrollerid) või Espressif Systems (ESP32 mikrokontrollerid), kuna nende kahe tootja toodangut kasutatakse peamiselt robotiklubis ja autoril on nendega olnud varasemast ajast kogemus. Espressif Systemsi kasuks on see asjaolu, et robotil on juba lisamikrokontroller ESP32 olemas. Kui valida põhimikrokontrolleriks ka ESP32, siis see hoiaks tarkvara arenduse ühtlasena. Probleemiks aga oli see, et Espressifil ei ole sellist mikrokontrollerit, kus oleks piisavalt väljundviike (*pin*), et kõik digitaalsignaalid ära mahutada ehk oleks vaja kasutada GPIO (*General Purpose Input Output*) laiendajaid ja ESP32 kohe kindlasti peaks kasutama eraldi ADC kiipi, kuna esiteks ühelgi Espressifi

mikrokontrolleril ei ole 20 ADC kanalit ja teiseks kõik viigud oleksid nagunii juba digitaalsignaali jaoks hõivatud. Töös üritati teha viikude paigutust ESP32-S3 [118] mikrokontrollerile, mis on üks suurema viikude arvuga ESP32. Espressifil tuli töö tegemise ajal küll välja ESP32-P4 [119], kus viikude arv on veel suurem kui ESP32-S3, kuid autor ei soovinud nii uut mikrokontrollerit kasutada, kuna võib juhtuda, et siis puudub arendamiseks vajalik dokumentatsioon või dokumentatsioon ei ole täielik. ST toodangust aga leiab mikrokontrollerid, kus on võimalik kõik signaalid hõlpsasti ära paigutada ilma, et oleks vaja GPIO laiendajaid, kusjuures leiaks isegi selliseid mikrokontrollereid, kus on lisaks digitaalsignaale ka võimalik kõik analoogsignaale ära ühendada ehk eraldi ADC kiipe ei ole STM32 puhul vaja.

Pärast mõningast kaalumist otsustati STM32 kasuks, kuna nähti, et GPIO laiendajate kasutamine muudaks disaini asjatult keerukaks. Lisaks ei oldud päris kindel, et kas ESP32-S3 tehtud viikude paigutust saaks päriselt ka GPIO laiendajatega ESP32-S3 peal kasutada, kuna kasutusse tõesti läksid kõik dokumentatsiooni järgi vabad viigud. Enne mikrokontrolleri välja valimist üritati aga selgeks teha, kas ikkagi tuleks kasutada eraldi ADC kiipe või piisab STM32 ADC-st endast. Selleks otsustati võrrelda erinevaid ADC kiipe ja erinevate STM32 mikrokontrollerite ADC parameetreid. Tegemist ei ole just kõige objektiivsema võrdlusega, kuna ilmselgelt kiip, mille ainus ülesanne on olla ADC, on analoog-digitaal muundamises väga hea ja lisaks on selliste kiipide omavahel ka piisavalt erinevusi, kuid välise kiibi pudelikaelaks arvatavasti jääb kommunikatsioon MCU ja kiibi vahel. Seega eelkõige pöörati tähelepanu kiirusele, kuna see on parameeter, mis tegelikult disainis loeb. Täpsus ei ole joonetuvastamisel kõige olulisem: tegemist on isegi pooldigitaalse signaaliga – kas joon on või ei ole. Kõik võrdluses olevad ADC kiibid on SAR (*Successive-Approximation*) arhitektuuriga, kuna STM32 ADC-d on ka SAR arhitektuuriga. STM32 mikrokontrolleritel saab tegelikult analoog-digitaal muundamisega konfigurereida. Võrdluses otsustati see võtta pool maksimaalselt võimalikust muundamisajast/ADC taktsagedusest, kuna STM32 puhul on analoogsingaalide sisendid enamasti multipleksitud. Tähendab, et kui näiteks STM32 on 5 ADC kanalit, siis tegelikkuses teeb muundamist üks ADC, mille vahel pidevalt vahetatakse/multipleksitakse neid 5 sisendkanalit ning tulenevalt SAR arhitektuurist, kus muundamises kasutatakse kondensaatoreid [88], peab need kondensaatoreid enne järgmise kanali lugemist ennast maha laadima (vastasel juhul ADC tulemused on

üksteisest mõjutatud). Arvatavasti aga oleks võimalik STM32 puhul kasutada lühemat muundamisaega, kui praegu arvestatud. Tabelis 11 on 20 kanali muundamisaeg, kuna joonesensoril on 20 väljundit. Lisaks, enamikul ADC kiipidel on muundamisajaks näidatud 0 μ s, kuna konversioon toimub suhtlusprotokolli taktsageduse järgi (ehk muundamine käib paralleelselt andmete edastamisega). Kõikidel ADC kiipidel kasutatakse kommunikatsiooniks SPI protokollid.

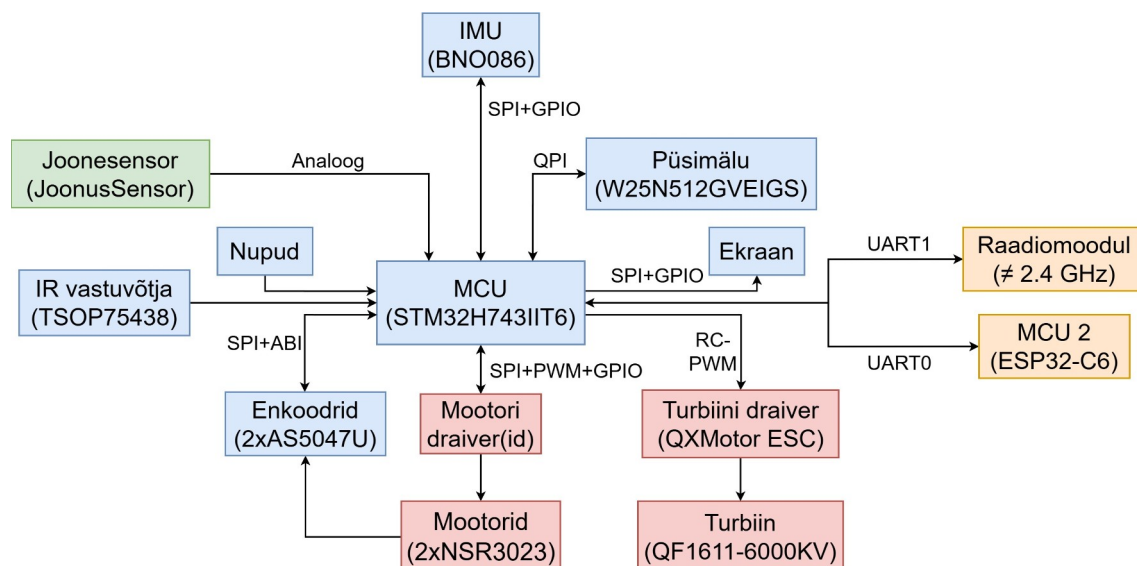
Võrdlusest (Tabel 11) võib näha, et ADC kiibid on ikkagi kiiremad, sõltumata sellest, et tulemuste kätte saamiseks on vaja kasutada suhtlusprotokolle. STM32 ADC muundamisaeg oli keskmiselt 68 μ s ja ADC kiipide aeg oli 24 μ s. Kuigi ADC kiibid olid kiiremad, otsustati ikkagi lõpuks kasutada mikrokontrolleri ADC-d joonesensori lugemisel, kuna STM32 mikrokontrolleerite ADC on (poole maksimaalse sageduse juures) piisavalt kiire, et joonesensorit edukalt lugeda ehk ADC kiipide lisakiirus ei tasu ennast siin ära.

Tabel 11: Erinevate STM32 mikrokontrolleerite ja ADC kiipide ADC muundamisajad.

MCU/ADC Kiip	Tootja	Diskreetimis-sagedus [MSps]	Muundamis-aeg [μ s]	Suhtlus-aeg [μ s]	Kogu aeg [μ s]
STM32F746BE [121]	ST	0.221	90.667	0.000	90.667
STM32H745XG [122]	ST	0.342	58.400	0.000	58.400
STM32G473QB [123]	ST	0.417	48.000	0.000	48.000
STM32L162QD [124]	ST	0.267	75.000	0.000	75.000
MAX11131 [125]	Analog Devices	3.000	0.000	13.440	13.440
ADS7038 [126]	TI	1.000	12.000	12.800	24.800
MAX11137 [127]	Analog Devices	0.500	0.000	42.000	42.000
BD79104FV-LA [128]	ROHM	0.500-1.000	0.000	0.000	16.000

Järgmisena otsustati välja valida põhimikrokontrolleer. Pärast mõningast uurimist, otsustati mikrokontrolleer valida välja STM32H7 seeriast, kuna nendel on piisavalt viike, et kõik vajalikud signaalid (kaasa arvatud analoogsignaaliid) ära paigutada ja need on

üsnagi võimekad mikrokontrollerid. Valiti need mikrokontrollerid, mis olid ühetuumalised, kuna disainis oli juba lisamikrokontroller (ESP32-C6), mis peaks põhimikrokontrollerit vajadusel toetama/mitmiklõimelisust pakkuma (*multithreading*). Kõikidel STM32H7 seeria [129] [130] võrdluses olevatel mikrokontrolleritel olid samasugused põhinäitajad: taktsagedus 480 MHz, välmälu 2 MB, RAM 1 MB, 20 ADC kanalit ja ADC taktsageduseks 50 MHz. Küll aga erines MCU-del väljundviikude arv. Ideaalis võiks viikude arv olla võimalikult väike, kuna seda lihtsam on sellist mikrokontrollerit joota. STM32H7436VIT6 (82 väljundviiku) jäeti välja, kuna seal märgati koheselt, et seal tekib viikude paigutuses probleeme. Prooviti viikude paigutust teha STM32H743ZIT6 (114 väljundviiku), kuid ka seal tekkis konflikte. Peaagu oleks STM32H743ZIT6 sobinud, aga ühe enkoodri ABI signaal oleks pidanud minema teisest enkoodrist madalama resolutsiooniga taimerile. Jäädi lõpuks STM32H743IIT6 juurde (140 väljundviiku). Roboti lõplikku elektroonika plokk skeemi võib näha Jooniselt 24. Nuppude kohapealt otsustati lisada kolm tavalist nuppu (eesmärgiga neid kasutada roboti käsitlemisel, näiteks ekraani kontrollimisel) ja kolm lähtestamisnuppu (*reset*): üks põhimikrokontrollerile, üks raadiokomponentidele (raadiomoodul ja ESP-C6) ja üks IMU-le ja ekraanile.

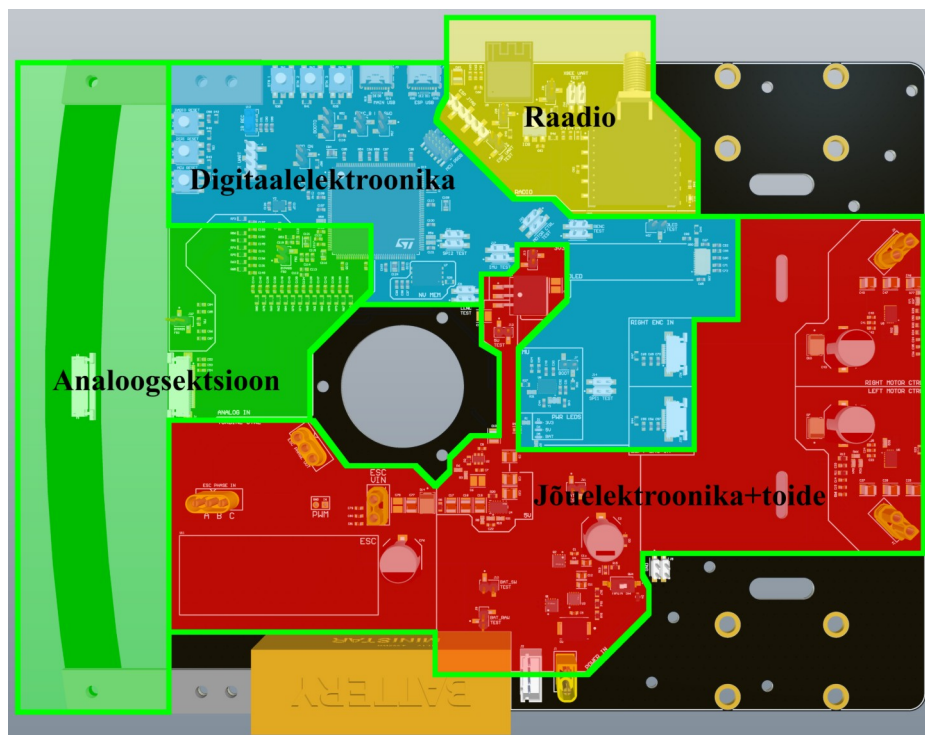


Joonis 24: Roboti elektroonika lõplik plokk skeem.

4.3.10 Trükkplaat

Pärast kõikide komponentide välja valimist ja nende skeemi lisamist, hakati põhiplaadi trükkplaati projekteerima. Põhiplaadi mehaaniline kuju oli juba varasemast paika

pandud (Joonis 14). Põhiplaadi trükkplaat tehti neljakihiline: välimised kihid (ülemine ja alumine) olid signaalikihid ja sisemised oli täielikult maandused (*ground plane*), et tagada signaaliradadele tagasitee. Kuigi signaali radu veeti mõlemal välimisel kihil, siis komponendid pandi ainult ülemisele kihile roboti madala kliirensi tõttu. Selleks, et veelgi vähendada müra tekkimise ohtu, jagati trükkplaat neljaks erinevaks osaks: analoogseksioon (joonesensor koos väljunditega); raadioseksioon (868 MHz raadiomoodul koos ESP-C6); digitaalseksioon (IMU, OLED jne) ja jõuelektronika seksioon (veomootorid, turbiinid ja nende draiverid). Neid seksioone üritati üksteisest võimalikult kaugemale paigutada (Joonis 25). Põhiplaadile üritati lisada võimalikult palju testpunkte (*probe points*). Põhiplaadi elektriskeemi ja kõiki kihte võib näha peatükist Lisa 9.



Joonis 25: Põhitrükkplaadi 3D ülaltvaade seksioonidega.

4.4 Peatüki kokkuvõte

Peatükis anti ülevaade roboti elektronikast. Kõigepealt põhjendati enkoodri kiibi valik ja siis tutvustati ka enkoodri trükkplaati (peatükk 4.1). Teisena tutvustati joonesensori disaini (peatükk 4.2) ja viimasena anti ülevaade põhiplaadi elektrilisest disainist koos komponentide põhjendustega (peatükk 4.3).

5 Roboti tarkvara kavand

Roboti tarkvara magistritöö käigus ei arendatud. Antud peatükis tuuakse välja ideed, milline võiks olla tarkvara, mis juhiks robotit. Kogu juhtimissüsteemi aluseks oleks mõistlik võtta PID (*Proportional Integral Derivative*) juhtimine. PID juhtimine on üks enim levinud juhtimisloogikaid – tegemist on väga universaalse ja tõhusa juhtimismeetodiga, mida saab ka edukalt joonejärgijal kasutada. PID koosneb kolmest osast: proportsionaalne osa, mis arvestab hetke süsteemiviga; integraalne osa, mis arvestab mineviku viga ja tuletuslik osa, mis arvestab/ennustab tuleviku viga. [131] Matemaatiliselt saab PID juhtimisloogikat avaldada [131] järgnevalt:

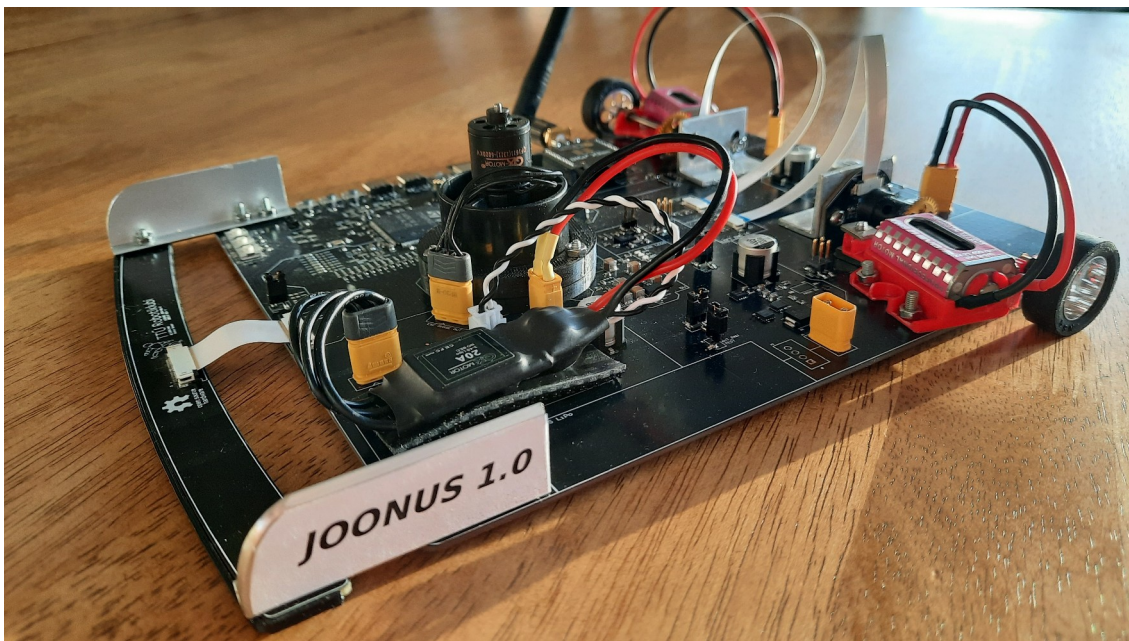
$$u = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} \quad (7)$$

Valemis olev u on juhtsignaal, mida saab kasutada süsteemivea vähendamiseks: joonejärgimisel näiteks saab juhtsignaali rakendada mootoritele, et robot järgiks korrektselt joont. Kordajad k_p , k_i ja k_d on konstandid, mis tuleb juhtsüsteemi korrektseks toimimiseks paika panna. Kogu juhtimine toimub süsteemivea alusel – seega on vaja süsteemiviga kuidagi defineerida/välja arvutada. Joonejärgimisel on kõige esmasemaks süsteemiveaks roboti kõrvalekaldumine joonest. Kõrvalekaldumist joonest saab välja arvutada joonesensori väljundist. Kõige lihtsam oleks kõrvalekaldumist hinnata vaadates üksikuid peegeldusandureid (näiteks omistades igale peegeldusandurile kindla kaalu/vea). Selline veaarvestus on rohkem diskreetset tüüpi, mida võib olla keeruline PID süsteemis kasutada. Küll aga saaks näiteks hinnata joonesensoriga kõrvalekallet joonest kas pikkuses – joonesensoril on teada iga peegeldusanduri asukoht ja vajadusel saab hinnata ka joone asukohta kahe joonesensori vahel – või näiteks kraadides. Nurga hindamisel aitab just joonesensori kumerus. Pikkuste ja kraadide hindamine on võrreldes kaalusüsteemiga vähem diskreetsem ja sobib PID süsteemi paremini. Joonesensori järgi sõitmisel võib veel abi olla enkoodridest, mis suudavad täpselt anda mõlema ratta pöörlemiskiiruse ning ka inertsiaalandurist, mis võib aidata määrata roboti pöördenurka.

Keerulisem ülesanne oleks kindlasti raja optimeerimine. See võiks koosneda kolmest sammust: esiteks tuleb rada kaardistada; teiseks peab robot kaardistatud rada optimeerima ja viimasena peab robot edukalt raja läbima kasutades teises sammus tehtud optimeerimisi. Need sammud nõuavad kindlasti nii joonesensori, enkoodri kui ka inertsiaalanduri väljundite kasutamist. Täpsemalt peaks esimeses sammus (raja kaardistamine) joonesensori, enkoodrite ja IMU väljundiga looma rajast digitaalse versiooni, mida saab teises sammus algoritmiliselt analüüsida. Kolmandas sammus peaks robot suutma kasutada digitaalset optimiseeritud rada koos positsioneerimisega, et päris rada läbida kiiremini: näiteks lõigata kurve, sirgetel sõita maksimaalse kiirusega ja enne kurvi kiirust vähendada jne. Robot on elektriliselt disainitud nii, et kõik vajalikud komponendid raja optimeerimise implementeerimiseks on olemas.

6 Testid ja tulemused

Roboti tarkvara ei arendatud, mille tõttu ei ole roboti igat alamsüsteemi ja disaininõuet testitud. Mehaanika suures osas vastas projekteeritud robotile – kõik mehaanilised komponendid sobisid omavahel ja robot koostati (Joonis 26). Väikene viga põhiplaadis tehti küll autori poolt loodud ülekande lahenduse kinnitusavadega: nimelt oli projekteerimisel parema poolse ülekande kinnituse valesti peegeldatud vasaku ülekande kinnituse jaoks. Juhtus nii, et vasak ja parem telg jäid omavahel 3.5 mm nihkesse. Viga aga parandati ise õigete avade puurimisega põhiplaati. Rohkem pilte koostatud robotist võib näha peatükist Lisa 10. Roboti massiks jäi 450 g ja mõõtmeteks 245x240x140 mm (kõrgusel arvestatud raadiomooduli antenni maksimaalset pikkust).



