

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Karoliina Rebane 192868IACB

***Folkrace* võistlusroboti elektroonika arendus**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Ivo Mürsepp
PhD

Tallinn 2024

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: Karoliina Rebane

17.05.2024

Annotatsioon

Bakalaureusetöö ülesandeks oli välja töötada elektroonika autonoomsele võidusõidurobotile. Robot pidi vastama Robotex International *Folkrace* võistlusreeglites kehtestatud nõuetele.

Töö raames koostati kaks prototüüpi. Esimese versiooni koostamisel lähtuti sellest, et süsteem oleks kompaktne ja prototüüpimine oleks võimalikult lihtne. Esimese prototüübi koostamine oli edukas ning valmis Folkrace robot, mis võistles ka Robotexil. Seejärel analüüsiti puudujääke ning loodi kompaktsema ja mitmekülgsema lahenduse kontseptsioon.

Teise versiooni loomisel oli kõige olulisemaks süsteemi integreeritus ehk kõigi komponentide ühele trükkplaadile paigutamine. Tähelepanu pöörati sellele, et süsteem oleks kergemini silutav ning lisati mõned uued funktsionaalsused. Moodulkomponendid asendati ning leiti lahendus kaugusandurite ühendamiseks kompaktsemal viisil. Disainiti trükkplaat, kuid praktilist testimist leidud lahendused ei läbinud.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 73 leheküljel, 6 peatükki, 13 joonist, 4 tabelit.

Abstract

Development of Electronics for *Folkrace* Competition Robot

The goal of the bachelor's thesis was to develop an electronics system for an autonomous racing robot. The robot had to comply with the requirements set in Robotex International *Folkrace* competition rules.

Two prototypes were developed as part of this thesis. In the development of the first version, the focus was on creating a system that is compact and straightforward. The assembly of the first prototype was successful and the *Folkrace* robot also competed in Robotex. The system was analysed, and a concept for a more compact and versatile solution was developed.

When creating the second prototype, the most important aspect was the embedding the system on single printed circuit board. Some new functionalities were also added. Modular components were replaced, and a solution was found for connecting distance sensors in a more compact way. The printed circuit board was completed; however, the solutions were not tested in practical conditions.

The thesis is in Estonian and contains 73 pages of text, 6 chapters, 13 figures, 4 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

CAD	<i>Computer-Aided Design</i> , raalprojekteerimine
DMA	<i>Direct Memory Access</i> , perifeeria/mälu otsene ligipääs
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> , elektriliselt kustutatav programmeeritav kirjutuskaitstud mälu
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> , mitmeotstarbeline sisend/väljund
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> , integraalskeemide vaheline sünkroonne jadaliidese protokoll
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> , integreeritud programmeerimiskeskond
IR sensor	<i>Infrared sensor</i> , infrapunaandur
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> , isoleeritud paisuga väljatransistor
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> , trükkplaat
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> , impulsslaiusmodulatsioon
RPM	<i>Revolutions Per Minute</i> , pöörete arv minutis
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> , staatiline suvapöördusmälu
SWD	<i>Serial Wire Debug</i> , silumise jadaliides
ToF	<i>Time-of-Flight</i> , lennuaeg
TTÜ	Tallinna Tehnikaülikool
USART	<i>Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter</i> , universaalne sünkroonne/asünkroonne saatja/vastuvõtja

Sisukord

1 Sissejuhatus	10
2 Teooria ülevaade.....	12
2.1 Odomeetria	13
2.2 Inertsiaalne navigatsioon	15
2.3 Kaardipõhine positsioneerimine	16
2.4 ToF andurid	16
2.5 Mootorid	17
2.6 Ackermanni juhtimismehhanism	17
2.7 Roboti liikumise loogika	18
2.8 Aku tüübid	19
3 Süsteemi disain.....	20
3.1 <i>Folkrace</i> võistlus ja reeglitest tulenevad nõuded	20
3.2 Komponentide valimise olulisemad kriteeriumid.....	21
3.3 Mikrokontrolleri valik	22
3.4 Elektriskeemide ja trükkplaadi koostamise tarkvara	23
4 Esimene prototüüp.....	25
4.1 Süsteemi ülevaade	26
4.2 Mootorite alamsüsteemi koostamine	27
4.3 Andurite valimine	27
4.4 Arendusplaadi valimine	28
4.5 Toitesüsteemi koostamine	29
4.6 Elektriskeem ja trükkplaat	30
4.7 Esimese prototüübi testimine ja analüüs	31
4.8 Majanduslik ülevaade	32
5 Teine prototüüp.....	33
5.1 Süsteemi ülevaade	34
5.2 Mootorite alamsüsteemi koostamine	35
5.3 Andurite valimine	36
5.4 Mikrokontrolleri valimine	37

5.5 Roboti käivitamine	39
5.6 Toitesüsteemi koostamine	39
5.7 Elektriskeemid ja trükkplaadid	40
5.8 Kaugusanduri elektriskeem ja trükkplaat	41
5.9 Majanduslik ülevaade	43
6 Kokkuvõte	44
Kasutatud kirjandus	45
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	49
Lisa 2 – Esimese prototüübi põhimõtteskeemid.....	50
Lisa 3 – Esimese prototüübi trükkplaat	52
Lisa 4 – Esimene prototüüp eest- ja tagantvaatest.....	56
Lisa 5 – Esimese prototüübi komponentide nimekiri	57
Lisa 6 – Teise prototüübi põhimõtteskeemid	59
Lisa 7 – Teise prototüübi trükkplaat.....	63
Lisa 8 – Teise prototüübi komponentide nimekiri.....	69

Jooniste loetelu

Joonis 1. Optilise enkooderi tööpõhimõte. Allikas: [7].....	13
Joonis 2. Magnetilise enkooderi tööpõhimõte. Allikas: [10].....	14
Joonis 3. Mahtuvusliku enkoodri tööpõhimõte. Allikas: [7].	15
Joonis 4. Ackermanni geomeetria. Allikas: [4, lk 22].	18
Joonis 5. Robotexi <i>Folkrace</i> raja näide. Allikas: [12].	20
Joonis 6. Roboti esialgne versioon makett-plaadil. Allikas: erakogu.....	25
Joonis 7. Esimese versiooni juhtsüsteemi plokkskeem.	26
Joonis 8. Esimese prototüübi trükkplaadi disain.	31
Joonis 9. Teise versiooni juhtsüsteemi plokkskeem.	34
Joonis 10. Mootorite alamsüsteemi põhimõtteskeem.....	35
Joonis 11. Ülevaade erinevatest kinnitusvariantidest kahe trükkplaadi vahel, mis on üksteise tasapindade suhtes risti [26] [27] [28] [29].....	37
Joonis 12. Kaugusanduri põhimõtteskeem.	41
Joonis 13. Kaugusanduri trükkplaadi disain.....	42

Tabelite loetelu

Tabel 1. Esimese prototüübi komponentide vajaminev perifeeria.	29
Tabel 2. Roboti voolutarve ja võimsusbilanss.	30
Tabel 3. Teise prototüübi komponentide vajaminev perifeeria.	38
Tabel 4. Esimese ja teise prototüübi mikrokontrollerite võrdlus.	39

1 Sissejuhatus

Robotex on robotivõistlus, mis sai alguse 2001. aastal Tallinna Tehnikaülikoolist. Alates aastast 2008 on võistlustele lisandunud ka väljapanekud, näitused ja inseneeria töötoad. Robotex eelüritused toimuvad mitmes erinevas riigis üle kogu maailma ja tehnoloogianäituse raames on tehtud koostööd mitmete maailmas tuntud organisatsioonidega [1].

2022. aastal läbiviidud Robotexi mõju-uuringu põhjal on *Folkrace* võistlus osalejate arvu poolest üks populaarsemaid võistlusalasid [2]. *Folkrace* võistlus jälgendab rallikrossi, kus kuni viis autonoomset robotit sõidab korraga ühel kinnise trajektooriga ringrajal aja peale võidu. Võistlusel kogutakse punkte iga õiget pidi läbitud ringi eest ning võitjaks on kõige rohkem punkte kogunud robot. Keerukust lisavad erinevad takistused rajal. Tiimidel on võimalik vabalt valida arendusplatvorm ning ise disainida robot vastavalt enda soovidele, võimalustele ja võistluse reeglitele.