Joonis 26: Töö käigus disainitud robot Joonus.

Kontrollitud on ka roboti elektroonika disaini: nii joonesensorit kui ka enkoodrit on testitud eraldi ning need töötasid ootuspäraselt. Põhiplaadil on kontrollitud toitesüsteemi. Kõik pingeregulaatorid töötavad, kuid avastati viga USB toitejaotus lülitusahelas (Joonis 22). Nimelt kui USB on järgi ja akut järgi ei ole, siis millegipärast lasseb MPM3630 sõltumata sellest, et ta on välja lülitatud, endast USB pinget tagurpidi

läbi. Tulemuseks on see, et USB toidab jõuelektroonika toiteliini. USB toitejaotuse lülitus oli aga lisatud disaini eelkõige mugavuse eesmärkidel: oli soov, et 3.3 V toiteliini ehk MCU-d, sensoreid jne saaks ka USB-st toita. Seega tegemist ei ole kriitilise veaga. Otsustati, et AP22615 skeemi ei joodeta: nii ei saa USB jõuelektroonikat toita. USB ühendust saab aga ikka kasutada põhimikrokontrolleriga suhtlemiseks – toitejaotuse lülitamine ei mõjuta USB andmete radu (*data line*), kuid toide peab tulema akust. Ideaalse diodi lahendus koos toiteliini lülitiga töötavad: lülitamine ja ka polaarsuskaitse toimivad. Veel on katsetatud turbiini trükkplaadil, mis on üks suurimaid voolutarbijaid robotil. Probleeme turbiini töötamisel ei tuvastatud, kuigi katsetamise käigus ei mindud maksimaalse kiiruseni.

7 Kokkuvõte

Töö põhieesmärgiks seati joonejärgimise roboti arendamine, mis vastaks robotikavõistluse Robotexi joonejärgimise reeglitele. Lisaeesmärgiks seati, et robot võiks olla optimeeritud ehk konkurentsivõimeline. Nende eesmärkide saavutamiseks pandi töös paika neli ülesannet.

Esimene ülesanne oli välja selgitada, mis on roboti disaininõuded, et robot oleks 2025. aasta Robotexi reeglitele vastav ja optimeeritud. Disaininõuete välja selgitamisel lähtuti Robotexi reeglitest ja Jaapani Robotrace joonejärgimise võistluste tulemuste analüüsist. Olulisemateks disaininõuteteks jäi mehaanikas, et roboti tippkiiruseks võiks olla 9 m/s, roboti maksimaalseks massiks on 1 kg ja mõõtmeteks 250x250x250 mm. Elektroonikas oli oluline, et robotil oleks elektroonikakomponentide osas võimekus rada järgida ja ka rada optimeerida. Tarkvaras oli kõige olulisemaks disaininõudeks see, et robot oleks autonoomne: suudaks iseseisvalt joont järgida.

Teine ülesanne oli projekteerida roboti mehaanika vastavalt esimeses ülesandes välja selgitatud disaininõuetele. Selle ülesande täitmiseks arutati välja vajalikud parameetrid elektromehaanika komponentidele, valiti välja arvatud parameetrite alusel komponendid ja vajadusel viidi läbi katseid, et neid komponente paremini omavahel hinnata. Lisaks tehti roboti mehaaniline disain. Roboti massiks jäi 450 g ja mõõtmeteks 245x240x140.

Kolmandaks ülesandeks oli projekteerida roboti elektroonika vastavalt disaininõuetele. Elektroonika projekteerimisel võrreldi erinevaid komponente ja valiti võrdluse alusel robotile komponendid. Elektroonika põhisisüsteemid katsetati järgi ja need töötasid ootuspäraselt ning robotil peaks olema elektrooniliselt võimekus rada optimeerida.

Neljandaks ülesandeks oli tarkvara kavandamine vastavalt disaininõuetele. Töös toodi välja tarkvara arhitektuur, et juhtimistarkvara võiks põhineda PID juhtimismeetodil, mis tagab roboti autonoomsuse. Lisaks pakuti välja ideid rajaoptimeerimise algoritmi implementeerimiseks.

Kasutatud kirjandus

- [1] Robotex MTÜ, “Joonejärgimine – Robotex International.” robotex.international. Accessed: Dec. 8, 2025. [Online]. Available: <https://robotex.international/et/joonejargimine/>
- [2] LIT-festival, “LIT-festival – 2023 võistlused.”, litfestival.ee (web archive). Accessed: Dec. 8, 2025. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20230609112731/https://www.litfestival.ee/lit-23/2023-v%C3%B5istlused>
- [3] UKMARS, “LIT-Line Follower – UKMARS.”, ukmars.org. Accessed: Dec. 8, 2025. [Online]. Available: <https://ukmars.org/contests/line-follower/>
- [4] New Technology Foundation, “Robotrace.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.ntf.or.jp/?page_id=27
- [5] Robotex MTÜ, “Robotex ajalugu.”, robotex.international. Accessed: Dec. 8, 2025. [Online]. Available: <https://robotex.international/et/robotex-ajalugu/>
- [6] Robotex MTÜ. *Joonejärgimise reeglid*. (2025). [Online]. Available: <https://robotex.international/wp-content/uploads/2025/10/Joonejargimine-EST.pdf>
- [7] New Technology Foundation, “Past Activities: Mouse Competition.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: https://www.ntf.or.jp/?page_id=333
- [8] New Technology Foundation, “The 44th All Japan Micromouse Conference Entry List.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2023/Robot/AllJapan/index.html>
- [9] New Technology Foundation, “The 44th All Japan Micromouse Conference – Aegis2024 Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2023/Robot/AllJapan/TechRT68.html>
- [10] Google, “Google Translate.”, google.com. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: <https://translate.google.com/>
- [11] R. Gomeringer et al., *Mechanical and Metal Trades Handbook (Mehaanikainseneeri käsiraamat)*, 2nd Estonian ed. Haan-Gruiten, Germany: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co, 2022.
- [12] New Technology Foundation. *Micromouse 2017 38th All Japan Micromouse Competition*. (2017). [Online]. Available: https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2017/MM2017recode_v101.pdf
- [13] New Technology Foundation. *Micromouse 2021 42nd All Japan Micromouse Competition*. (2022). [Online]. Available: https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2021/MM2021_Records_v101.pdf
- [14] New Technology Foundation. *Micromouse 2022 43rd All Japan Micromouse Competition*. (2023). [Online]. Available: https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2022/MM2022_Recodes_V100.pdf

- [15] New Technology Foundation, *Micromouse 2023 44th All Japan Micromouse Competition*. (2024). [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2023/MM2023recode.pdf>
- [16] “Single H-Bridge Driver High-Speed Switching Type BD65496MUV datasheet,” Kyoto, Japan, ROHM, Datasheet, 2013. [Online]. Available: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/motor/dc/bd65496muv-e.pdf>
- [17] “TB6612FNG – Driver IC for Dual DC motor,” Tokyo, Japan, Toshiba, Datasheet, 2014. [Online]. Available: https://toshiba.semicon-storage.com/info/TB6612FNG_datasheet_en_20141001.pdf
- [18] “DRV8835 Dual Low-Voltage H-Bridge IC,” Dallas, TX, USA, Datasheet, 2016. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8835.pdf>
- [19] New Technology Foundation, “The 42nd All Japan Micromouse Conference – LN3.9D Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2021/robots/TechRT49.html>
- [20] New Technology Foundation, “The 42nd All Japan Micromouse Conference – Cartis 04.9D4 Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2021/robots/TechRT48.html>
- [21] “TB6614FNG – Driver IC for Dual DC motor,” Tokyo, Japan, Toshiba, Datasheet, 2013. [Online]. Available: https://toshiba.semicon-storage.com/info/TB6614FNG_datasheet_en_20130404.pdf
- [22] New Technology Foundation, “The 42nd All Japan Micromouse Conference – RS-116 Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2021/robots/TechRT47.html>
- [23] New Technology Foundation, “The 43rd All Japan Micromouse Congress – Lsens 2.6D Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2022/AllJapan/robots/TechRT60.html>
- [24] New Technology Foundation, “The 43rd All Japan Micromouse Congress – Aegis2023 Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2022/AllJapan/robots/TechRT61.html>
- [25] “TB6641FG/FTG – Full-Bridge DC Motor Driver IC,” Tokyo, Japan, Toshiba, Datasheet, 2014. [Online]. Available: https://toshiba.semicon-storage.com/info/TB6641FTG_datasheet_en_20141208.pdf
- [26] New Technology Foundation, “The 43rd All Japan Micromouse Congress – UnderBird_2.0 Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2022/AllJapan/robots/TechRT45.html>
- [27] “MAX22201/MAX22202/MAX22207 – 36V, 3.5A Brushed Motor Driver with Integrated Current Sense,” Wilmington, MA, USA, Analog Devices, Datasheet, 2022. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/max22201-max22207.pdf>
- [28] “DCX 10 L Ø10 mm, precious metal brushes, DC motor,” Sachseln, Switzerland, Maxon, Datasheet, 2022. [Online]. Available: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8992244170782/EN-22-96.pdf

- [29] “TB67H420FTG – Brushed DC Motor driver with Dual H-bridge mode,” Tokyo, Japan, Toshiba, Datasheet, 2020. [Online]. Available: https://www.mouser.com/datasheet/2/408/TB67H420FTG_datasheet_en_20201016-1368033.pdf
- [30] “DRV8874 H-Bridge Motor Driver With Integrated Current Sense and Regulation,” Dallas, TX, USA, Datasheet, 2019. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8874.pdf>
- [31] New Technology Foundation, “The 44th All Japan Micromouse Conference – hayabusa2.2 Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2023/Robot/AllJapan/TechRT65.html>
- [32] New Technology Foundation, “The 44th All Japan Micromouse Conference – Solomon 2nd Technical Data.”, ntf.or.jp. Accessed: Dec. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2023/Robot/AllJapan/TechRT50.html>
- [33] New Technology Foundation, “Micromouse 2023 Maze Collection.”, ntr.or.jp. Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2023/maze.html>
- [34] Pololu, “Pololu Metal DC Gearmotors.”, pololu.com. Accessed: Dec. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/category/51/pololu-metal-dc-gearmotors>
- [35] Maxon Group, “DCX 10 L Ø10 mm, Precious Metal Brushes CLL, sintered sleeve bearings.”, maxongroup.com. Accessed: Dec. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/dcmotor/DCX/DCX10/DCX10L01EBSL531>
- [36] Li-aung Yip, “Torque kgcm (what is kgcm)?”, electronics.stackexchange.com. Accessed: 15.12.2025. [Online]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/a/98860>
- [37] Pendle Slot Racing, “Slot.it Boxer/2 Motor 21.500 rpm Open/Closed.”, pendleslotracing.co.uk. Accessed: Dec. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.pendleslotracing.co.uk/slot-it-boxer-2-motor-21-500-rpm-open-closed.html>
- [38] Pendle Slot Racing, “Scaleauto Long-Can Tech-2 Motor 25,000rpm.”, pendleslotracing.co.uk. Accessed: Dec. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.pendleslotracing.co.uk/scaleauto-long-can-motor-25000rpm-sc-0012b.html>
- [39] Pendle Slot Racing, “NSR King Motor Evo3 21,400 rpm.”, pendleslotracing.co.uk. Accessed: Dec. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.pendleslotracing.co.uk/nsr-king-motor-evo3-21400-rpm.html>
- [40] Pendle Slot Racing, “NSR King Motor Evo 30,000 rpm.”, pendleslotracing.co.uk. Accessed: Dec. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.pendleslotracing.co.uk/nsr-king-motor-evo-30000-rpm.html>
- [41] “Guide for Easy Setup and Tuning Cars,” Salerno, Italy, NSR, Guide, 2025. [Online]. Available: https://nsrslot.com/wp-content/uploads/2025/12/guidaElaborazione_GB.pdf
- [42] Evotec, “Corona 34 D Anglewinder 16,8 mm.”, evotecshop.com. Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: <https://evotecshop.com/en/anglewinder/1083-corona-34-d-anglewinder-168-mm.html>

- [43] Evotec, “Piñones anglewinder baja fricción 12 dientes 7,5mm (x 2).”, evotechshop.com. Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: <https://evotechshop.com/en/pinones/1092-pinones-anglewinder-baja-friccion-12-dientes-x-2.html>
- [44] AliExpress – QX Happyng, “QX-motor 30mm EDF Ducted Fan with 6 Blades 2S 3S 4S Brushless Motor 20A ESC For DIY RC Airplanes Model Parts car model.”, aliexpress.com. Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/1005005872418268.html>
- [45] AliExpress – AEORC FACTORY, “AEORC New CCW/CW 30mm Electric Ducted Fan System EDF with MC1306 8000KV/10600KV for RC Airplane Model Jet Plane DIY Parts.”, aliexpress.com. Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/1005007849473471.html>
- [46] AliExpress – Ofly RC, “BL30 brushless 30mm EDF micro ducted fan system 7A ESC AR52 receiver UMX A-10 Thunderbolt micro jet plane 120g thrust on 3S”, aliexpress.com. Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/1005006282752781.html>
- [47] STMicroelectronics, “STM32 Nucleo-32 development board with STM32F303K8 MCU, supports Arduino nano connectivity.”, st.com. Accessed: Dec. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f303k8.html>
- [48] “UM1956 – STM32 Nucleo-32 boards (MB1180),” Plan-les-Ouates, Switzerland, STMicroelectronics, User Manual, 2025. [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1956-stm32-nucleo32-boards-mb1180-stmicroelectronics.pdf
- [49] MotionRC, “ZTW Mantis Slim G2 20A ESC with 3A SBEC.”, motionrc.com. Accessed: Dec. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.motionrc.com/eu/products/ztw-mantis-slim-g2-20a-esc-with-3a-sbec-ztw2020211>
- [50] H. Y. Özderya, “SerialPlot – Realtime Plotting Software.”, hackaday.io. Accessed: Dec. 20, 2025. [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/5334-serialplot-realtime-plotting-software>
- [51] Maple Tech International, “Standard deviation.”, math.net. Accessed: Dec. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.math.net/standard-deviation>
- [52] D. Tiitma, “Tudengivormel FEST24 elektroonika kontrollüksus. Electronics Control Unit for Formula Student Car FEST24,” M.S. thesis, School of Information Technologies, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia, 2025. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/f0af2883-5914-4348-ba2d-0937c2f3e521>
- [53] Altium and Rick Hartley, San Diego, California, USA. *[LIVE] How to Achieve Proper Grounding – Rick Hartley – Expert Live Training (US)*. (Nov. 11, 2019). Accessed: Dec. 27, 2025. [Online Video]. Available: <https://youtube.com/watch?v=ySuUZEjARPY>
- [54] “AS5601 – 12-Bit Programmable Contactless Encoder,” Premstätten, Styria, Austria, ams OSRAM, Datasheet, 2016. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/6dd0193ab2116bc6/original/AS5601-DS000395.pdf>
- [55] “AS5147U/AS5247U – 14-Bit Dual-Die On-Axis Magnetic Rotary Position Sensor with Up to 14-Bit Binary Incremental Pulse Count,” Premstätten, Styria, Austria, ams OSRAM, Datasheet, 2020. [Online]. Available:

- <https://look.ams-osram.com/m/d4566ea9c648455/original/AS5147U-AS5247U-DS000639.pdf>
- [56] “AS5147 – 14-Bit On-Axis Magnetic Rotary Position Sensor with 11-Bit Binary Incremental Pulse Count,” Permstätten, Styria, Austria, ams OSRAM, Datasheet, 2021. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/510307b77a8c543f/original/AS5147-DS000307.pdf>
- [57] “AS5145H/AS5145A/AS5145B – 12-Bit Programmable Magnetic Rotary Encoder,” Permstätten, Styria, Austria, ams OSRAM, Datasheet, 2020. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/5835d15632039c2e/original/AS5145-DS000398.pdf>
- [58] “AS5147P – 14-Bit On-Axis Magnetic Rotary Position Sensor with 12-Bit Binary Incremental Pulse Count and for 28krpm High Speed Capability,” Permstätten, Styria, Austria, ams OSRAM, Datasheet, 2016. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/292a62bf288ae88a/original/AS5147P-DS000328.pdf>
- [59] “AS5047U – 14-Bit On-Axis Magnetic Rotary Position Sensor with Up to 14-Bit Binary Incremental Pulse Count,” Permstätten, Styria, Austria, ams OSRAM, Datasheet, 2020. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/48d90c982e0879e8/original/AS5047U-DS000637.pdf>
- [60] “AS5047P – 14-Bit On-Axis Magnetic Rotary Position Sensor with 12-Bit Decimal and Binary Incremental Pulse Count for 28krpm High Speed Capability,” Permstätten, Styria, Austria, ams OSRAM, Datasheet, 2021. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/d05ee39221f9857/original/AS5047P-DS000324.pdf>
- [61] “AS5047D – 14-Bit On-Axis Magnetic Rotary Position Sensor with 11-Bit Decimal and Binary Incremental Pulse Count,” Permstätten, Styria, Austria, ams OSRAM, Datasheet, 2016. [Online]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/e535639512ec7dc/original/AS5047D-DS000394.pdf>
- [62] Pololu, “Magnetic Encoder Pair Kit for 20D mm Metal Gearmotors, 20 CPR, 2.7-18V.”, pololu.com. Accessed: Dec. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/3499>
- [63] Pololu, “Magnetic Encoder Pair Kit for Mini Plastic Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V.”, pololu.com. Accessed: Dec. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/1523>
- [64] Pololu, “Magnetic Encoder Pair Kit with Top-Entry Connector for Micro Metal Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V.”, pololu.com. Accessed: Dec. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/4760>
- [65] Pololu, “Magnetic Encoder Pair Kit with Side-Entry Connector for Micro Metal Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V.”, pololu.com. Accessed: Dec. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/4761>
- [66] Pololu, “Romi Encoder Pair Kit, 12 CPR, 3.5-18V.”, pololu.com. Accessed: Dec. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/3542>
- [67] Pololu, “Magnetic Encoder Pair Kit for Micro Metal Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V.”, pololu.com. Accessed: Dec. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/3081>

- [68] “ENX Encoders,” Sachseln, Switzerland, Maxon, Datasheet, 2017. [Online]. Available: https://www.maxongroup.com/medias/CMS_Downloads/DIVERSES/ENXEASY_EN.pdf
- [69] “EMS22Q – Non-Contacting Incremental Encoder,” Altadena, CA, USA, Bourns, Datasheet, 2018. [Online]. Available: <https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/ems22q.pdf>
- [70] Pololu, “Pololu QTR Reflectance Sensors.,” pololu.com. Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/category/123/pololu-qtr-reflectance-sensors>
- [71] Sparkfun, “SparkFun Line Follower Array.,” sparkfun.com. Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/sparkfun-line-follower-array.html>
- [72] “ANO007 | Understanding Phototransistor Optocouplers,” Niedernhall, Germany, Würth Elektronik, Whitepaper, 2023. [Online]. Available: https://www.we-online.com/components/media/o760909v410%20ANO007a_EN.pdf
- [73] “Miniature Reflective Object Sensor: QRE1113, QRE1113GR, QRE1114GR,” Scottsdale, AZ, USA, Onsemi, Datasheet, 2024. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/qre1113-d.pdf>
- [74] FlyingEinstein, “RC PWM and PPM.,” flyingeinstein.com. Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <http://flyingeinstein.com/index.php/articles/58-ppm-explained>
- [75] “Incremental Rotary Encoders,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Application Brief, 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ab/sboa200b/sboa200b.pdf>
- [76] Gertech Automation, “What is an Encoder with ABZ Output?,” gtencoder.com. Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.gtencoder.com/technical-specifications-and-interfaces/encoder-abz-output-guide/>
- [77] Same Sky, “What’s the Difference Between an Incremental Encoder’s PPR, CPR, and LPR?,” sameskydevices.com. Accessed: Dec. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.sameskydevices.com/blog/what-is-encoder-ppr-cpr-and-lpr>
- [78] “Temperature Effects on Motor Performance,” Kentucky, OH, USA, Haydon Kerk Motion Solutions/Pittman Motors, Whitepaper, 2017. [Online]. Available: https://www.haydonkerkpittman.com/-/media/ametekhaydonkerk/downloads/white-papers/temperature_effects_on_dc_motor_performance_1.pdf
- [79] “DRV8262-Q1: 60V, Single or Dual H-Bridge Motor Driver with Current Sense Output for 24V and 48V Automotive Applications,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Datasheet, 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8262-q1.pdf>
- [80] “DRV8873-Q1 Automotive H-Bridge Motor Driver,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Datasheet, 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8873-q1.pdf>
- [81] “DRV8243-Q1 Automotive H-Bridge Driver with Integrated Current Sense and Diagnostics,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Datasheet, 2022. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8243-q1.pdf>
- [82] “DRV8244-Q1 Automotive H-Bridge Driver with Integrated Current Sense and Diagnostics,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Datasheet, 2022. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8244-q1.pdf>

- [83] “DRV8245-Q1 Automotive H-Bridge Driver with Integrated Current Sense and Diagnostics,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Datasheet, 2022. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8245-q1.pdf>
- [84] “High-density power driver – high voltage full bridge with integrated gate driver,” Planles-Ouates, Switzerland, STMicroelectronics, Datasheet, 2017. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/pwd13f60.pdf>
- [85] “MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4,” San Jose, CA, USA, InvenSense, Datasheet, 2013. [Online]. Available: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- [86] “ICM-42670-P Datasheet,” San Jose, CA, USA, InvenSense, Datasheet, 2022. [Online]. Available: https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2021/07/ds-000451_icm-42670-p-datasheet.pdf
- [87] “BNO08X Data Sheet,” Rockville, MD, USA, Ceva, Datasheet, 2023. [Online]. Available: https://www.ceva-ip.com/wp-content/uploads/BNO080_085-Datasheet.pdf
- [88] P. Horowitz ja W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Cambridge, MA, USA: Cambridge Univ. Press, 2015.
- [89] G. Sanos and M. Aibin, “Flash Memory: NOR vs. NAND.”, baeldung.com. Accessed: Dec. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.baeldung.com/cs/flash-memory-nor-vs-nand>
- [90] Embedded, “Flash 101: NAND Flash vs NOR Flash.”, embedded.com. Accessed: Dec. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.embedded.com/flash-101-nand-flash-vs-nor-flash>
- [91] “Winbond W25N512GVxxG/T/R – 3V 512Mbit Serial SLC NAND Flash Memory with Dual/Quad SPI Buffer Read & Continuous Read,” Taichung, Taiwan, Winbond, Datasheet, 2021. [Online]. Available: https://www.winbond.com/hq/support/documentation/levelOne.jsp?__locale=en&DocNo=DA00-W25N512GV.1
- [92] Ettevõtlus- ja infotehnoloogiaminister. (2017, Oct. 26). Eesti raadiosagedusplaan. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/117102025004>
- [93] Tesswave, “What are the ISM frequency bands and the use cases?”, tesswave.com. Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.tesswave.com/what-are-the-ism-frequency-bands/>
- [94] “Digi XBee® XR 868 – RF Module,” Hopkins, MN, USA, Digi, User guide, 2025. [Online]. Available: <https://docs.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002461.pdf>
- [95] Parallax, “XBee USB Adapter Board.”, parallax.com. Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.parallax.com/product/xbee-usb-adapter-board/>
- [96] “ESP8684-WROOM-07,” Shanghai, China, Espressif Systems, Datasheet, 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp8684-wroom-07_datasheet_en.pdf

- [97] “ESP8684-MINI-1 and ESP8684-MINI-1U,” Shanghai, China, Espressif Systems, Datasheet, 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp8684-mini-1_mini-1u_datasheet_en.pdf
- [98] “ESP32-PICO-MINI-02 and ESP32-PICO-MINI-02U,” Shanghai, China, Espressif Systems, Datasheet, 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32-pico-mini-02_datasheet_en.pdf
- [99] “ESP32-C3-MINI-1 and ESP32-C3-MINI-1U,” Shanghai, China, Espressif Systems, Datasheet, 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32-c3-mini-1_datasheet_en.pdf
- [100] “ESP32-C6-MINI-1 and ESP32-C6-MINI-1U,” Shanghai, China, Espressif Systems, Datasheet, 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32-c6-mini-1_mini-1u_datasheet_en.pdf
- [101] “ESP8684-MINI-1 and ESP8684-MINI-1U,” Shanghai, China, Espressif Systems, Datasheet, 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp8684-mini-1_mini-1u_datasheet_en.pdf
- [102] “TSOP752.., TSOP754.. – IR Receiver Modules for Remote Control Systems,” Malvern, PA, USA, Vishay Intertechnology, Datasheet, 2025. [Online]. Available: <https://www.vishay.com/docs/82494/tsop752.pdf>
- [103] “Micro OLED 0.84” – 96x16 dots,” Munich, Germany, Display Visions, Datasheet, 2025. [Online]. Available: <https://www.lcd-module.com/fileadmin/eng/pdf/grafik/W096016-XA-XB.pdf>
- [104] P. Scherz ja S. Monk, *Practical Electronics for Inventors*, 4th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2016.
- [105] Henry J. Zhang, “Application Note 140 – Basic Concepts of Linear Regulator and Switching Mode Power Supplies,” Wilmington, MA, USA, Analog Devices, Application Note, 2013. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/app-notes/an140.pdf>
- [106] “MPM3630 – 18 V/3A DC/DC Module Synchronous Step-Down Regulator with Integrated Inductor,” Kirkland, WA, USA, Monolithic Power Systems, Datasheet, 2020. [Online]. Available: https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/EN/sku/MPM3630GQV/document_id/2114/
- [107] “LMS1585A 5A/LMS1587 5A and 3A Low Dropout Fast Response Regulator,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Datasheet, 2013. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lms1587.pdf>
- [108] China Hobbyline, “CNHL MiniStar 450mAh 11.1V 3S 70C Lipo Battery with XT30U.”, chinahobbyline.com. Accessed: Jan. 1, 2026. [Online]. Available: <https://chinahobbyline.com/collections/cnhl-voltage-11-1v-3s-lipo-batteries/products/cnhl-ministar-series-450mah-11-1v-3s-70c-lipo-battery-with-xt30-plug>
- [109] E-Switch, “What is Contact Resistance in a Circuit?”, e-switch.com. Accessed: Jan. 1, 2026. [Online]. Available: <https://www.e-switch.com/news-events/blog/switches-simplified/what-is-contact-resistance-in-a-circuit/>

- [110] “AWTA1504,” Galway, Ireland, TE Connectivity, Datasheet, 2013. [Online]. Available: <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=1968502&DocType=Customer+Drawing&DocLang=English&PartCntxt=7-6437630-3>
- [111] Monolithic Power Systems, “Designing a Reverse Polarity Protection Circuit (Part I),” [monolithicpower.com](https://www.monolithicpower.com). Accessed: Jan. 1, 2026. [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/learning/resources/designing-a-reverse-polarity-protection-circuit-part-i>
- [112] Jose Padilla, “Comparing N-Channel and P-Channel MOSFETs,” [eepower.com](https://www.eepower.com). Accessed: Jan. 1, 2026. [Online]. Available: <https://eepower.com/industry-articles/p-channel-power-mosfets-and-their-impactful-applications/>
- [113] “NTTFS008P03P8Z,” Scottsdale, AZ, USA, Onsemi, Datasheet, 2023. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nttfs008p03p8z-d.pdf>
- [114] “Basics of Ideal Diodes,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Application note, 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slvae57b/slvae57b.pdf>
- [115] “LM7481-Q1 Ideal Diode Controller with Active Rectification and Load Dump Protection,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Datasheet, 2020. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7481-q1.pdf>
- [116] “IQE013N04LM6,” Neubiberg, Germany, Infineon, Datasheet, 2020. [Online]. Available: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-iqe013n04lm6-datasheet-en.pdf>
- [117] “AP22815 / AP22615,” Plano, TX, USA, Diodes Incorporated, Datasheet, 2023. [Online]. Available: https://www.diodes.com/datasheet/download/AP22815_615.pdf
- [118] “ESP32-S3 Series,” Shanghai, China, Espressif Systems, Datasheet, 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32-s3_datasheet_en.pdf
- [119] “ESP32-P4,” Shanghai, China, Espressif Systems, Datasheet, 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32-p4-chip-revision-v1.3_datasheet_en.pdf
- [120] W. Kester, “Which ADC Architecture Is Right for Your Application?” Wilmington, MA, USA, Analog Devices, Datasheet, 2005. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-39/number-2/articles/the-right-adc-architecture.pdf>
- [121] “STM32F745xx, STM32F746xx,” Plan-les-Ouates, Switzerland, STMicroelectronics, Datasheet, 2025. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f746be.pdf>
- [122] “STM32H745xI/G,” Plan-les-Ouates, Switzerland, STMicroelectronics, Datasheet, 2023. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h745xg.pdf>
- [123] “STM32G473xB, STM32G473xC, STM32G473xE,” Plan-les-Ouates, Switzerland, STMicroelectronics, Datasheet, 2023. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g473qb.pdf>
- [124] “STM32L162VD, STM32L162ZD, STM32L162QD, STM32L162RD,” Plan-les-Ouates, Switzerland, STMicroelectronics, Datasheet, 2021. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l162qd.pdf>

- [125] “MAX11129–MAX11132 – 3Msps, Low-Power, Serial 12-/10-Bit, 8-/16-Channel ADCs,” Wilmington, MA, USA, Analog Devices, Datasheet, 2012. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX11129-MAX11132.pdf>
- [126] “ADS7038x Small, 8-Channel, 12-Bit ADC With SPI Interface, GPIOs, and CRC,” Dallas, TX, USA, Texas Instruments, Datasheet, 2024 [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads7038.pdf>
- [127] “MAX11135–MAX11143 - 500ksps, Low-Power, Serial 12-/10-/8-Bit, 4-/8-/16-Channel ADCs,” Wilmington, MA, USA, Analog Devices, Datasheet, 2012. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX11135-MAX11143.pdf>
- [128] “BD79104FV-LA – Successive Approximation A/D Converter 12 bit, 0.5 MSPS to 1 MSPS, 8-channel, SPI Interface,” Kyoto, Japan, Rohm Semiconductor, Datasheet, 2024. [Online]. Available: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/data_converter/dac/bd79104fv-la-e.pdf
- [129] “STM32H742xI/G, STM32H743xI/G,” Plan-les-Ouates, Switzerland, STMicroelectronics, Datasheet, 2023. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h743vi.pdf>
- [130] “STM32H753xI,” Plan-les-Ouates, Switzerland, STMicroelectronics, Datasheet, 2023. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h753zi.pdf>
- [131] K. J. Åstrom and R. M. Murray, *Feedback Systems – An Introduction for Scientists and Engineers*, 2nd ed. New Jersey: Princeton University Press. 2021.

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Oliver Paljak,

- 1 Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Optimeeritud joonejärgimisroboti prototüübi arendamine”, mille juhendaja on Priit Ruberg
 - 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.

03.01.2026

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 loomingu 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 – Jaapani joonejärgimise võistluse Robotrace keskmise kiiruse analüüsi lähteandmed

Tabelites on kõik andmed (välja arvatud katse keskmine kiirus) võetud tabelis märgitud allikast. Andmed tõlgiti tööriista Google Translate [10] abiga. Keskmise kiiruse arvutamiseks kasutati Valemit (1).

Tabel 12: 2017. aasta Robotrace võistluse [12] keskmised kiirused.

Koht	Roboti nimi	Raja pikkus s [m]	Parima katse aeg t [s]	Parima katse keskmine kiirus v [m/s]
1	RS-100	35.2	14.301	2.46
2	Cartis04.5	35.2	14.377	2.45
3	Ning3	35.2	14.788	2.38
4	TE-RT	35.2	15.430	2.28
5	Leo-blue	35.2	15.574	2.26
6	Whitechip 7	35.2	15.653	2.25
7	Diligent-4	35.2	16.656	2.13
8	Jugemukai	35.2	18.565	1.90
9	Super LiZ	35.2	18.910	1.86
10	Du-Lin-Car	35.2	19.257	1.83

Tabel 13: 2021. aasta Robotrace võistluse [13] keskmised kiirused.

Koht	Roboti nimi	Raja pikkus s [m]	Parima katse aeg t [s]	Parima katse keskmine kiirus v [m/s]
1	LN3.9D	43	11.197	3.84
2	Cartis04.9D4	43	12.761	3.37
3	RS-116	43	14.734	2.92
4	LT-1	43	18.537	2.32
5	NCC-03	43	21.274	2.02
6	UnderBird	43	21.481	2.00
7	Pan Kai	43	21.868	1.97
8	GodSpeed	43	21.927	1.96
9	Scorpion	43	22.266	1.93
10	Little Bear	43	22.978	1.87

Tabel 14: 2022. aasta Robotrace võistluse [14] keskmised kiirused.

Koht	Roboti nimi	Raja pikkus s [m]	Parima katse aeg t [s]	Parima katse keskmine kiirus v [m/s]
1	Lsens2.6D	28.6	7.118	4.02
2	Aegis2023	28.6	7.222	3.96
3	UnderBird_2.0	28.6	8.357	3.42
4	Hayabusa	28.6	8.442	3.39
5	Laurus	28.6	10.884	2.63
6	NCC-KS	28.6	11.075	2.58
7	NCC-HS	28.6	11.425	2.50
8	Grace	28.6	11.754	2.43
9	Warlock	28.6	12.618	2.27
10	Ursa Minor	28.6	13.897	2.06

Tabel 15: 2023. aasta Robotrace võistluse [15] keskmised kiirused.

Koht	Roboti nimi	Raja pikkus s [m]	Parima katse aeg t [s]	Parima katse keskmine kiirus v [m/s]
1	Aegis2024	24.3	4.846	5.01
2	Hayabusa2.2	24.3	5.677	4.28
3	Solomon2nd	24.3	5.934	4.10
4	VLT-2	24.3	5.997	4.05
5	L1S	24.3	6.342	3.83
6	UnderBird 3.2	24.3	6.972	3.49
7	TLR2	24.3	7.491	3.24
8	ANGo	24.3	8.352	2.91
9	ART_1	24.3	8.805	2.76
10	Warlock2	24.3	9.611	2.53

Lisa 3 – Jaapani joonejärgimise võistluse Robotrace poodiumikoha robotite tehnilised andmed

Kõigi andmete tõlkimisel kasutati tööriista Google Translate [10] abi.

Tabel 16: RS-100 tehnilised andmed (Robotrace 2017 I koht) [12]

RS-100	
CPU	STM32F303K8T6 (72 MHz; ROM: 64 kB; RAM: 16 kB)
Aku	LiPo 2S 330 mAh (nominaalpinge 7.4 V; max 8.4 V)
Mootorid	2 DC mootorit; Draiver: BD65496MUV (max 1.2 A @ DC [16]); Servomootor keeramiseks
Sensorid	Arvatavasti ise tehtud joonesensor kasutades L-31ROPT1C ja RPR-220 (4 IR LED-i ja vastuvõtjat, lugemine põhineb ADC-l); Güroskoop L3GD20; Arvatavasti ise tehtud enkooder põhinedes fotosensoril GP1A51HRJ00F
Rattad	4 rattast diameetriga 29 mm ja laiusega 19 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 178x170x30 mm; Mass: 145 g; Ackermann tüüpi juhtimine (<i>Ackermann type steering</i>)
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 17: Cartis04.5 tehnilised andmed (Robotrace 2017 II koht) [12]

Cartis04.5	
CPU	STM32F103RE (64 MHz; ROM: 512 kB; RAM: 64 kB)
Aku	LiPo 2S 260 mAh (nominaalpinge 7.4 V; max 8.4 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX10); Draiver: TB6612FNG (1.2 A @ DC [17]); Maxon RE10 keeramiseks
Sensorid	Arvatvasti ise tehtud joonesensor kasutades kümnet GP2S700 IR sensorit (lugemine põhineb ADC-l); Güroskoop Invensense ISZ-650; 2 Maxon ENX EASY10 magneetilist enkoodrit
Rattad	4 ratast diameetriga 25 mm ja laiusega 12 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 175x150x35 mm; Mass: 141 g; Sirgejooneline max kiirus: 4.2 m/s; Pööramiseks: 1.7 m/s; Kiirendus: 12 m/s ²
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 18: Ning3 tehnilised andmed (Robotrace 2017 III koht) [12]

Ning3	
CPU	STM32F4 seeria CPU (100 MHz; ROM: 1 MB; RAM: 128 kB)
Aku	LiPo 2S 250 mAh (nominaalpinge 7.4 V; max 8.4 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Faulhaber) Draiver: DRV8835 (max 1.5 A @ DC [18])
Sensorid	15 IR sensorit (arvatvasti ise tehtud joonesensor, lugemine põhineb ADC-l)
Rattad	4 ratast diameetriga 24 mm ja laiusega 10 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 110x130x24 [mm] Mass: 120 g
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 19: LN3.9D tehnilised andmed (Robotrace 2021 I koht) [19]

LN3.9D



Joonis 27: Robot LN3.9D [19]

CPU	Renesas RX651 (100 MHz; ROM: 1 MB; RAM: 650 kB)
Aku	LiPo 3S 350 mAh (nominaalpinge 11.1 V; max 12.6 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX10L)
Sensorid	15 IR sensorit (arvatavasti ise tehtud joonesensor); IMU MPU600; 2 enkoodrit ENX 10 EASY 1024
Rattad	4 rattast diameetriga 25 mm ja laiusega 12 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 180x150x35 mm; Mass: 110 g; Differentsiaalne juhtimine (<i>differential steering</i>)
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 20: Cartis 04.9D4 tehnilised andmed (Robotrace 2021 II koht) [20]

Cartis 04.9D4

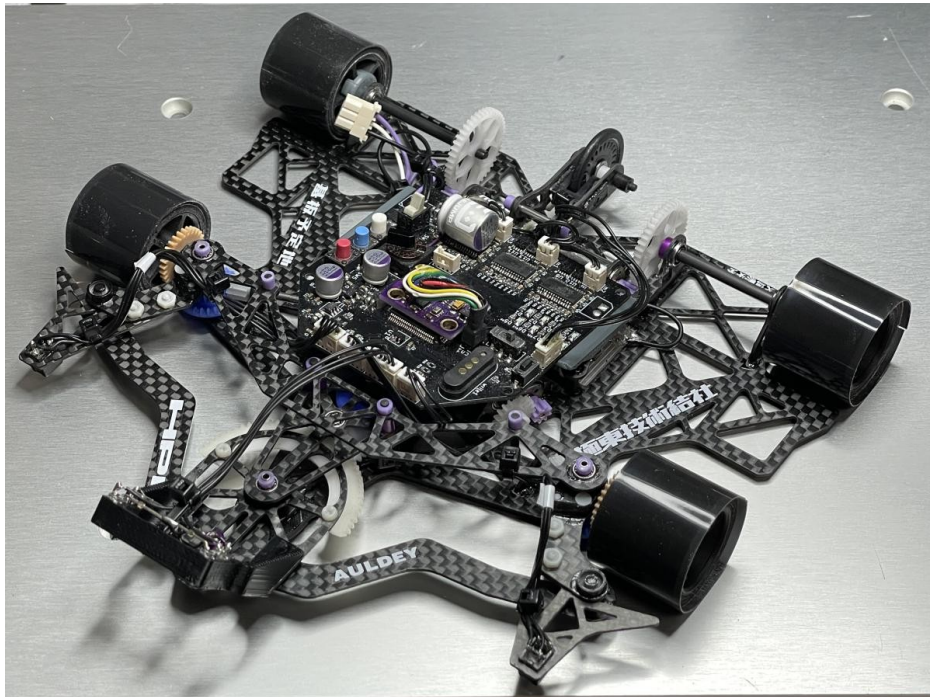


Joonis 28: Robot Cartis 04.9D4 [20]

CPU	STM32F103RET6 (64 MHz; ROM: 512 kB; RAM: 64 kB)
Aku	LiPo 3S 330 mAh (nominaalpinge 11.1 V; max 12.6 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX10L); Draiver: TB6614FNG (max 1.2 A @ DC [21])
Sensorid	10 IR GP2S700HCP sensorit (arvatavasti ise tehtud joonesensor; lugemine põhineb ADC-l); Güroskoop ISZ-650; 2 magneetilist enkoodrit ENX 10 EASY 1024
Rattad	4 rattast diameetriga 23 mm ja laiusega 10 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 214x150x32 mm Mass: 161 g; Sirgejooneline max kiirus: 6.5 m/s; Keeramiskiirus: 2 m/s; Kiirendus: 14.4 m/s ² ; Differentiaalne juhtimine
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 21: RS-116 tehnilised andmed (Robotrace 2021 III koht) [22]

RS-116



Joonis 29: Robot RS-116 [22]

CPU	Renesas RX Seeria (20 MHz)
Aku	LiPo 2S 330 mAh (nominaalpinge 7.4 V; max 8.4 V)
Mootorid	4 DC mootorit; 1 servomootor keeramiseks
Sensorid	4 IR sensorit (arvatavasti ise tehtud joonesensor; lugemine põhineb ADC-1)
Rattad	4 rattast diameetriga 26 mm ja laiusega 20 mm
Mehaanilised andmed	Ackermann tüüpi juhtimine
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 22: Lsens 2.6D tehnilised andmed (Robotrace 2022 I koht) [23]