Töö autor on olnud mitu aastat TTÜ Robotiklubi liige, mistõttu on ta varasemalt võistelnud ka Robotexil erinevatel aladel. *Folkrace* võistlus pakub palju väljakutseid nii elektroonika kui ka tarkvara keerukuse poolest, mistõttu tekkis töö autoril huvi ennast sellel alal proovile panna. See on nii mõneski mõttes keerukam kui teised alad, kuna rajal esineb takistusi, mis võivad põhjustada roboti kinnijäämise rajal, ning kurve, kus robot võib üle pöörata ja vales suunas liikuma hakata, kaotades punkte. Lisaks heale navigeerimisvõimele ja takistuste vältimisele on võistlusel oluline ka kiirus, mistõttu pakub see võistlus küllaga roboti edasiarenduse võimalusi.

Bakalaureusetöö ülesandeks on välja töötada elektroonika autonoomsele võidusõidurobotile. Robot peab vastama *Folkrace* võistlusreeglites kehtestatud nõuetele. Esimesele versioonile on seatud lisanõudeks kompaktsus ning lihtsus prototüüpimisel, kasutades valmis mooduleid. Teise versiooni loomisel on peamiseks süsteemi integreeritus ehk kõigi komponentide ühele trükkplaadile paigutamine. Tähelepanu pööratakse ka sellele, et süsteem oleks kergemini silutav ning lisatakse mõned uued funktsionaalsused.

Lõputöö käigus uuritakse, millistele nõuetele peab võistlusrobot vastama ning disainitakse selle põhjal trükkplaat. Seejärel analüüsitakse loodud lahenduse puudujääke ning luuakse uus täiendatud versioon, mille jaoks valitakse välja mikrokontroller, sensorid ja muud vajalikud komponendid ning disainitakse teine trükkplaat.

Töö on jaotatud neljaks osaks. Teises peatükis tehakse ülevaade töö teoreetilistest alustest ning kirjeldatakse töös kasutatud olulisemate komponentide ja nende alternatiivide tööpõhimõtteid. Kolmandas peatükis kirjeldatakse võistlusreeglitest tulenevaid nõudeid ning kriteeriume, millele roboti komponendid peavad vastama. Neljandas peatükis tehakse ülevaade esimese prototüübi disaini protsessist ja analüüsitakse lõpptulemust. Peatükis viis kirjeldatakse disainiprotsessi põhimõtteid teise prototüübi koostamisel.

2 Teooria ülevaade

Kõige olulisem *Folkrace* võistluse puhul on roboti võime navigeerida ruumis. Navigeerimise osaks on roboti anduritelt andmete lugemine, algoritmiliselt positsiooni täpne tuvastamine ning täiturite abil liikumine sealjuures takistusi vältides.

Sõiduki asukoha täpne tuvastamine on fundamentaalne probleem mobiilsete robotite rakendustes ning selle lahendamiseks on arendatud palju erinevaid süsteeme, sensoreid ja tehnikaid. Esineb mitmeid erinevaid positsioneerimise süsteeme, millest kõigil on oma eelised ja puudujäägid ning tõeliselt elegantset lahendust ei ole siiani välja mõeldud. Väga ülevaatlikult jagatakse positsioneerimissüsteemid suhtelisteks ja absoluutseteks, mida kombineeritakse omavahel parema tulemuse saavutamiseks [3, lk 232].