Lsens 2.6D

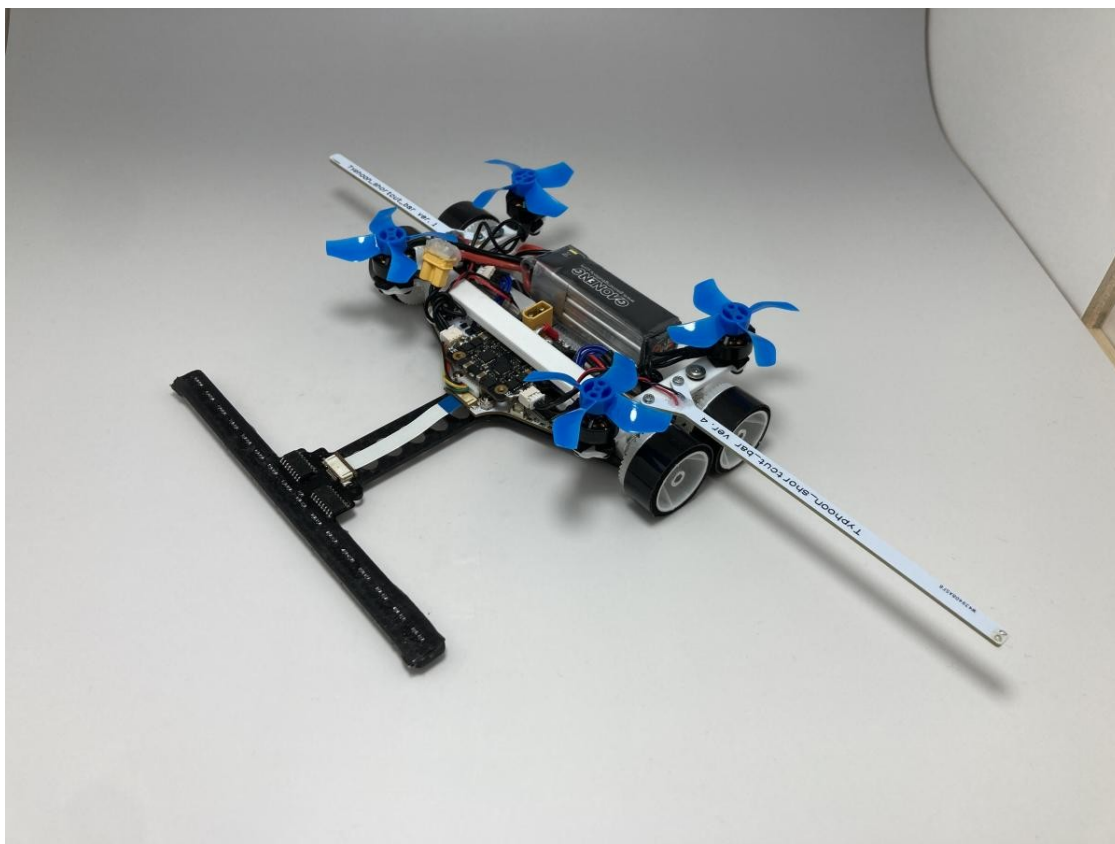


Joonis 30: Robot Lsens 2.6D [23]

CPU	Renesas RX71M (240 MHz; ROM: 777 kB; RAM: 640 kB)
Aku	LiPo 3S 350 mAh (nominaalpinge 11.1 V; max 12.6 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX10L); Draiver: TB6614FNG (max 1.2 A @ DC [21])
Sensorid	24 IR sensorit (arvatavasti ise tehtud jooesensor)
Rattad	4 rattast diameetriga 25 mm ja laiusega 12 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 100x100x100 mm; Mass: 130 g; Sirgejooneline max kiirus: 7 m/s; Keeramiskiirus: 1.8 m/s; Kiirendus: 15 m/s ² ; Diferentsiaalne juhtimine
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 23: Aegis2023 tehnilised andmed (Robotrace 2022 II koht) [24]

Aegis2023

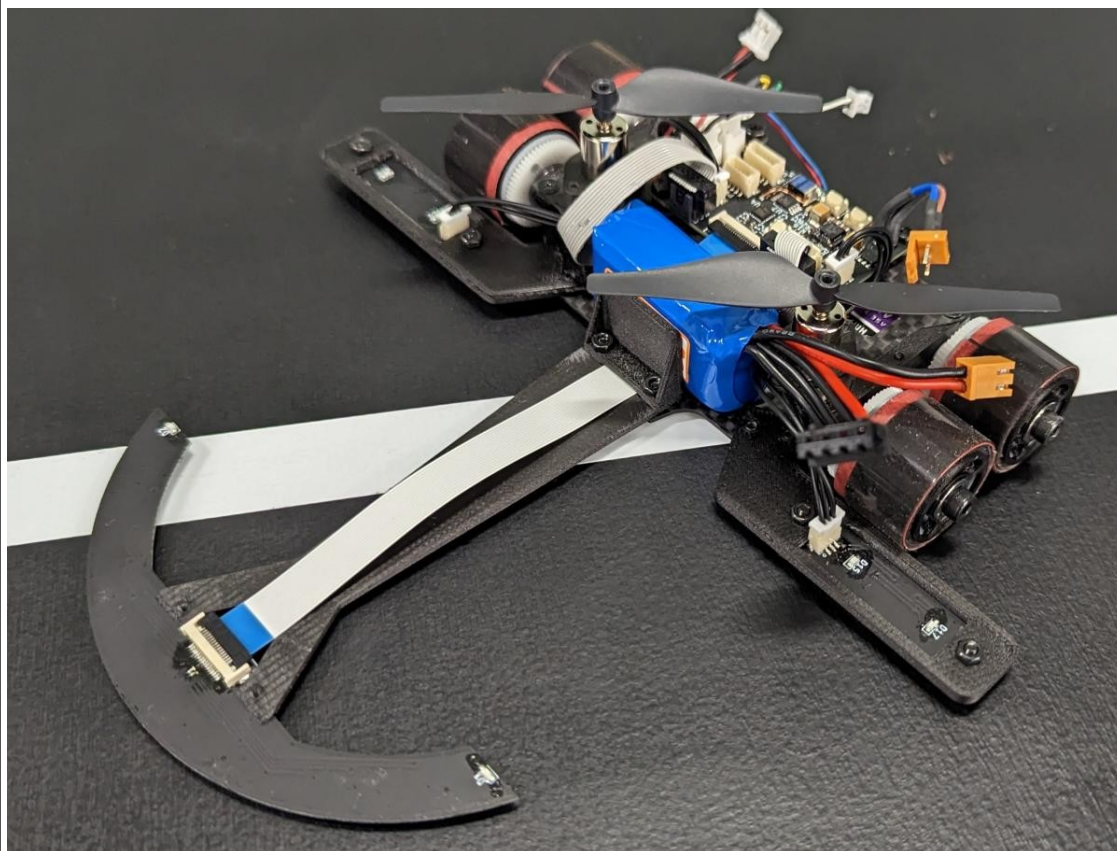


Joonis 31: Robot Aegis2023 [24]

CPU	Renesas RX66T (160 MHz; ROM: 512 kB; RAM: 64 kB)
Aku	LiPo 3S 300 mAh (nominaalpinge 11.1 V; max 12.6 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX10L); Draiver: TB6641FTG (1.5 A @ DC [25]); 4 mootorit/turbiini tõmbejõu (<i>downforce</i>) tekitamiseks
Sensorid	16 IR sensorit kasutades SCM-014TB (arvatavasti ise tehtud joonesensor; lugemine põhineb ADC-l); IMU LSM6DSR; 2 magneetilist enkoodrit Maxon ENX 10 EASY
Rattad	4 rattast diameetriga 20 mm ja laiusega 10 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 130x240x40 mm; Mass: 130 g; Diferentsiaalne juhtimine
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 24: UnderBird_2.0 tehnilised andmed (Robotrace 2022 III koht) [26]

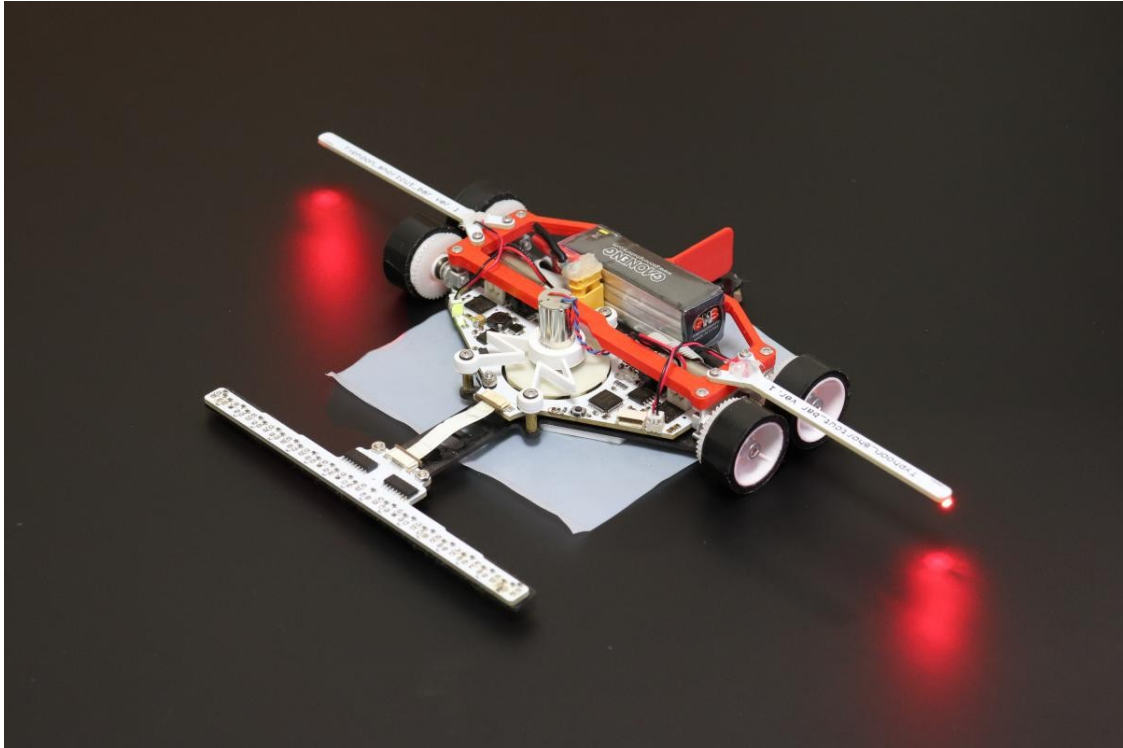
UnderBird_2.0



Joonis 32: Robot UnderBird_2.0 [26]

CPU	STM32F405RG (168 MHz; ROM: 1 MB; RAM: 196 kB)
Aku	LiPo 3S 180 mAh (nominaalpinge 11.1 V; max 12.6 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX10L 4.5 V); Draiver: MAX22201 (2 A @ DC [27]); 2 mootorit/turbiini tõmbejõu tekitamiseks
Sensorid	12 IR sensorit kasutades TEMT7100X01 (arvatavasti ise tehtud joonesensor; lugemine põhineb ADC-l); IMU MPU6500; 2 magneetilist enkoodrit Maxon ENX 10 EASY
Rattad	4 rattast diameetriga 22 mm ja laiusega 15 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 155x167x45 mm; Mass: 120 g; Diferentsiaalne juhtimine
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 25: Aegis2024 tehnilised andmed (Robotrace 2023 I koht) [9]

Aegis2024	
	
Joonis 33: Robot Aegis2024 [9]	
CPU	Renesas RX66T (160 MHz; ROM: 512 kB; RAM: 64 kB); Püsimälu: 8 MB
Aku	LiPo 3S 300 mAh (nominaalpinge 11.1 V; max 12.6 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX10L); Draiver: TB67H420 (2.25 A @ DC [29]) 1 DC mootor/turbiin (DRW002) tõmbejõu tekitamiseks
Sensorid	16 IR sensorit kasutades SCM-014TB (arvatavasti ise tehtud joonesensor; lugemine põhineb ADC-l); IMU LSM6DSR; 2 magneetilist enkoodrit Maxon ENX 10 EASY
Rattad	4 rattast diameetriga 20 mm ja laiusega 10 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 160x250x40 mm; Mass: 130 g; Sirgejooneline max kiirus: 5 m/s; Keeramiskiirus: 1 m/s; Kiirendus: 10 m/s ² ; Diferentsiaalne juhtimine
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 26: hayabusa2.2 tehnilised andmed (Robotrace 2023 II koht) [31]

hayabusa2.2



Joonis 34: Robot hayabusa2.2 [31]

CPU	STM32F405 (168 MHz; ROM: 1 MB; RAM: 192 kB)
Aku	LiPo 3S 300 mAh (nominaalpinge 11.1 V; max 12.6 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX12L); Draiver: DRV8874 (6 A max [30]) Turbiin tõmbejõu tekitamiseks
Sensorid	13 IR sensorit (arvatavasti ise tehtud joonesensor; lugemine põhineb ADC-1); IMU ICM20648; 2 enkoodrit ENX EASY
Rattad	4 ratast diameetriga 23 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 140x110x45 mm; Mass: 140 g; Sirgejooneline max kiirus: 7 m/s; Keeramiskiirus: 2 m/s; Kiirendus: 10 m/s ² ; Diferentsiaalne juhtimine
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Tabel 27: Solomon 2nd tehnilised andmed (Robotrace 2023 III koht) [32]

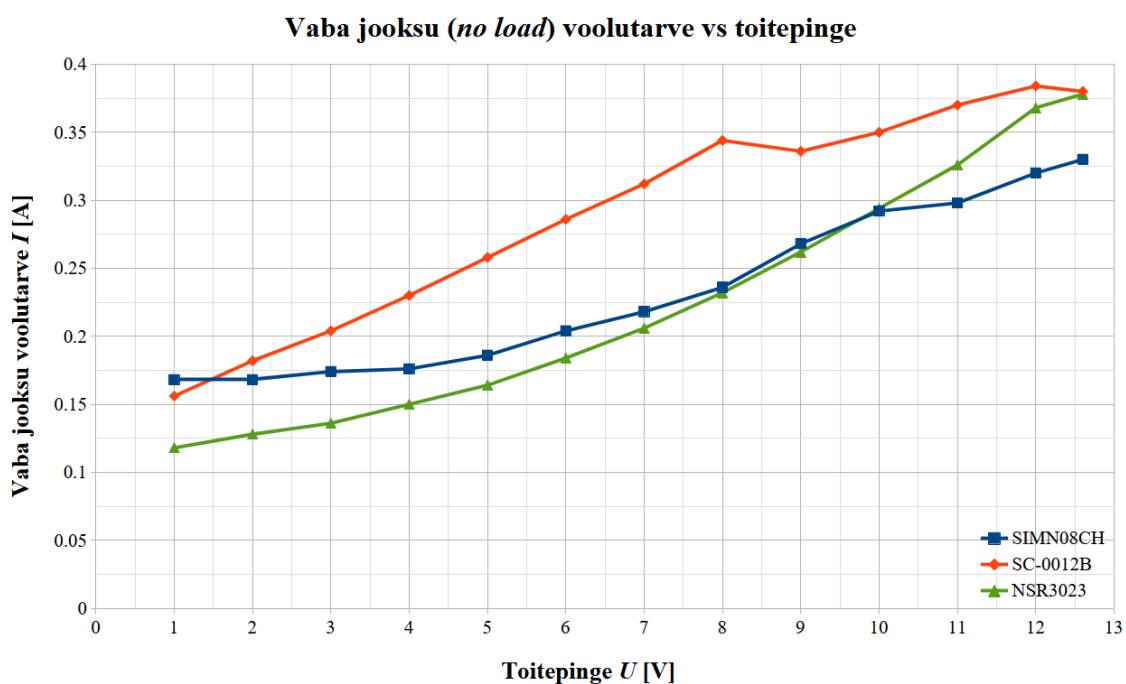


Joonis 35: Robot Solomon 2nd [32]

CPU	STM32F405RGT6 (40 MHz; 1 MB; 192 kB)
Aku	LiPo 4S 180 mAh (nominaalpinge 14.8 V; max 16.8 V)
Mootorid	2 DC mootorit (Maxon DCX12L) Draiver: DRV8256 (6.4 A max) 2 DC mootorit/turbiini tõmbejõu tekitamiseks
Sensorid	24 IR sensorit kasutades LBR-123F (arvatavasti ise tehtud joonesensor; lugemine põhineb ADC-l); IMU LSM6DSRXTR; 2 optilist enkoodrit MES-6-128PST16C
Rattad	2 rattast diameetriga 24.5 mm ja laiusega 11 mm
Mehaanilised andmed	Mõõtmed: 210x175x35 mm; Mass: 120 g; Sirgejooneline max kiirus: 5 m/s; Keeramiskiirus: 2.5-3.5 m/s; Kiirendus: 10 m/s ² ; Diferentsiaalne juhtimine
Tarkvara	Raja optimeerimise algoritmiga

Lisa 4 – Veomootorite testide mõõtetulemused

Kõik andmed on saadud mõõtmise teel, välja arvatud pöördemoment, mis arvutati Valemiga (5) – kangi pikkuseks oli kõikide mootorite puhul $r=5$ cm.



Joonis 36: Mootorite vaba jooksu voolutarve sõltuvus toitepingest (NSR3027 ei ole läbi põlemise tõttu graafikul kujutatud).

Tabel 28: Mootori SIMN08CH [37] mõõtetulemused.

Toitepinge U [V]	Vaba jooksu voolutarve I_{NL} [A]	Pöörlemis- sagedus n [RPM]	Maksimaalne voolutarve I_{MAX} [A]	Surutud mass m [g]	Pöörde- moment t [g·cm]
1	0.168	1080	0.406	3.5	17.5
2	0.168	2790	0.8	9.3	46.5
3	0.174	4510	1.192	13.9	69.5
4	0.176	6250	1.55	18	90
5	0.186	7940	1.9	22	110
6	0.204	9620	2.2	26.7	133.5
7	0.218	11280	2.5	30	150
8	0.236	12900	2.7	34	170
9	0.268	14470	3.1	35.7	178.5
10	0.292	16170	3.3	38.9	194.5
11	0.298	17790	3.6	41.3	206.5
12	0.32	19400	3.8	42	210
12.6	0.33	20360	4.2	28	140

Tabel 29: Mootori SC-0012B [38] mõõtetulemused.

Toitepinge U [V]	Vaba jooksu voolutarve I_{NL} [A]	Pöörlemis- sagedus n [RPM]	Maksimaalne voolutarve I_{MAX} [A]	Surutud mass m [g]	Pöörde- moment t [g·cm]
1	0.156	1400	0.416	2.6	13
2	0.182	3540	1	7.2	36
3	0.204	5640	1.6	10.6	53
4	0.23	7720	2.1	14	70
5	0.258	9780	2.6	17.1	85.5
6	0.286	11880	3.1	19.7	98.5
7	0.312	13930	3.6	22.2	111
8	0.344	15900	4	23.8	119
9	0.336	18100	4.5	25.8	129
10	0.35	20200	4.6	27.2	136
11	0.37	22460	5	28	140
12	0.384	24540	5.6	29.6	148
12.6	0.38	25760	5.8	29.8	149

Tabel 30: Mootori NSR3023 [39] mõõtetulemused.

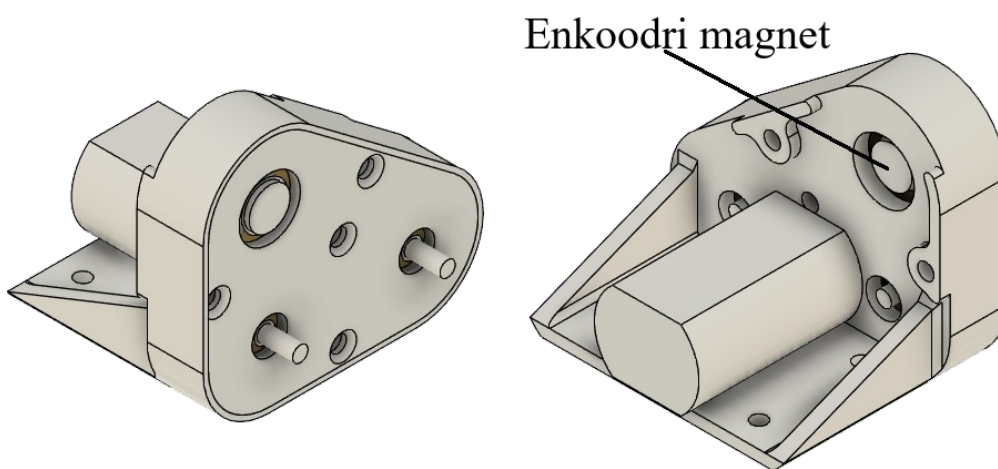
Toitepinge U [V]	Vaba jooksu voolutarve I_{NL} [A]	Pöörlemis- sagedus n [RPM]	Maksimaalne voolutarve I_{MAX} [A]	Surutud mass m [g]	Pöörde- moment t [g·cm]
1	0.118	1428	0.71	9.3	46.5
2	0.128	3150	1.35	17.9	89.5
3	0.136	4880	1.9	26	130
4	0.150	6680	2.4	34.5	172.5
5	0.164	8410	2.9	42	210
6	0.184	10111	3.1	46	230
7	0.206	11840	3.5	57	285
8	0.232	13500	3.85	62	310
9	0.262	15139	4	65	325
10	0.294	16777	4.5	72	360
11	0.326	18470	4.75	76	380
12	0.368	20059	5	78	390
12.6	0.378	21038	5.1	80	400

Tabel 31: Mootori NSR3027 [40] mõõtetulemused.

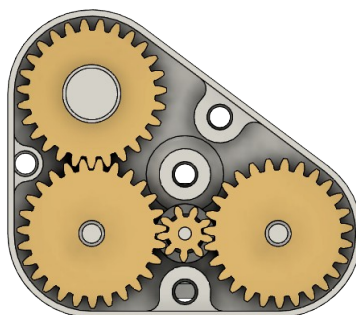
Toitepinge U [V]	Vaba jooksu voolutarve I_{NL} [A]	Pöörlemis- sagedus n [RPM]	Maksimaalne voolutarve I_{MAX} [A]	Surutud mass m [g]	Pöörde- moment t [g·cm]
1	0.192	2114	1	10.8	54
2	0.27	4460	1.95	22	110
3	0.396	6700	2.8	32	160
4	0.562	8800	3.4	41	205
5	0.76	10870	4.4	48.7	243.5
6	0.98	12840	4.6	55	275
7	1.244	14660	5	56	280
8	1.5	16380	5.5	67	335
9	1.778	18080	6	75	375
10	1.9	20200	6	80	400
11	2	22125	6.5	90	450
12	2.2	24727	9.9	90	450
12.6	2.7	-	9.9	75	375

Lisa 5 – Vadim Kokurini poolt tehtud ülekanne

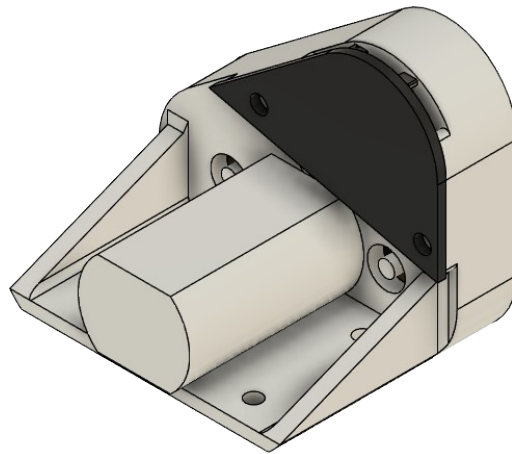
Enkoodri trükkplaati (Joonis 39), mis esialgselt oli loodud Vadim Kokurini ülekandele (Joonised 37, 38, 39) võib näha peatükist Lisa 7. Ülekandes on suurel hammasrattal 27 hammast ja väiksel hammasrattal 9 hammast. Seega ülekanne teguriks tuleb 27:9 ehk 3:1.



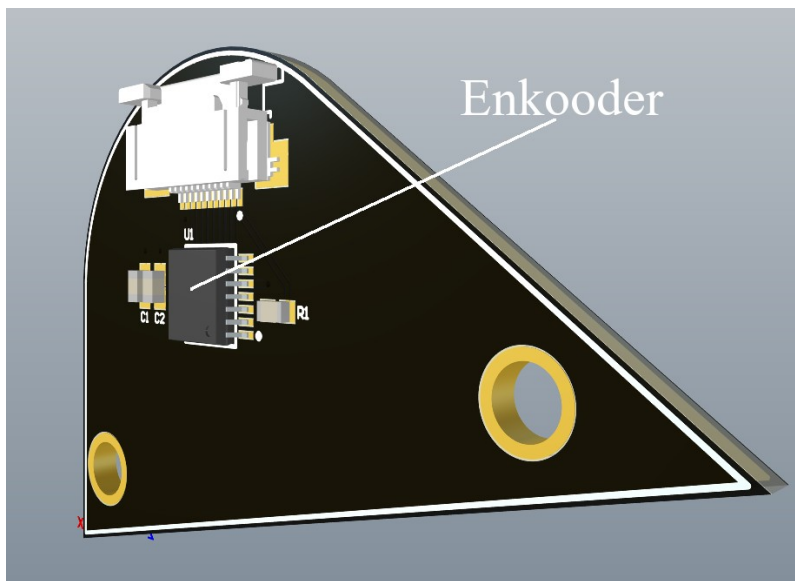
Joonis 37: Kuvatõmmised Vadim Kokurini poolt tehtud ülekanne 3D mudelist.



Joonis 38: Vadim Kokurini ülekanne hammasrattad.



Joonis 39: Vadim Kokurini ülekanne koos enkoodri trükkplaadiga.



Joonis 40: 3D vaade enkoodritrükkplaadile.

Lisa 6 – Turbiinide efektiivsustesti mõõtetulemused

Kõik andmed on saadud mõõtmise teel. Toitepinge ESC-idele oli 12.6 V ning kaugus leetri ja kaalu vahel oli 120 mm (Joonis 11).

Tabel 32: OFLY+AEO ESC (40%) mõõtetulemused.

Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	5	0.54
20	20	1.70
30	29	2.84
40	38	3.34

Tabel 33: OFLY+QX ESC (40%) mõõtetulemused.

Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	0	0.02
20	5	0.59
30	16	1.26
40	25	1.97

Tabel 34: OFLY+ZTW ESC (60%; turbiin põles läbi) mõõtetulemused.

Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	0	0.02
20	5	0.65
30	19	1.43
40	27	2.15
50	33	2.78
60	40	3.34

Tabel 35: AEORC+AEORC ESC (100%) mõõtetulemused.

Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	3.8	0.88
20	12.7	3.35
30	18.2	5.10
40	24.5	7.80
50	30	10.10
60	40	14.70
70	40	15.09
80	40	15.04
90	40	15.04
100	40	15.00

Tabel 36: QXMOTOR+QX ESC (100%) mõõtetulemused.

Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	0	0.02
20	4	0.52
30	9	1.32
40	13.8	2.22
50	16.7	3.00
60	20	3.80
70	23	4.53
80	26	5.32
90	34	7.18
100	35	7.72

Tabel 37: QXMOTOR+ZTW ESC (100%) mõõtetulemused.

Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	0	0.02
20	4.4	0.58
30	9.6	1.50
40	14	2.70
50	19	3.45
60	22	4.28
70	25	5.04
80	28	5.73
90	34	7.53
100	35	7.54

Tabel 38: QXMOTOR+AEO ESC (100%) mõõtetulemused.

Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	3	0.43
20	9	1.42
30	14.5	2.83
40	17	3.32
50	21	4.30
60	25	5.40
70	27.5	6.10
80	33	7.37
90	33	7.54
100	33	7.52

Tabel 39: AEORC+ZTW ESC (60%; turbiin kiilus kinni) mõõtetulemused.

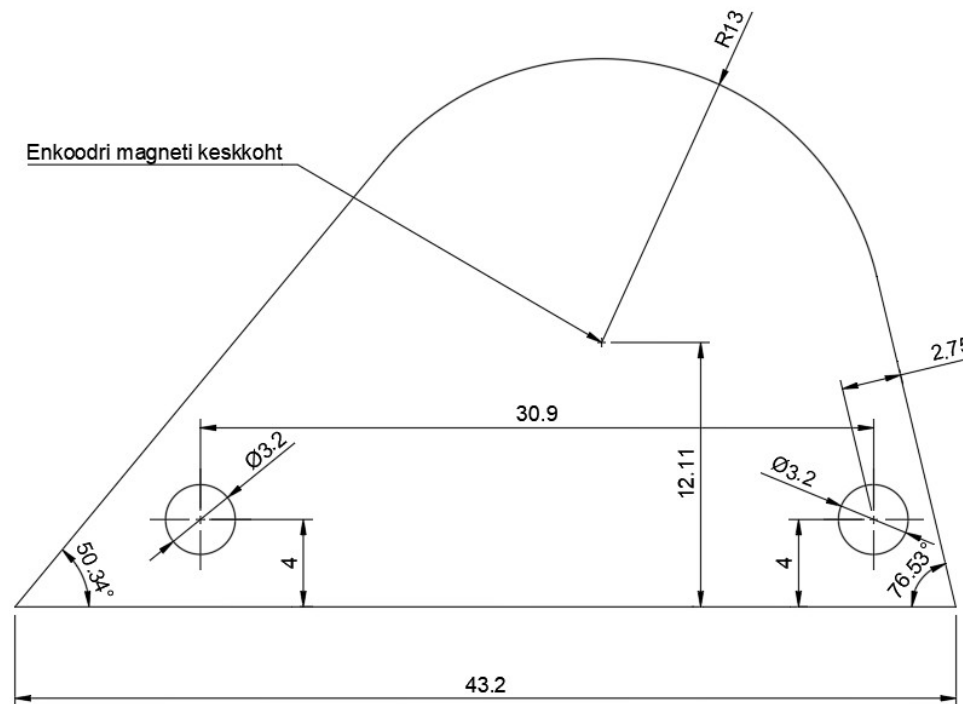
Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	0	0.02
20	4.7	1.08
30	12	3.00
40	18.5	5.07
50	23	7.00
60	28	9.00

Tabel 40: AEORC+QX ESC (100%) mõõtetulemused.

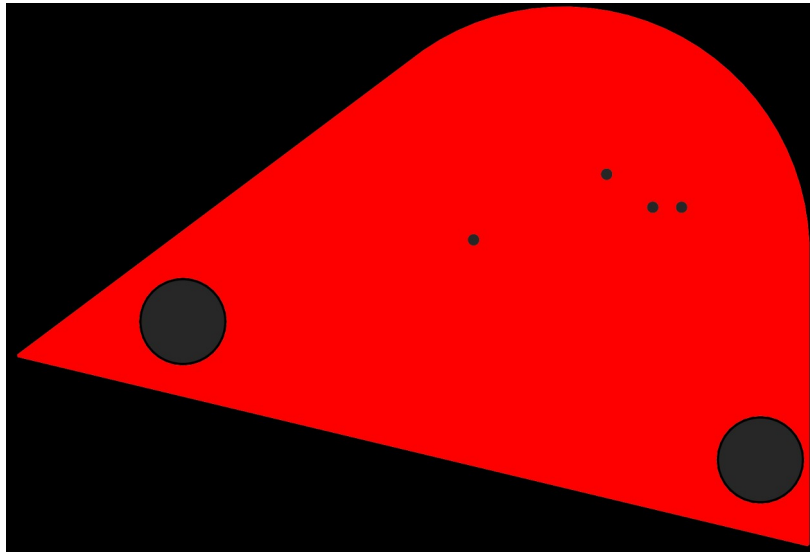
Juhtimissignaali [%]	Tõmme m [g]	Voolutarve I [A]
0	0	0.02
10	0	0.02
20	4.3	1.04
30	10.5	2.70
40	15.8	4.45
50	20	6.08
60	24.5	7.70
70	28.5	9.36
80	34	11.70
90	41	15.60
100	43	16.70

Lisa 7 – Enkoodri trükkplaat ja elektriskeem

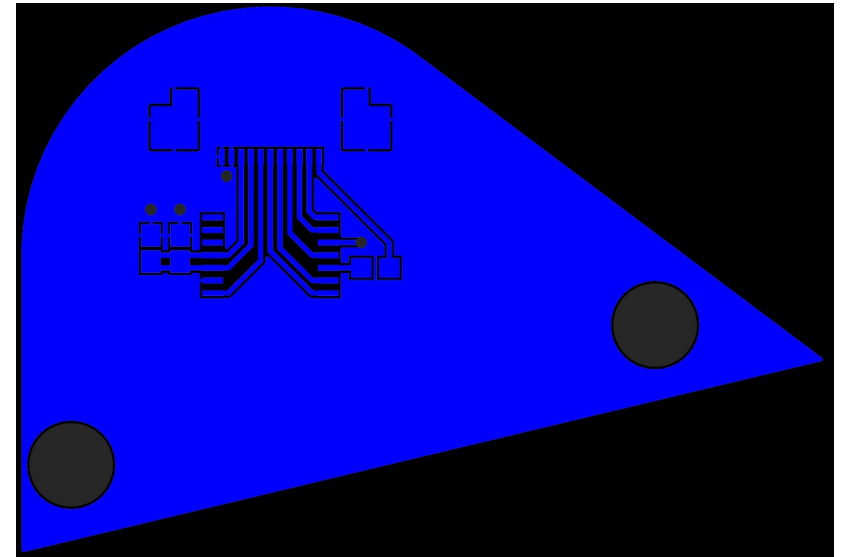
Joonesensori trükkplaadi mehaaniliset infot võib näha Jooniselt 41; kihte võib näha Joonistelt 42, 43, 44, 45; 3D vaateid Joonistelt 46, 47; elektriskeemi Jooniselt 48.



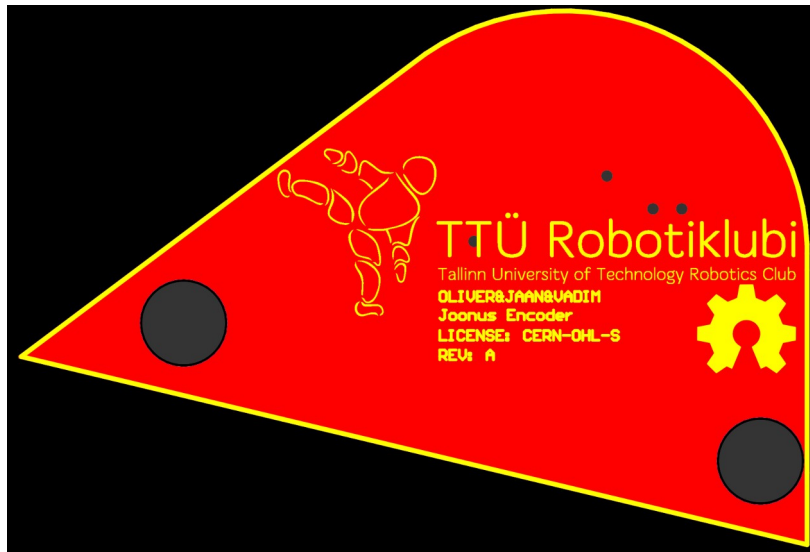
Joonis 41: Enkoodri trükkplaadi mehaaniline joonis (ühikud mm; tehtud Vadim Kokurini etteantud mehaanilise info põhjal)



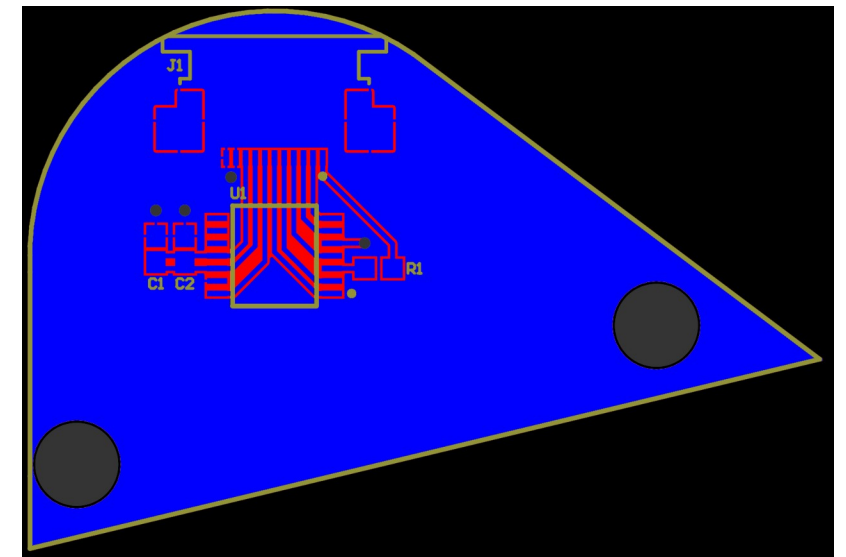
Joonis 42: Enkoodri trükkplaadi peamine kiht.



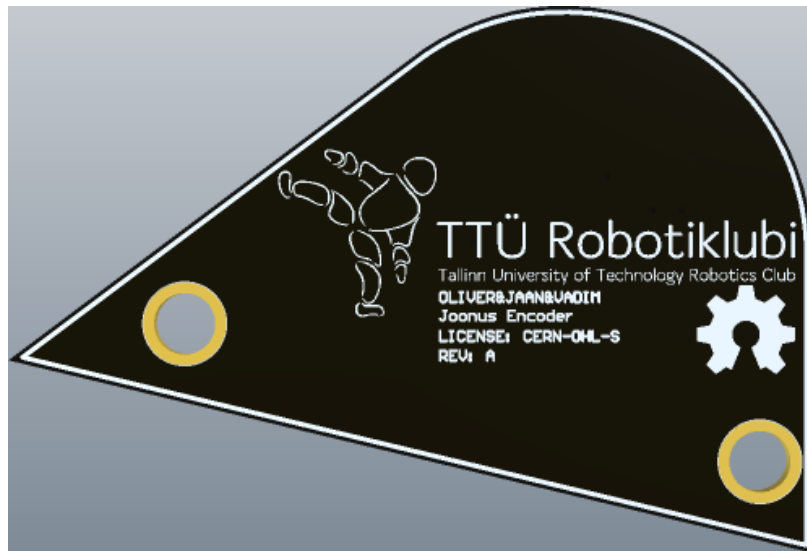
Joonis 43: Enkoodri trükkplaadi alumine kiht.



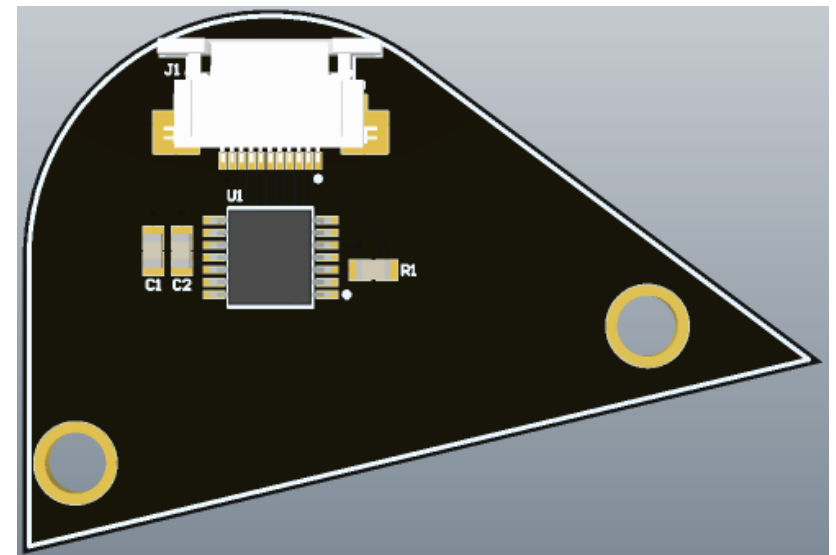
Joonis 45: Enkoodri trükkplaat 2D pealtvaates.



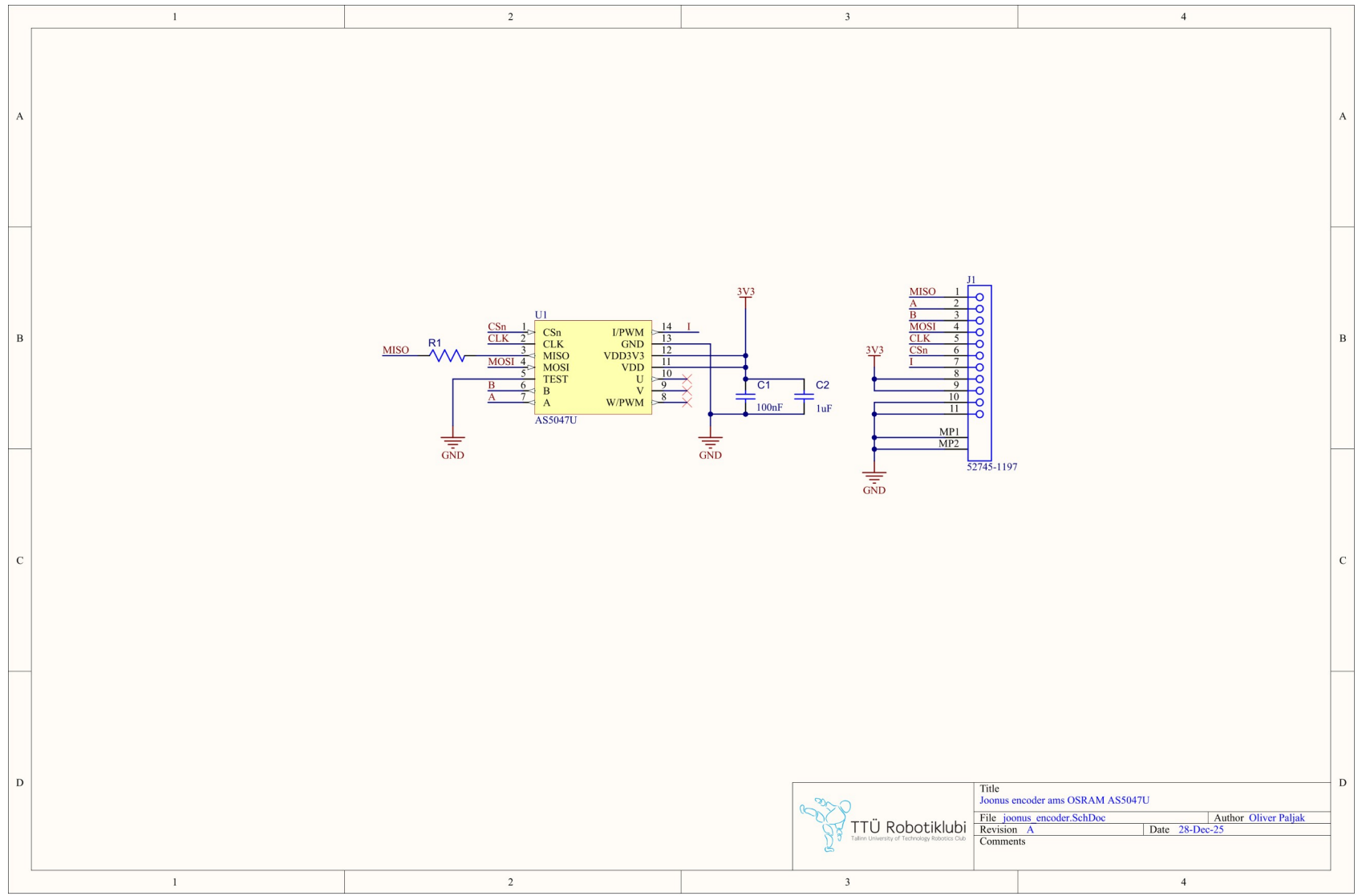
Joonis 44: Enkoodri trükkplaat 2D altvaates.