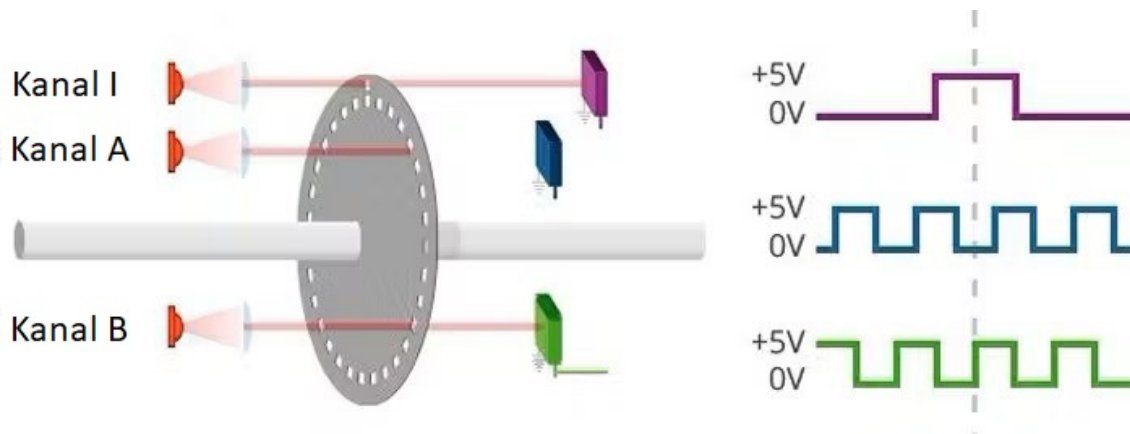
Suhtelised positsioneerimissüsteemid jagunevad odomeetriaks ja inertsiaalseks navigatsiooniks. Odomeetrias kasutatakse enkoodreid, et mõõta ratta pöörlemist ja orientatsiooni ning saada infot roboti ligikaudse asukoha kohta. Samas on odomeetria puudujäägiks aina suurenev viga ning seetõttu vajab see meetod välist sõltumatut referentsi. Inertsiaalne navigatsioon põhineb güroskoobi ning mõnikord kiirendusandurite andmetel, et mõõta pöörlemiskiirust ja kiirendust. Nagu odomeetria puhulgi on tegemist iseseisva süsteemiga, kuid ka siin on puudujäägiks andmete väärtuste nihkumine aja jooksul integreerimise tõttu, mistõttu väike konstantne viga võib ajapikku suureks kasvada. Kõrge täpsusega inertsiaalsed sensorid on ka väga kallid [4, lk 10].

Absoluutseteks positsioneerimissüsteemideks on magnetilised kompassid, aktiivsed majakad, satelliitnavigatsioon, maamärkide tuvastamine ja mudeli sobitamine [3, lk 233]. Satelliitnavigatsioon on kasulik väliskeskkonnas navigeerimisel ning kuna võistlusväljakul ei ole võimalik kontrollida raja keskkonda või paigutada teadaolevatele kohtadele maamärke/majakaid on absoluutsed positsioneerimissüsteemid *Folkrace* võistluse kontekstis välistatud.

2.1 Odomeetria

Kõige laialdasemalt kasutatav meetod mobiilse roboti positsiooni hindamiseks on odomeetria, mis on võrdlemisi lihtne ja odav [5]. Enkooder teisendab sisuliselt mehaanilise liikumise elektriliseks signaaliks [6]. Enkoodriga mõõdetud ratta pöörete arv on suhteliselt täpselt tõlgitav lineaarseks nihkeks maapinna suhtes. Samuti võimaldab odomeetria kõrget diskreetimissagedust ja lühiajalist täpsust. Sellegipoolest on odomeetria puudujäägiks aja jooksul suurenev viga [5]. Tänapäeval on kasutusel mitut tüüpi pöörlemisnurga ja -kiiruse andureid, nendest kõige levinumad on optilised, magnetilised ja mahtuvuslikud enkoodrid [7].

Optiliste enkoodrite töö põhineb valguse olemasolul või puudumisel. Joonisel 1 on kujutatud optilise enkoodri tööpõhimõte ja väljundsignaal. Pöörlevas kettas on augud, millest ühel pool paiknevate valgusallikate kiired tuvastatakse teisel pool paikneva fotoelektrilise anduriga. Optiliste andurite tugevuseks on viideteta signaal, mis tähendab suurt täpsust ratta pöördenurga tuvastamisel.