Joonis 46: Enkoodri trükkplaat 3D pealtvaates.



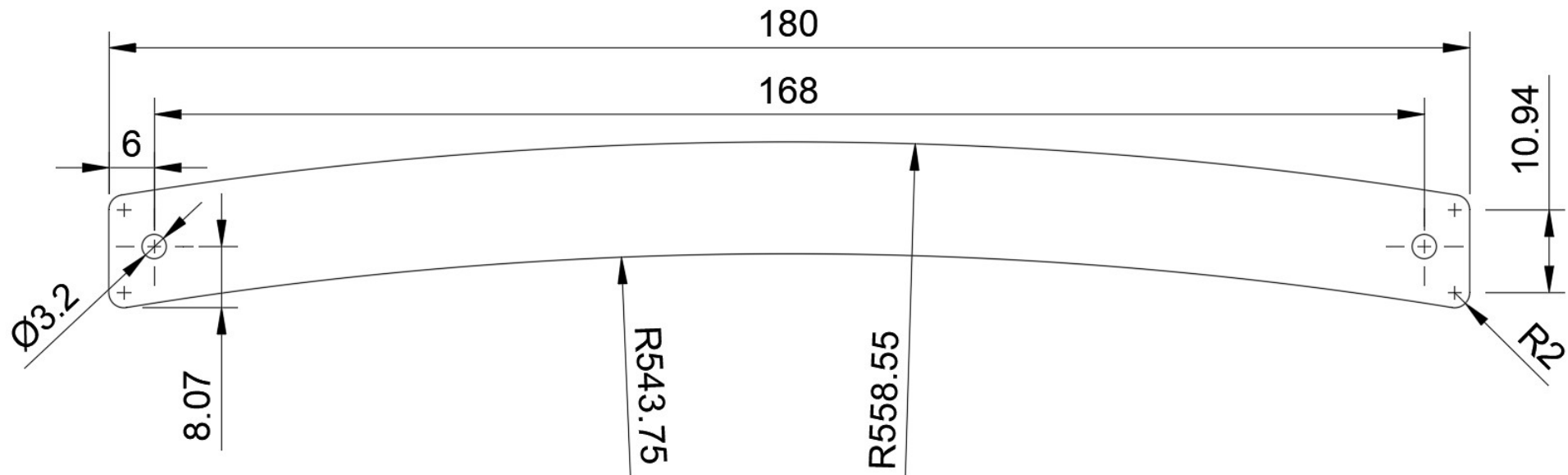
Joonis 47: Enkoodri trükkplaat 3D altvaates.



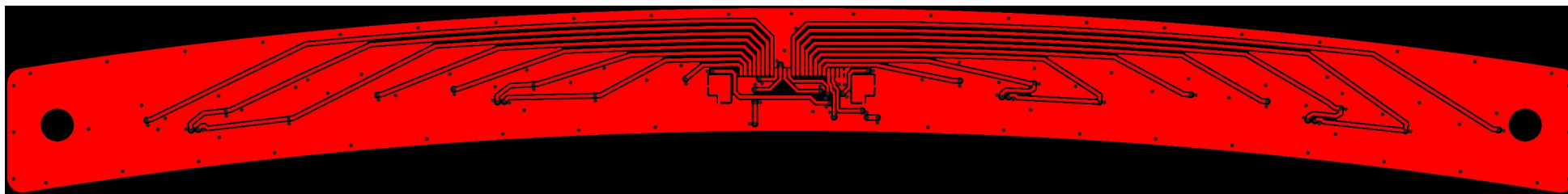
Joonis 48: Enkoodri elektriskeem.

Lisa 8 – Joonesensori trükkplaat ja elektriskeem

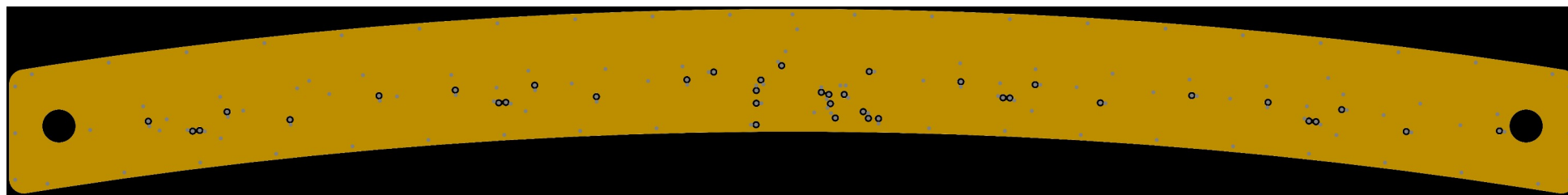
Joonesensori trükkplaadi mehaaniliset infot võib näha Jooniselt 49; kihte võib näha Joonistelt 50, 51, 52, 53, 54, 55; 3D vaateid Joonistelt 56, 57; elektriskeemi Joonistelt 58, 59.



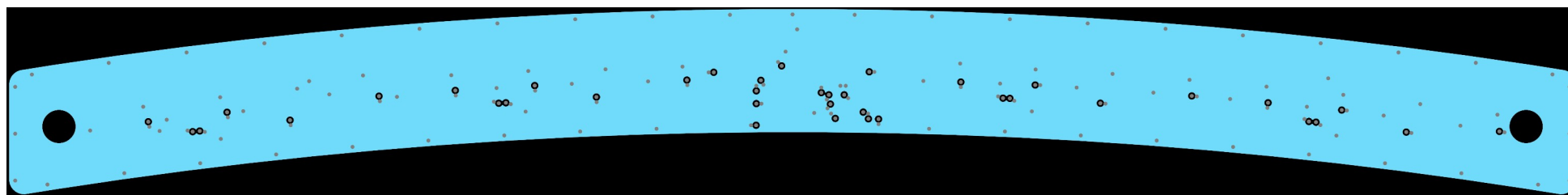
Joonis 49: Joonesensori trükkplaadi mehaaniline joonis (ühikud mm).



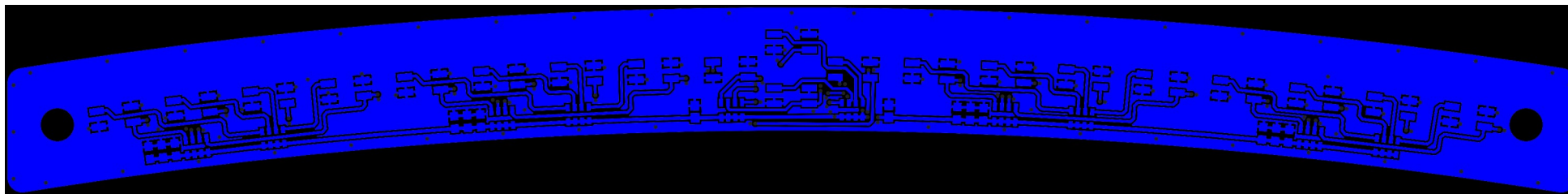
Joonis 50: Joonesensori trükkplaadi peamine kiht.



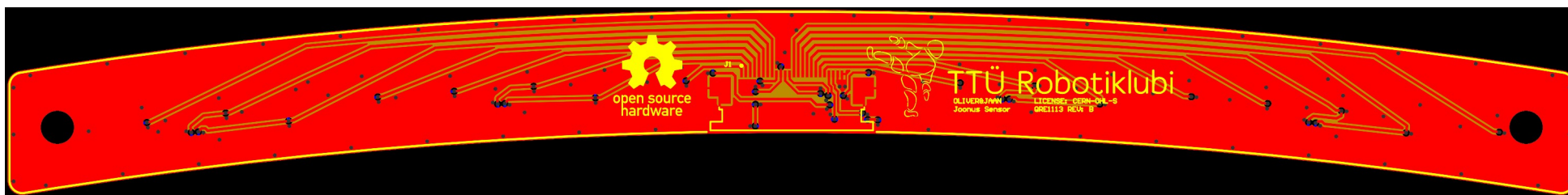
Joonis 51: Joonesensori trükkplaadi esimene sisemine kiht



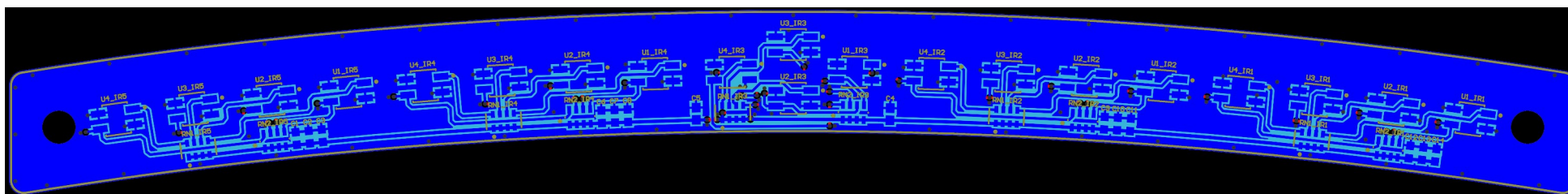
Joonis 52: Joonesensori trükkplaadi teine sisemine kiht.



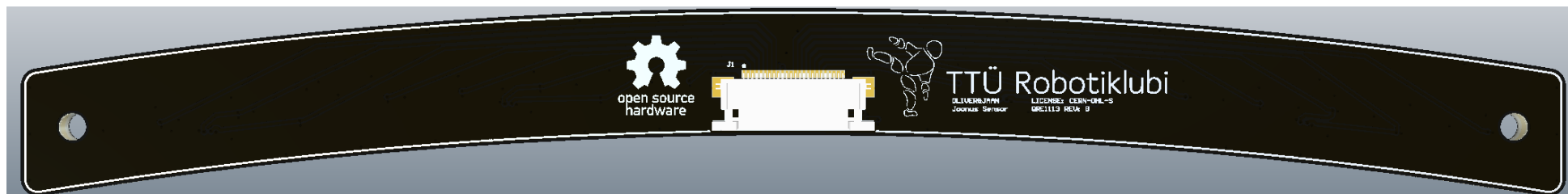
Joonis 53: Joonesensori trükkplaadi alumine kiht.



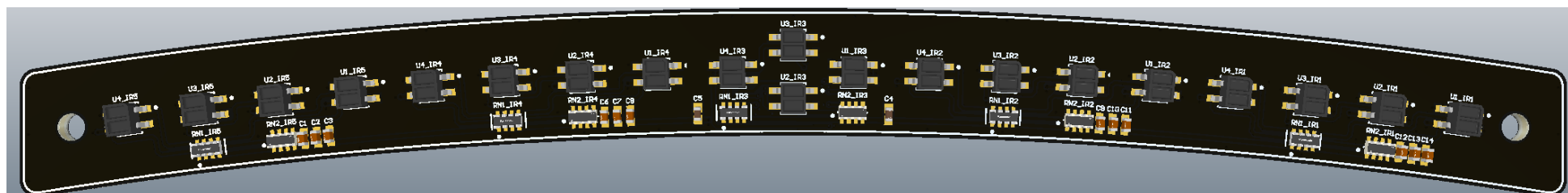
Joonis 54: Joonesensori trükkplaat 2D pealtvaates.



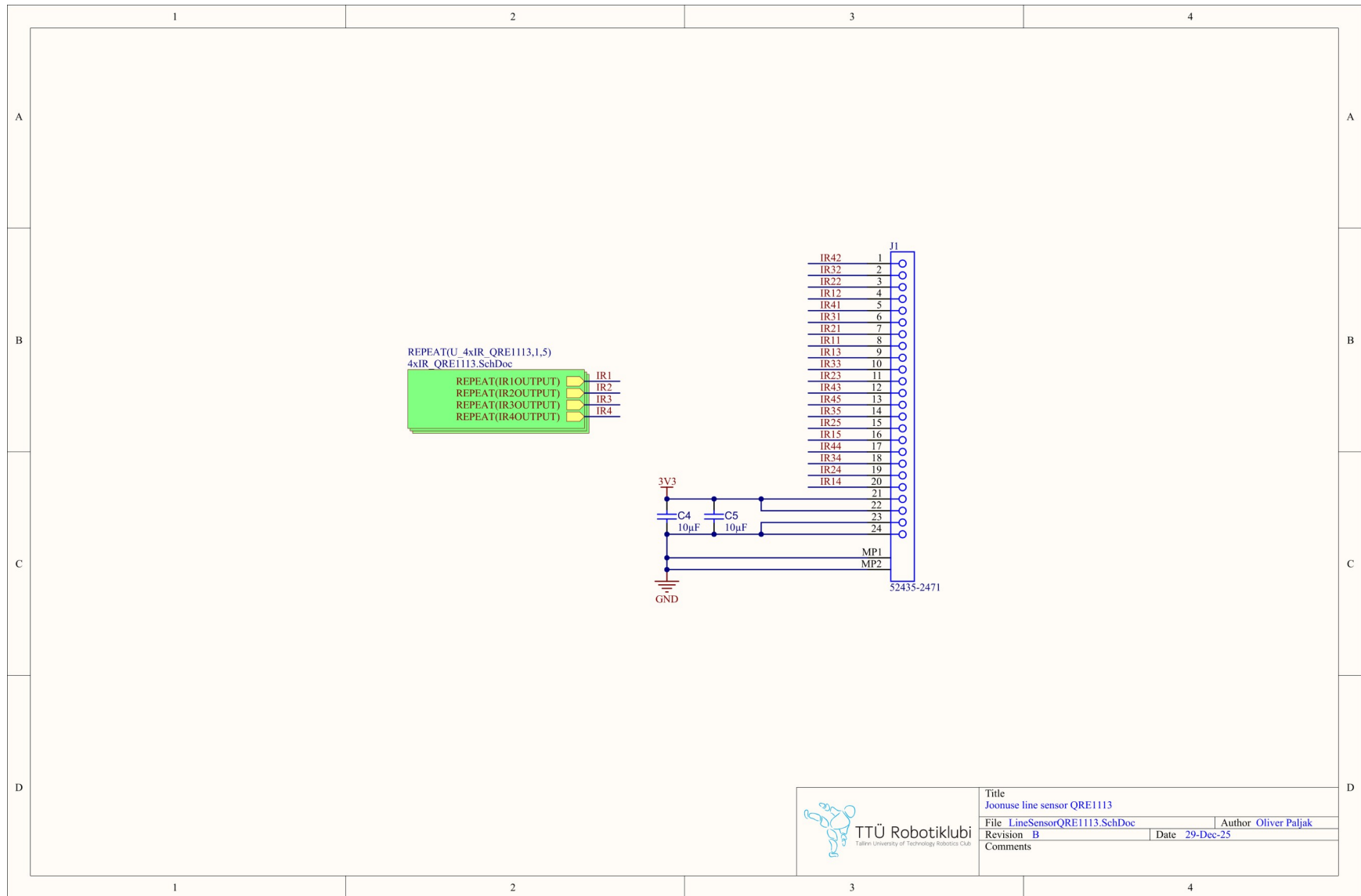
Joonis 55: Joonesensori trükkplaat 2D altvaates.



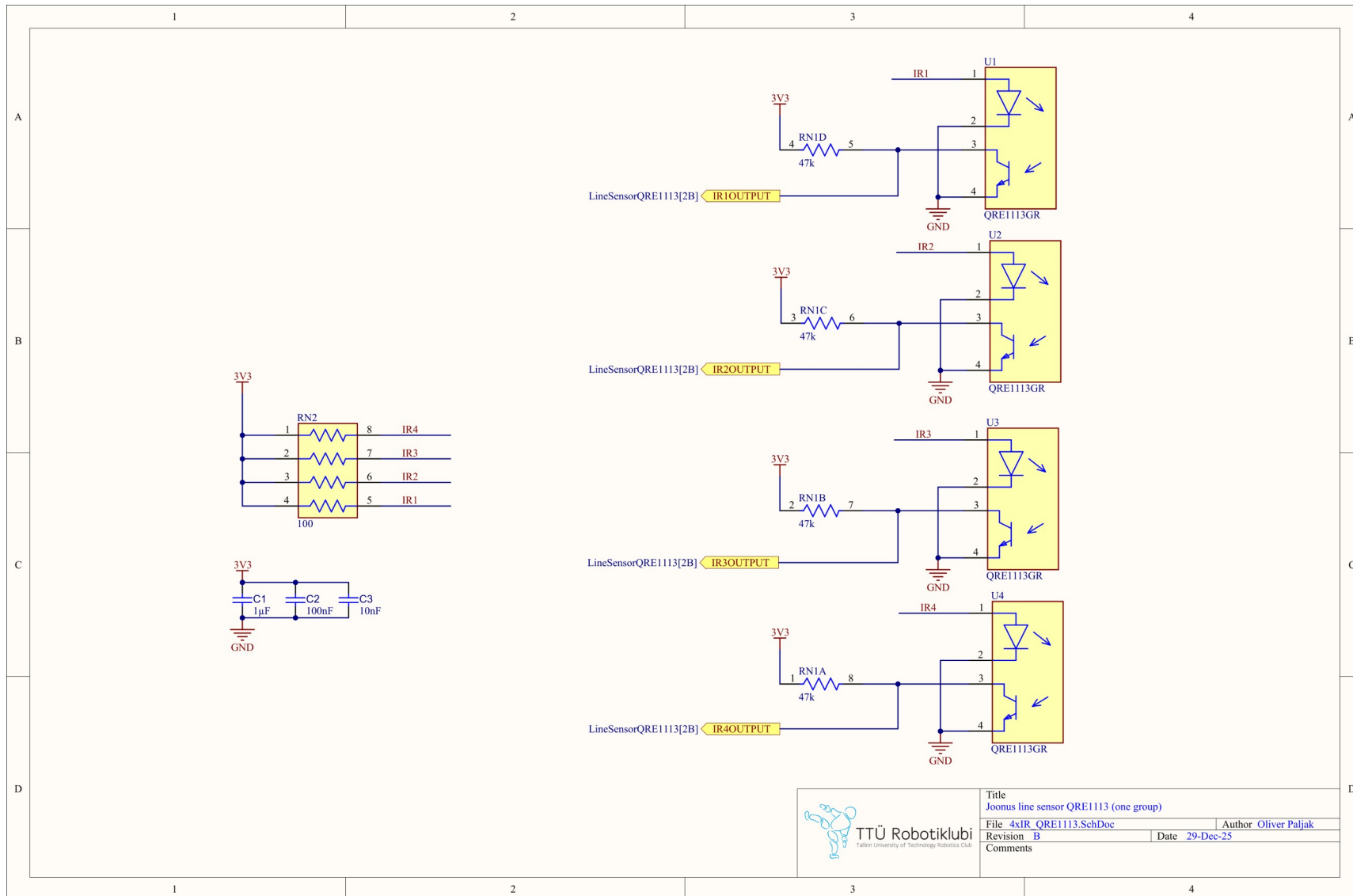
Joonis 56: Joonesensori trükkplaat 3D pealtvaates.



Joonis 57: Joonesensori trükkplaat 3D altvaates.



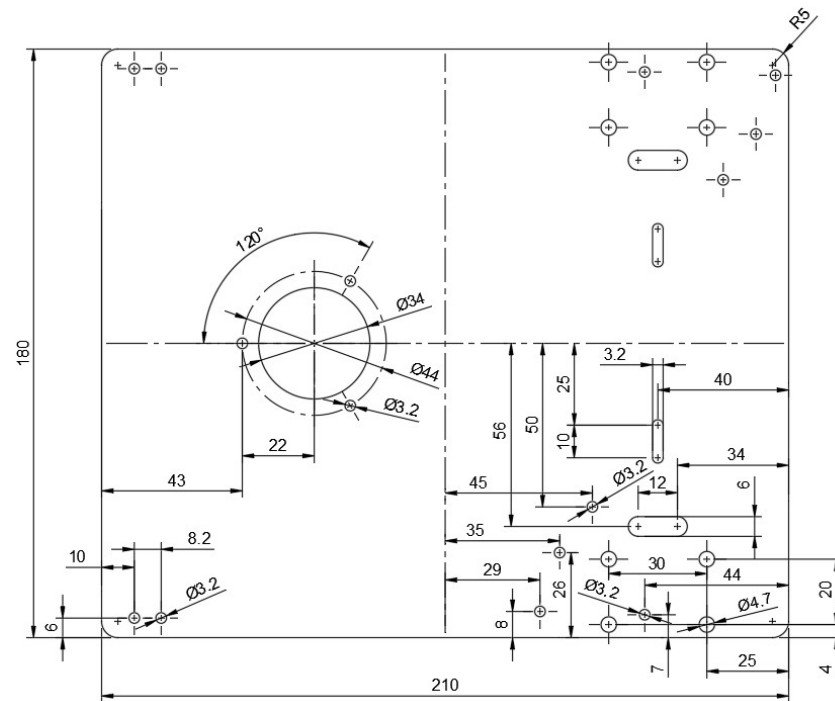
Joonis 58: Joonesensori elektriskeem lk 1.