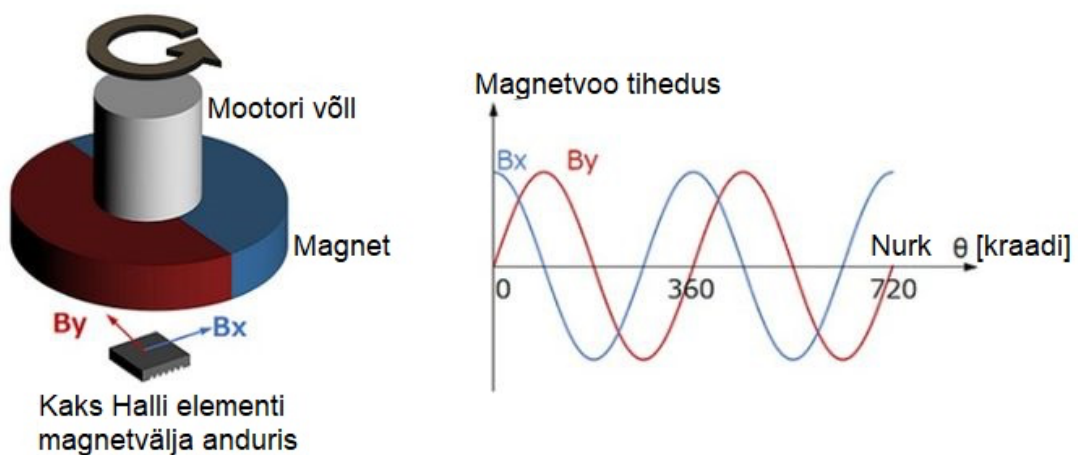


Joonis 1. Optilise enkooderi tööpõhimõte. Allikas: [7].

Magnetiline enkooder kasutab kahte Halli efektil põhinevat või magnetoresistiivset andurit, mis mõõdavad võlli otsa paigutatud magnetilise ketta tekitatud magnetvoogu. Joonisel 2 on näha kahe poolusega magnetit kasutava absoluutse enkooderi tööpõhimõte ja väljund, milleks on kaks erinevate faasidega vahelduvsignaali. Väljundsignaali interpoleeritakse, et saada rohkem loendeid pöörde kohta ning seetõttu on absoluutsed magnetilised enkoodrid tundlikud erinevate vigade ja häirete suhtes. Nende kompenseerimiseks on enamasti võimalik andureid kalibreerida. Lisaks absoluutsele

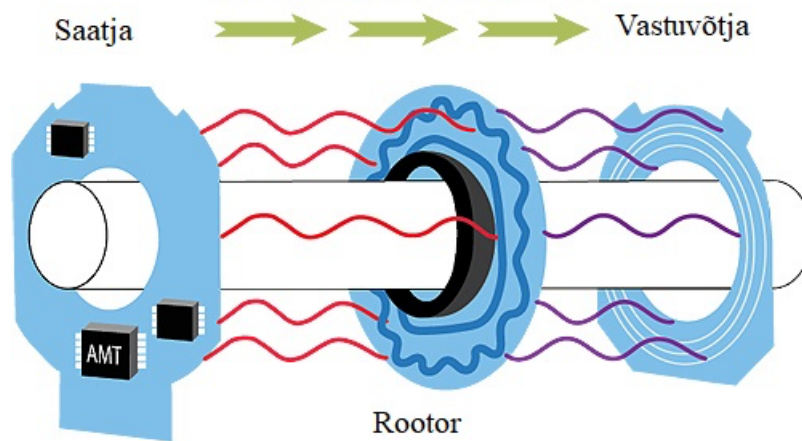
enkoorderile on laialt kasutatavad ka inkrementaalsed enkoodrid, mille puhul tõlgendatakse väljundsignaali pöörde kohta saadud signaalide arvu põhjal [8].

Magnetilised enkoodrid on tundlikud väliste magnetväljade suhtes. Sobiva lahenduse valimisel tuleks arvesse võtta nii enkoodri resolutsiooni kui ka täpsust [7]. Võrreldes optiliste enkoodritega on neil sarnane resolutsioon ja täpsus, kuid parem vastupidavus tolmule, prahile ja vibratsioonile ning madalam hind [9].



Joonis 2. Magnetilise enkooderi tööpõhimõte. Allikas: [10].

Mahtuvuslik enkooder mõõdab ratta pöördenurka läbi mahtuvuse muutuse ahelas. Joonisel 3 on näidatud mahtuvusliku enkooderi tööpõhimõte. Statsionaarne vastuvõtja tuvastab mahtuvuse muutuse, mis tekib kõrge sagedusega saatja signaali moduleerimisel sinusoidaalse mustriga pöörleval rootoril. Mahtuvuslikud enkoodrid on tundlikud mürale, vibratsioonile ja elektrilisele interferentsile. Võrreldes optiliste anduritega on neil madalam voolutarve ja pikem eluiga. Samuti pole need mõjutatud magnetilistest häiretest ja omavad suuremat täpsust ja lahutusvõimet kui magnetilised enkooderid [6] [9].



Joonis 3. Mahtuvusliku enkoodri tööpõhimõte. Allikas: [7].

2.2 Inertsiaalne navigatsioon

Inertsiaalne navigatsioon võimaldab kindlaks määrata roboti asendit ning selleks on kasutusel kiirendusandurid ja güroskoobid, millega mõõdetakse vastavalt kiirendust ja pöörlemiskiirust. Inertsiaalsed süsteemid on iseseisvad, vajamata väliseid referentse, kuid vigade akumulereerumise tõttu suureneb igasugune väike püsiv viga piiramatult, mistõttu on need üksinda sobimatud pikema aja jooksul asukoha määramiseks.

Kiirendusandurite kasutamine mobiilsete robotite navigatsioonis on andnud pigem kehvasid tulemusi: signaali-müra suhe on madal, eriti madalamate kiirenduste korral ning ebatasane pinnas mõjutab tugevalt mõõtetulemusi. Viimast põhjustab gravitatsioonilise kiirenduse komponent, mis raskendab lineaarkiirenduse komponendi tuvastamist niipea kui esineb kõrvalekalle horisontaalsest asendist.

Güroskoobid seevastu on suure tähtsusega mobiilsete robotite positsioneerimisel aidates kompenseerida odomeetria peamist nõrkust, kus väike hetkeline orientatsiooniviga põhjustab aina kasvava positsioonivea. Pikka aega olid täpsed güroskoobid väga kallid, kuid lähiajal on fiiber-optiliste güroskoopide hinnad tunduvalt langenud ja muutunud laialdasemalt kasutatavaks [3, lk 235-236].

2.3 Kaardipõhine positsioneerimine

Kaardipõhine positsioneerimine, mida tuntakse ka kui kaardile või mudelile sobitamine, põhineb ideel, et andurite andmete põhjal luuakse kaart kohalikust keskkonnast. Loodud kaarti saab võrrelda mälusse salvestatud kaardiga, mis võib olla nii CAD mudel või varasemad sensori andmed, ning arvutada välja tegelik asukoht ja orientatsiooni keskkonnas. Kaardipõhine positsioneerimine on eriti kasulik keskkonnas, mis ei muutu. Enamasti on vaja meetodi rakendamiseks täpseid sensoreid ja piisavalt statsionaarseid, kergesti eristatavaid tunnuseid, mida saaks kasutada kui on vaja kaarti sobitada [3, lk 245].

Folkrace võistluse rada ei ole enne võistluse toimimist täpselt teada, seega ei ole võimalik enne võistluse toimumist luua CAD mudelit rajast. Küll aga saab robot kaardistada rada test-sõitude ajal. Kuna võistlus toimub kinnise trajektooriga ringrajal, mis on seintega piiratud ja enamasti kasutatakse erinevaid sensori tüüpe kaardistamiseks, siis ei ole otseselt vaja ka palju statsionaarseid eritunnuseid rajal.

Keskkonna kaardistamine hõlmab enamasti kauguse mõõtmist, milleks on põhimõtteliselt kolm varianti:

1. andurid, mis mõõdavad aega, mis kulub kiiratud impulsi levimiseks ja tagasi peegeldumiseks vastuvõtjale (*Time-of-Flight* ehk ToF andurid),
2. faasinihke mõõtmine, kus kasutatakse pidevat laine edastamist, erinevalt ToF-süsteemides kasutatavatest lühikestest impulssidest,
3. radaril põhinevad andurid [4, lk 95].