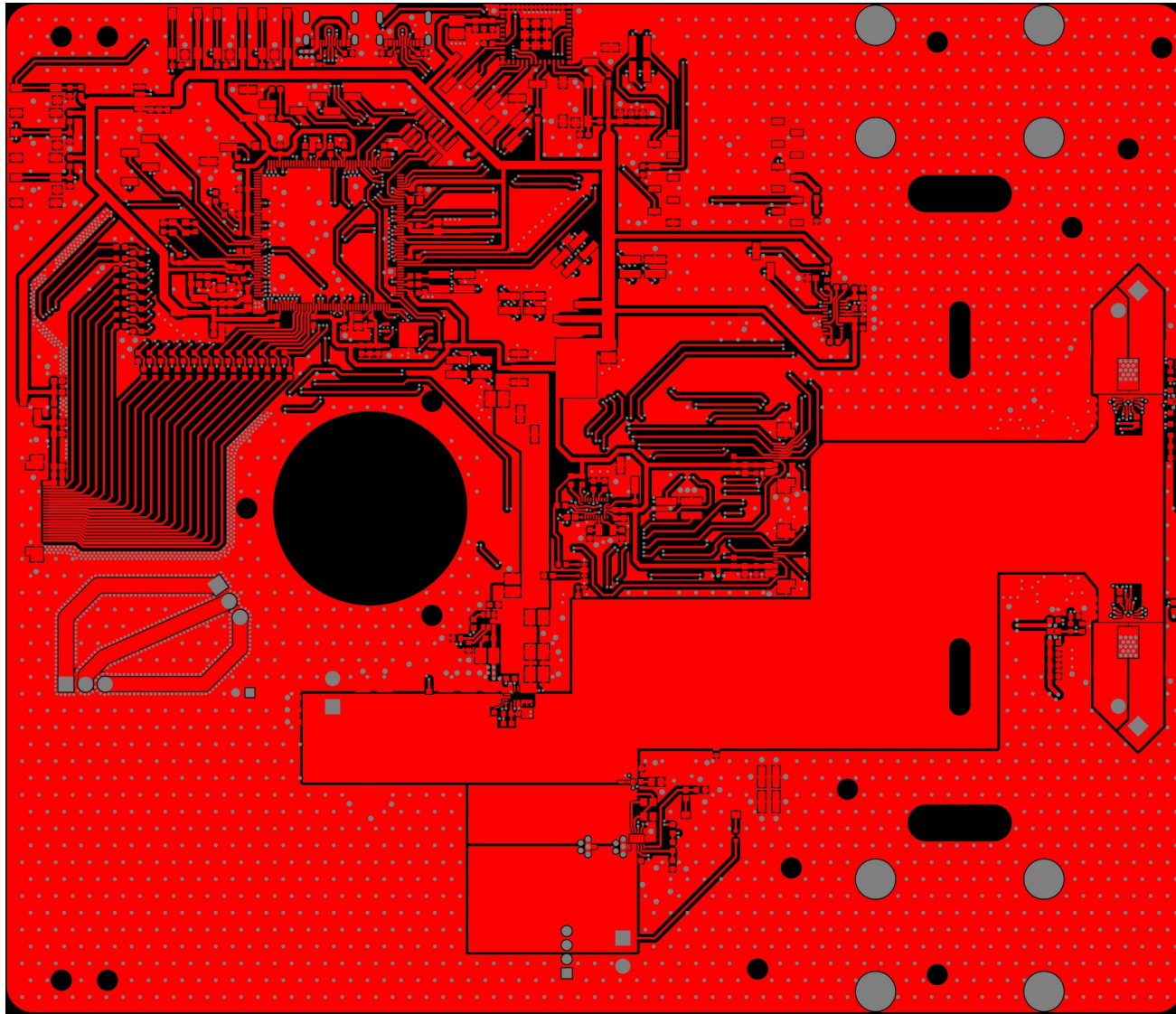
Joonis 59: Joonesensori elektriskeem lk 2.

Lisa 9 – Põhiplaadi trükkplaat ja elektriskeem

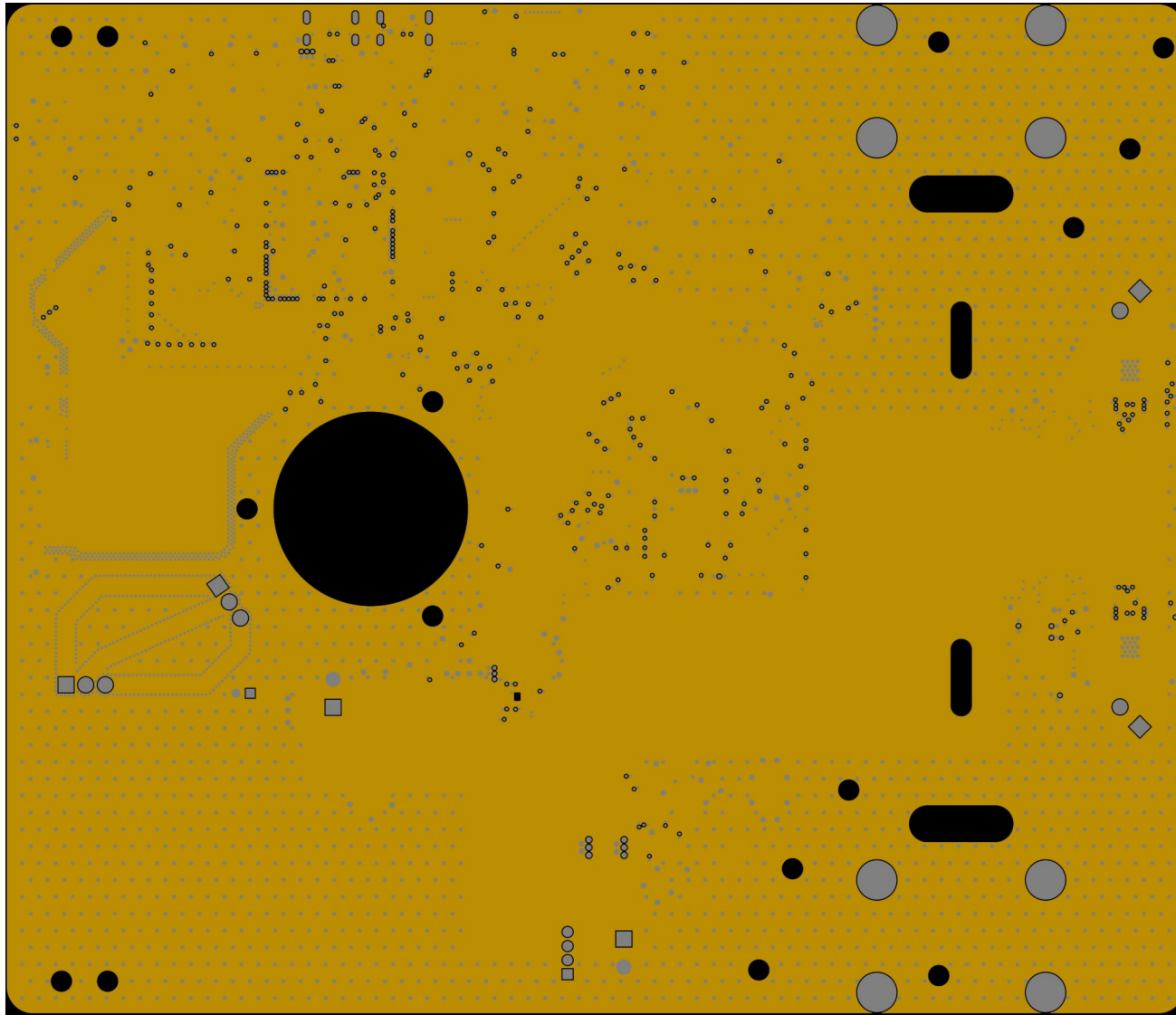
Põhitrükkplaadi mehaanilist infot võib näha Jooniselt 60; kihte võib näha Joonistelt 61, 62, 63, 64, 65, 66; 3D vaateid Joonistelt 67, 68; elektriskeemi Joonistelt 69, 70, 71.



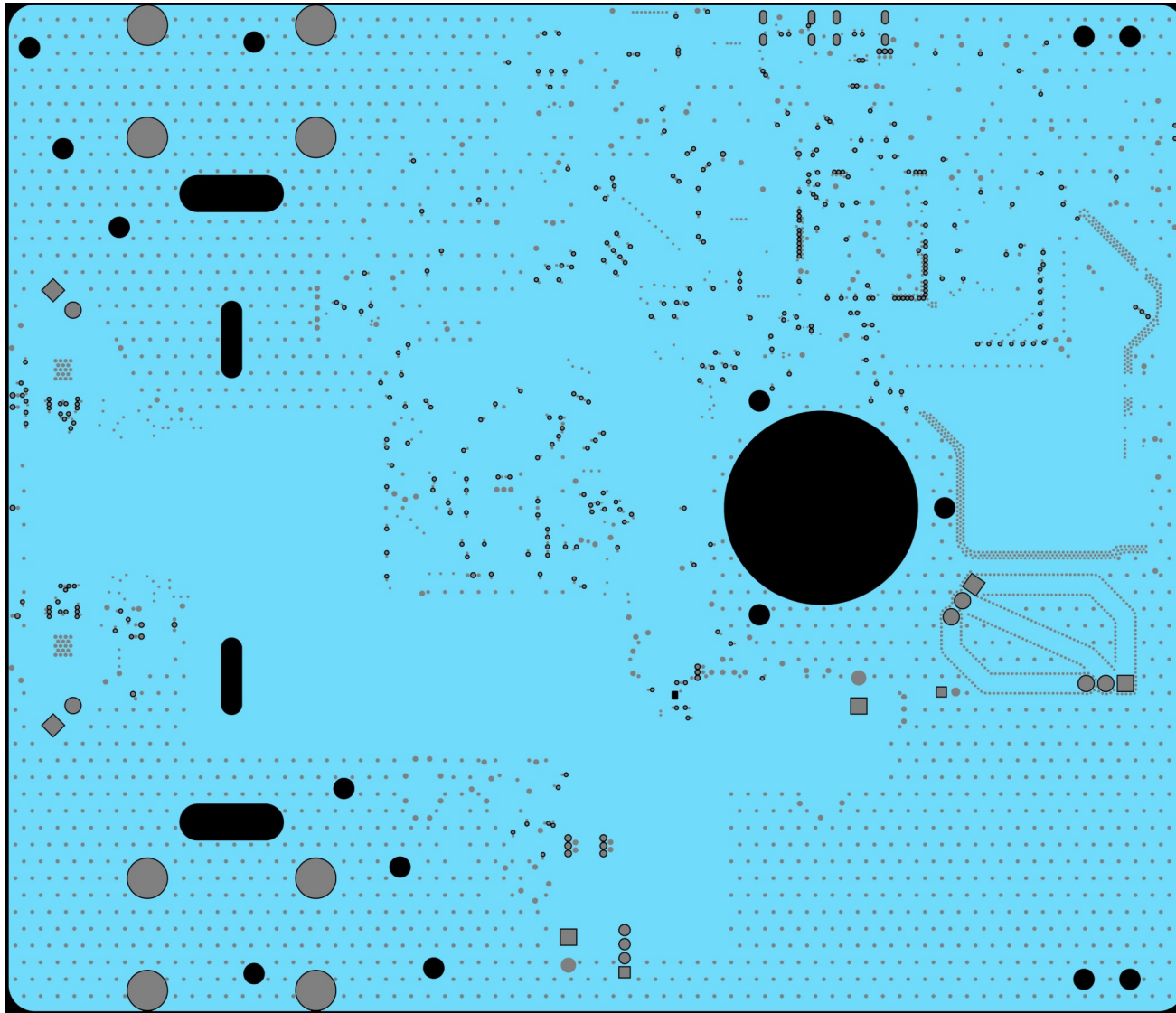
Joonis 60: Põhitrükkplaadi mehaaniline joonis (ühikud mm).



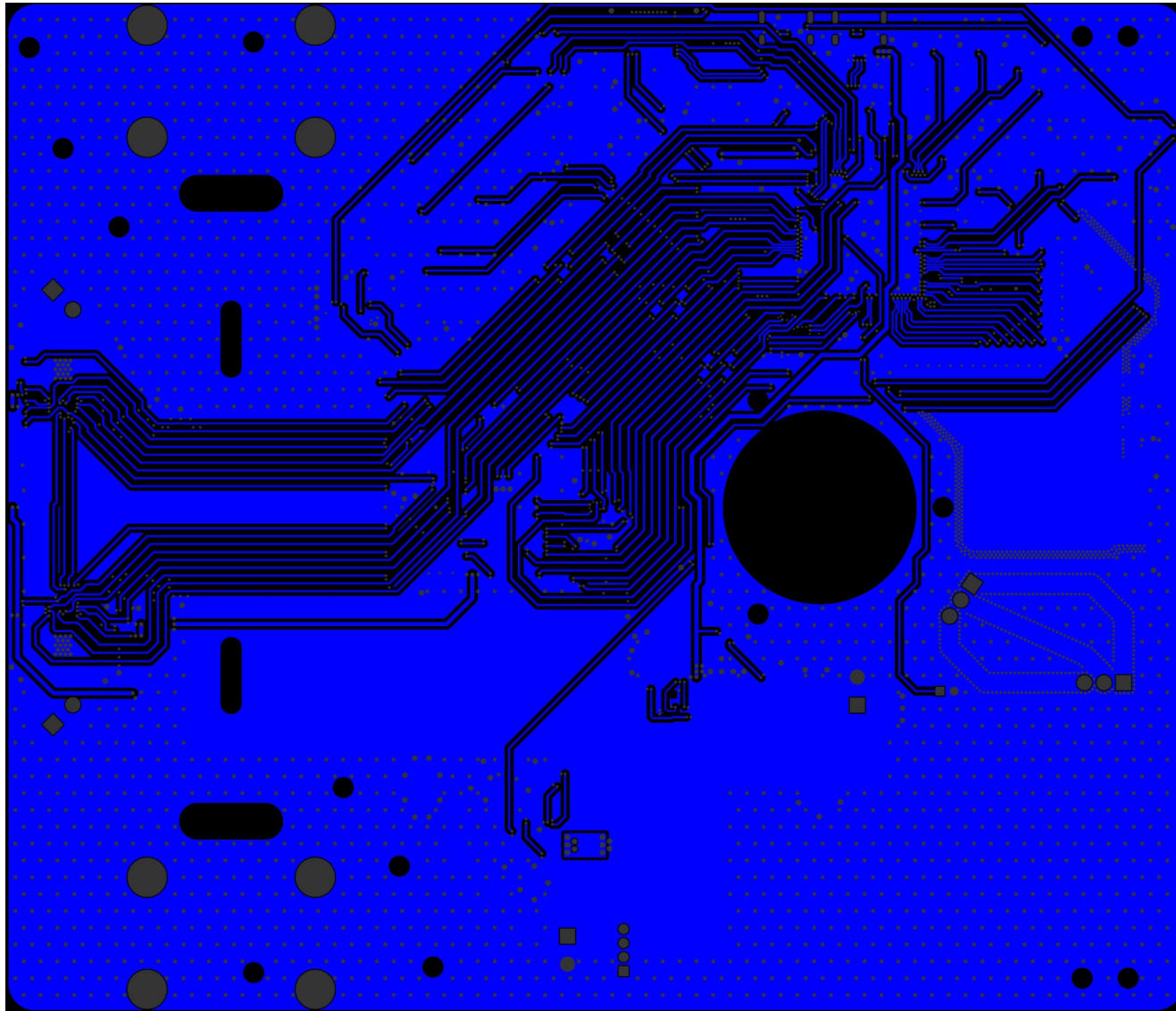
Joonis 61: Põhitrukkplaadi peamine kiht.



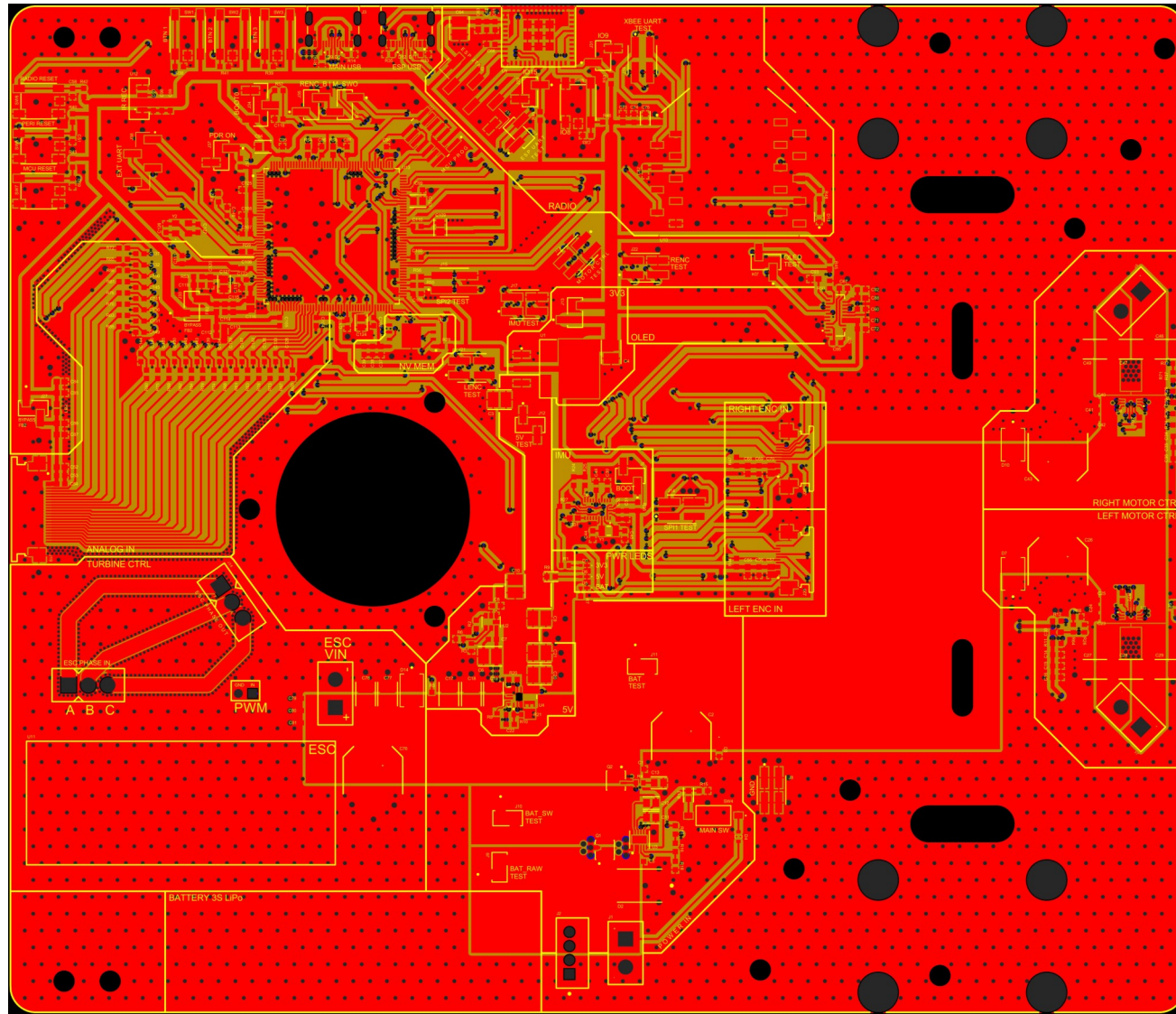
Joonis 62: Põhitrukkplaadi esimene sisemine kiht.



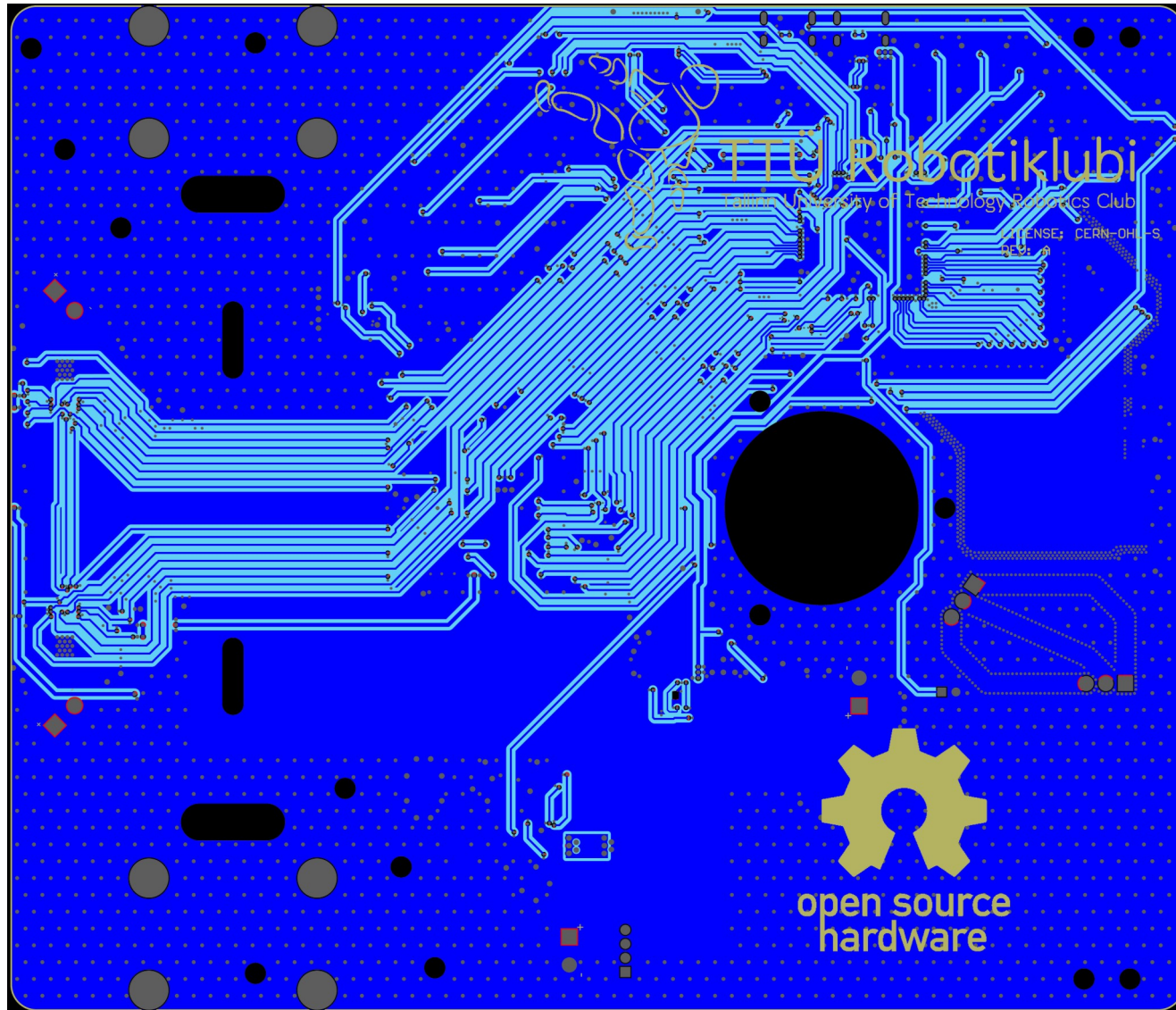
Joonis 63: Põhitrukkplaadi teine sisemine kiht.



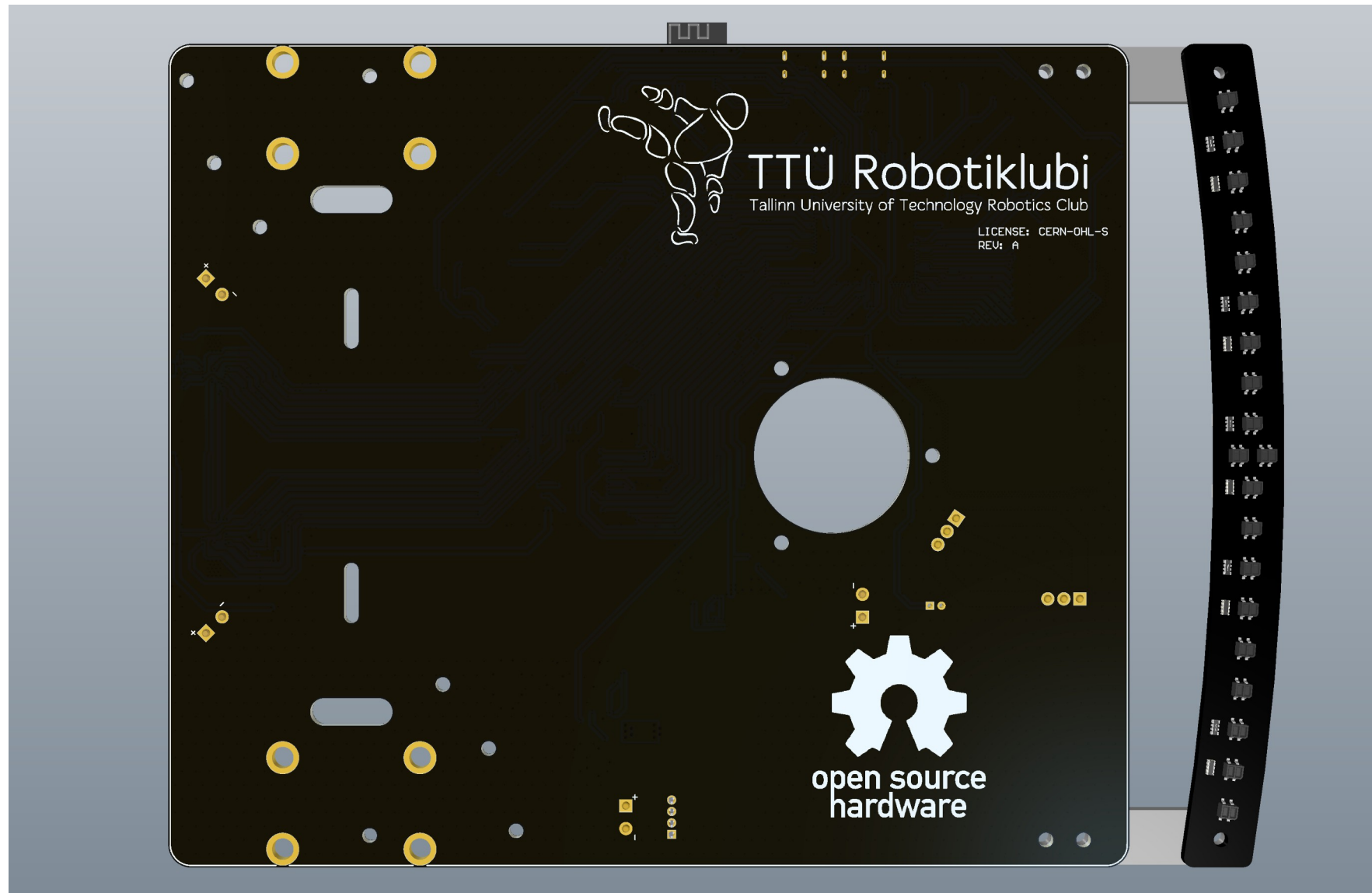
Joonis 64: Põhitrukkplaadi alumine kiht.



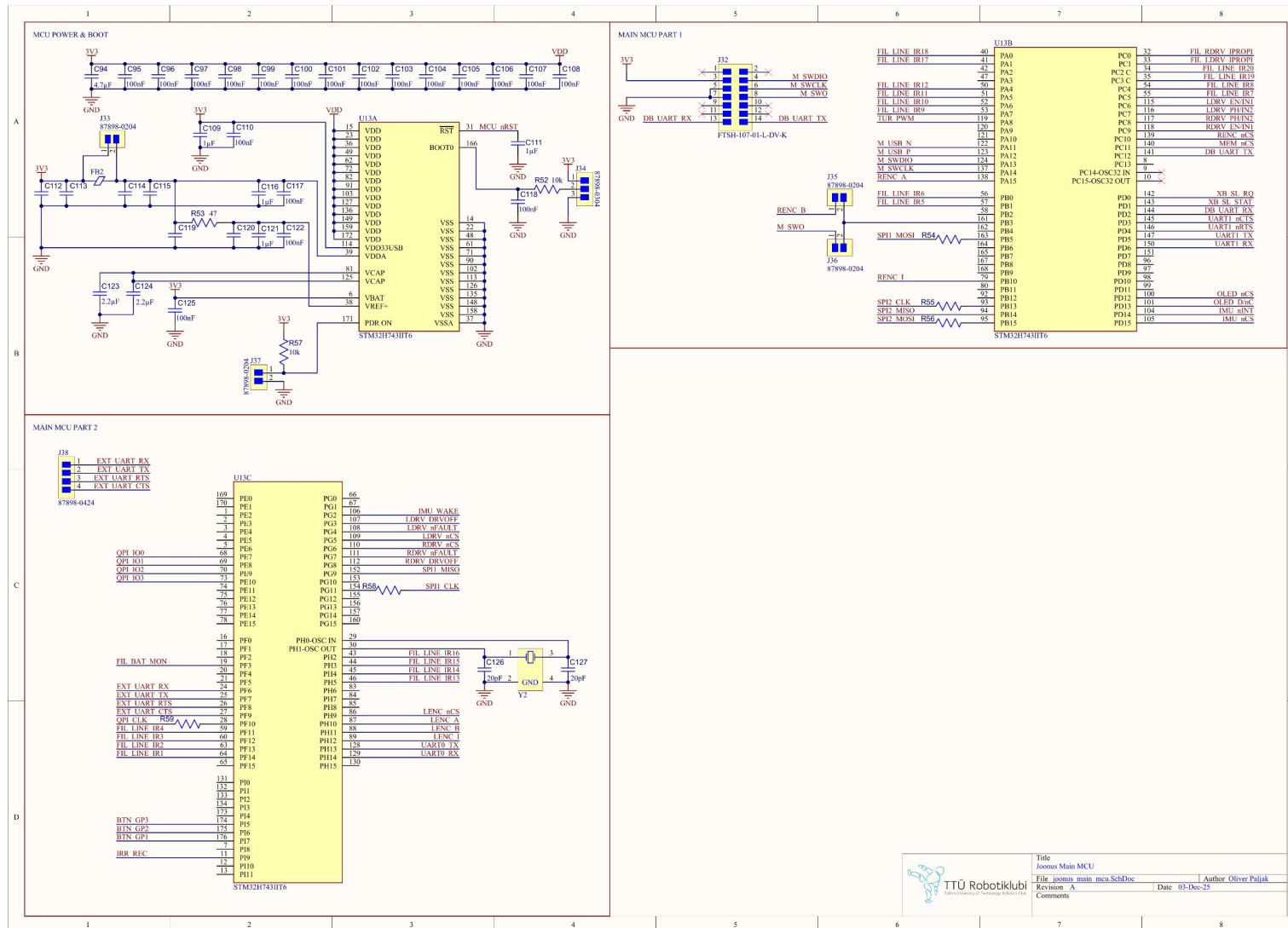
Joonis 65: Põhitrukkplaadi 2D ülaltvaade.



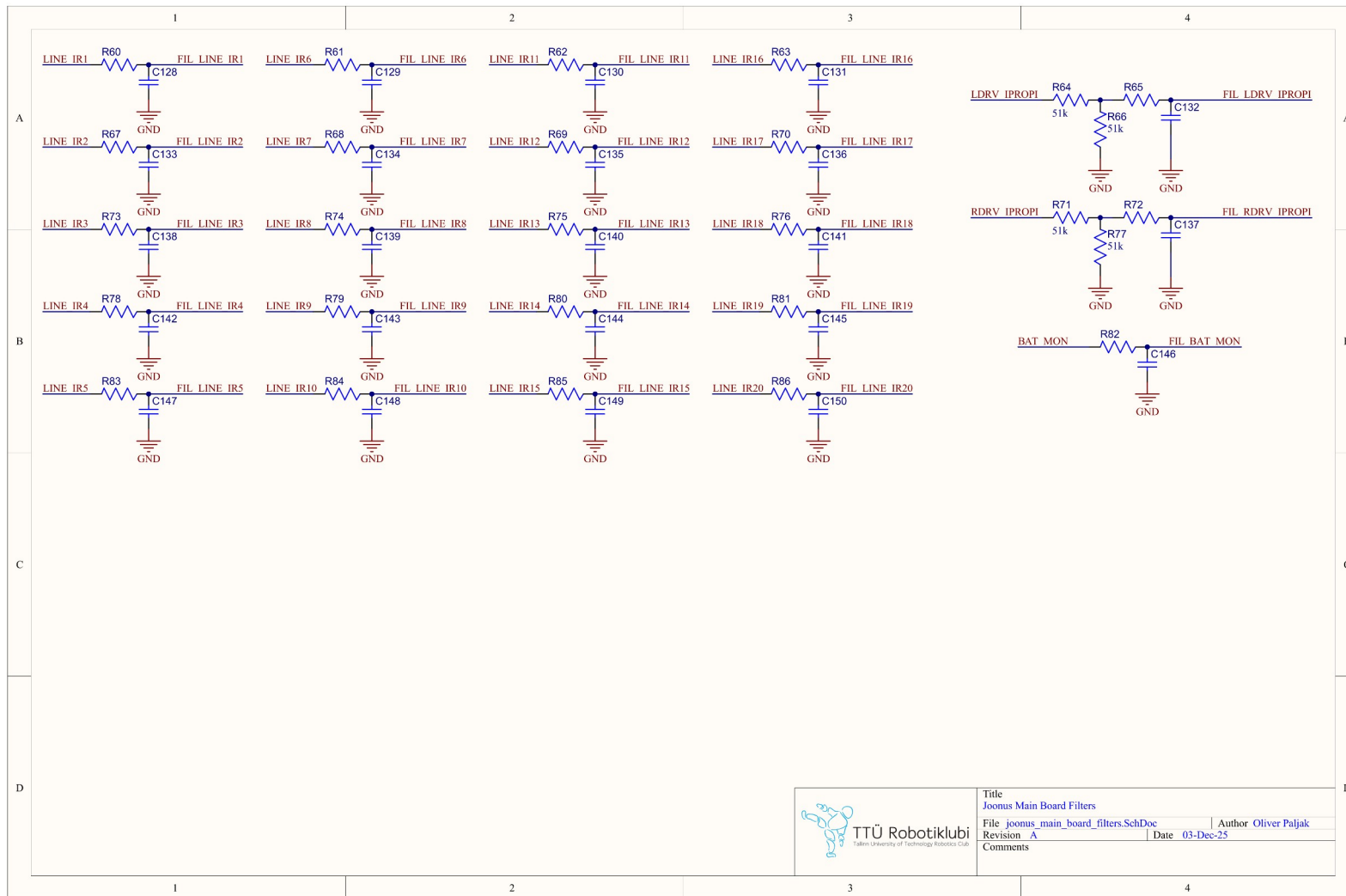
Joonis 66: Põhitrukkplaadi 2D altvaade.



Joonis 68: Põhitrukplaadi 3D altvaade koos joonesensoriga.



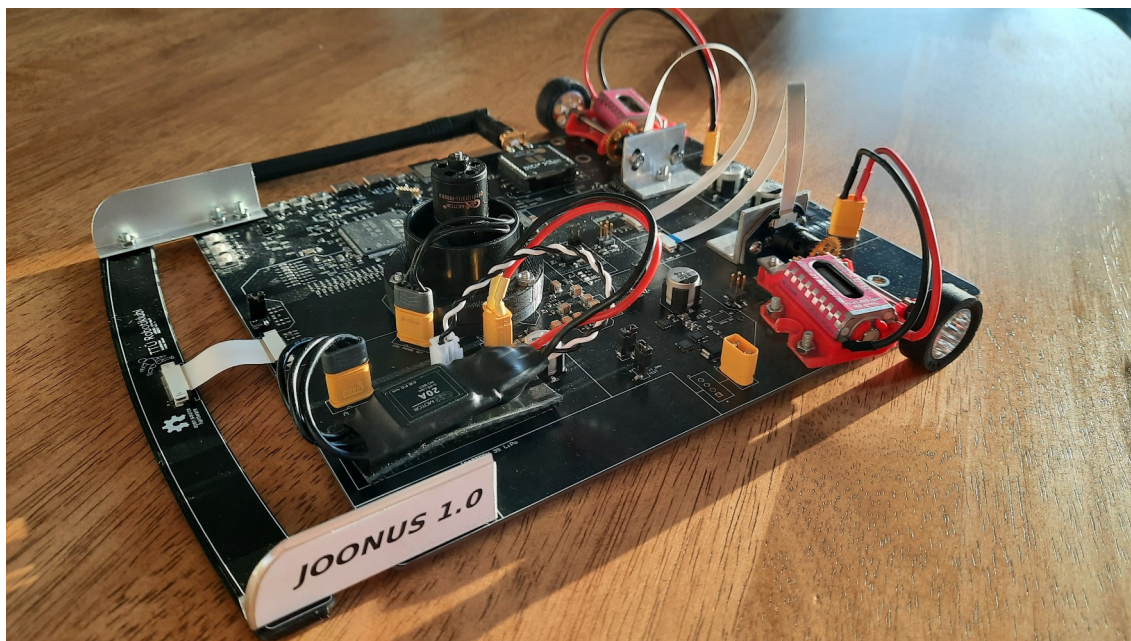
Joonis 70: Põhiplaadi elektriskeem lk 2.



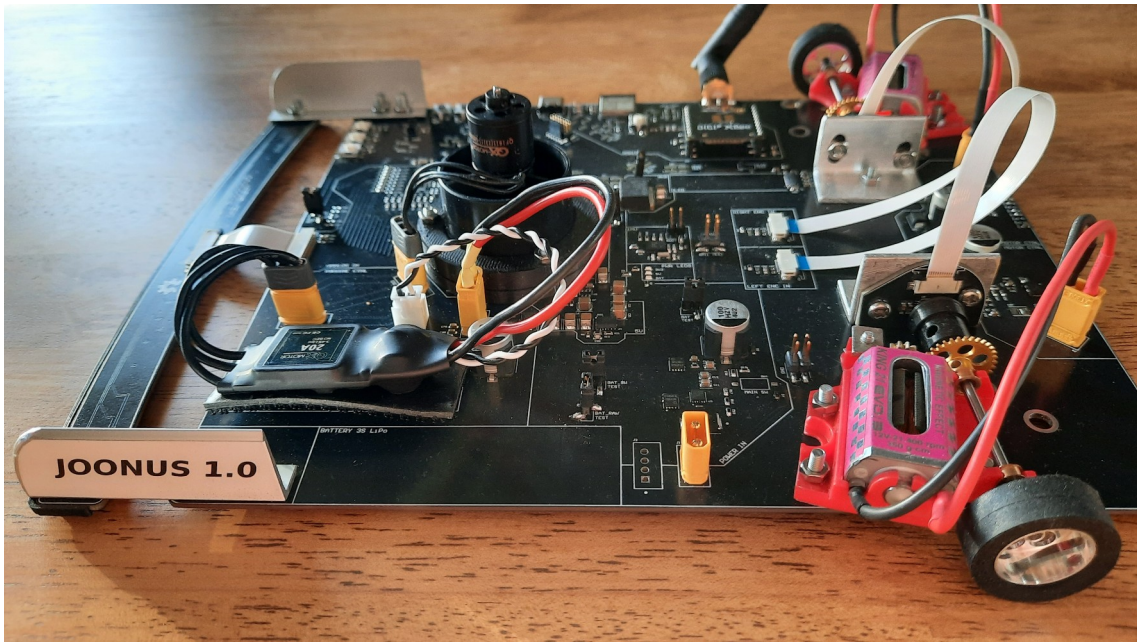
Joonis 71: Põhiplaadi elektriskeem lk 3.

Lisa 10 – Pildid kokkupandud robotist

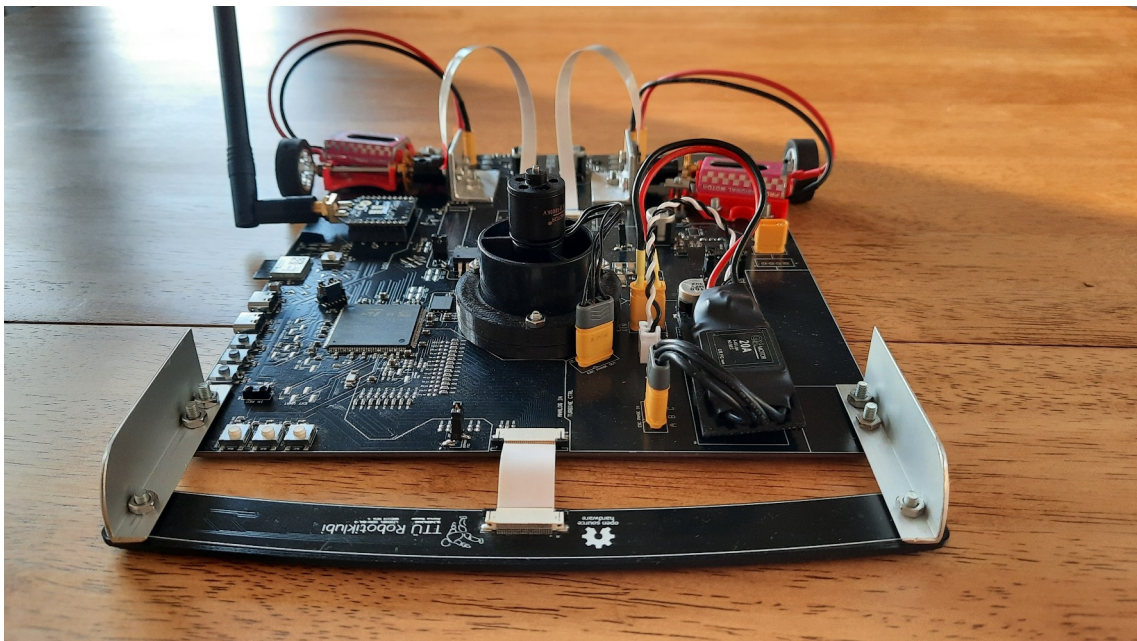
Kokkupandud roboti pilte võib näha Joonistelt 72, 73 ja 74.



Joonis 72: Robot Joonus (pilt 1).



Joonis 73: Robot Joonus (pilt 2).



Joonis 74: Robot Joonus (pilt 3).