2.4 ToF andurid

Enamasti pärinevad ToF andurite signaalid ultraheli, raadiosageduslikust või optilisest allikast. Ultraheli ToF andurid on tänapäeval kõige levinumad mobiilsetes robotisüsteemides, kuna need on odavad, laialt kättesaadavad ning nende liidestamine on lihtne. Raadiosageduslikel signaalidel põhinevad radarid on mõeldud pikematel distantidel kasutamiseks ja nende täpsus on üldiselt halvem kui teistel ToF andurite tüüpidel. Optilised ToF andurid on kiiremad ja täpsemad kui ultrahelil põhinevad andurid, kuna valgus levib keskkonnas kiiremini kui heli.

Radarid ja lidarid toimivad praktiliselt samal põhimõttel - saadetakse välja impulss ja mõõdetakse aega, mis kulub selle tagasipeegeldumiseks. Kuna valguse kiirus on väga suur, siis nõuavad sellised andurid väga suure täpsusega aja mõõtmist. Seetõttu on need andurid ka üsna kallid. Potentsiaalseid vigu põhjustavad sellistes süsteemides signaali leviku kiiruse kõikumised, mõõtemääramatus tagasipeegeldunud signaali aja määramisel, ebatäpsused skeemis, millega mõõdetakse aega ja leviva laine interaktsioon peegeldumise pinnaga [4, lk 95-97].

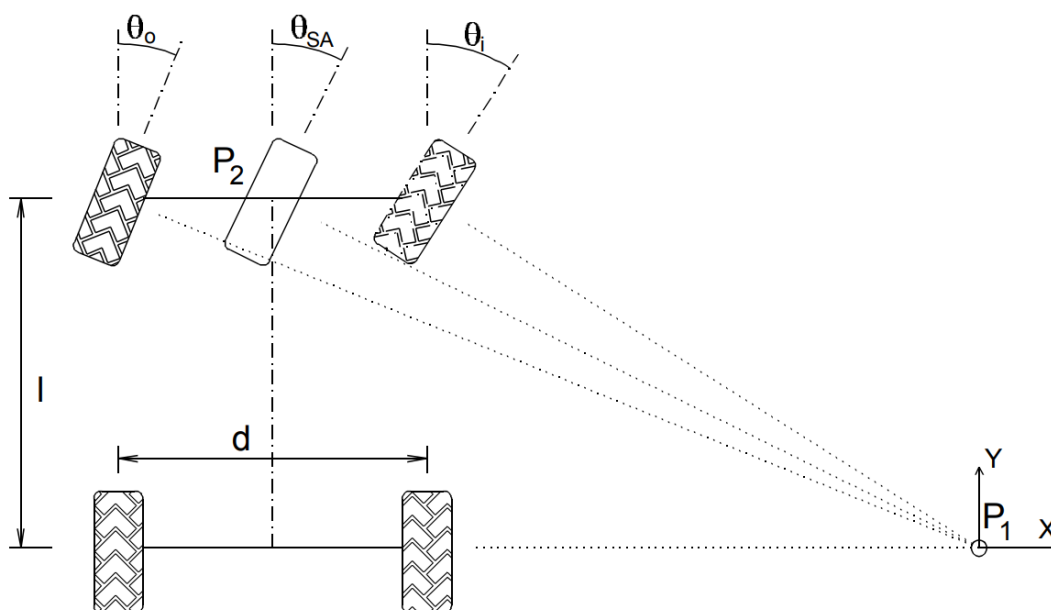
2.5 Mootorid

Roboti liikumiseks on vaja enamasti vähemalt kahte mootorit, kuid parema juhitavuse jaoks on parem kasutada nelja mootorit. Mootorite reguleerimiseks on otstarbekas kasutada draivereid, kuna see võimaldab efektiivsemat kontrolli ja paremat töökindlust.

Mobiilsete robotite jaoks kasutatakse kõige enam harjastega alalisvoolumootoreid, kuna neid on lihtne kontrollida ja need on suhteliselt madala hinnaga. Võimsamad harjasteta alalisvoolumootorid on kallid ning neid kasutatakse rakendustes, kus on vajalikud väga suured kiirused. Servomootoreid kasutatakse samuti laialdaselt, eriti valdkondades, kus on oluline liikumise täpsus ja ei ole niivõrd oluline kiirus, näiteks robotite juhtmehaanikas.

2.6 Ackermanni juhtimismehhanism

Ackermanni juhtimismehhanismi kasutatakse autotööstuses eesmärgiga vähendada rehvide libisemist. Põhimõte seisneb selles, et pööramise ajal on sisemine esiratas veidi suurema pöördenurgaga kui välimine ratas. Joonisel 4 on kujutatud Ackermanni geomeetria, kus on näha, kuidas kõigi rataste pikendatud teljed liituvad ühes punktis P1. Ackermanni juhtimismehhanism on võrdlemisi täpne odomeetriline lahendus, mis sobib kasutamiseks erinevate maastikutingimuste korral [4, lk 21-23].



Joonis 4. Ackermanni geomeetria. Allikas: [4, lk 22].

2.7 Roboti liikumise loogika

Robot läbib rada pideva tagasiside abil liikumist korrigeerides. Optimaalseks liikumiseks on vaja kasutada isereguleeruvat juhtalgoritmi seetõttu, et ideaalseid komponente ei eksisteeri ning seega on vajalik tekkiva vea pidev korrigeerimine. Antud roboti puhul on selleks kasutusel Ackermanni algoritm. Selle ülesande saavutamiseks peavad robotil olema täiturid ja andurid. Täituriteks on antud roboti puhul servo ja alalisvoolu mootorid ning anduriteks on IMU, ToF-id ja enkoodrid.

Anduritelt saadud informatsiooni põhjal seab juhtalgoritm eesmärgi roboti juhtimiseks ning võrdleb eelmise ajaühiku jooksul tehtud tegelikku liikumise tulemust oodatud tulemusega. Enkoodritelt saab informatsiooni rataste pöörlemise kohta, et korrigeerida mootorite juhtimisalgoritmi. ToF-idelt saadava informatsiooni põhjal korrigeeritakse servot juhtides roboti trajektoori, et takistusi vältida. Inertsiaalanduri põhjal reguleeritakse roboti soovitud kiirust, et tagada kallakutel tasakaalu hoidmine ja vältida ümberminemist.

2.8 Aku tüübid

Liitium-ioon ja liitium polümeer on kaks kõige levinumat aku tüüpi portatiivsetes seadmetes. Liitium-ioon akud on üldjuhul suurema sisetakistusega, andes seetõttu välja vähem voolu ning ei sobi seetõttu mobiilsetes robotites kasutamiseks. Liitium polümeer akudest on olemas robotitele spetsialiseeritud variandid, mis annavad välja oluliselt rohkem voolu kui sarnaste mõõtmetega ja mahutavusega liitium-ioon akud.

Kuna robotite võistlussõidud kestavad enamasti lühikest aega, siis on aku valikul oluline, et aku annaks välja võimalikult palju võimsust ning oleks kiiresti laaditav. Samuti on oluline silmas pidada, et aku mahutavus oleks piisav, et võistlustel mõistlikult kaua vastu pidada.

3 Süsteemi disain

Roboti juhtsüsteemi disainil lähtutakse eelkõige võistluse reeglitest ning eelmises peatükis toodud teoreetilistest alustest. Esmalt tehakse ülevaade *Folkrace* võistlusreeglitest ning tuvastatakse olulised aspektid, millega peaks juhtsüsteemi disainil arvestama. Seejärel kirjutatakse põhjalikumalt, millised on süsteemi komponentide valimise kriteeriumid. Viimaks valitakse välja sobiv tarkvararakendus trükkplaadi disainimiseks.

3.1 *Folkrace* võistlus ja reeglitest tulenevad nõuded

Folkrace võistluse eesmärgiks on jäljendada rallikrossi. Rajal on korraga kuni viis robotit, mis kolmeminutilise võistluse jooksul koguvad punkte ringrajal sõites. Võidab robot, mis teenib kõige rohkem punkte, kusjuures iga õiges suunas läbitud ring annab ühe punkti. Õige liikumise suund määratakse vahetult enne konkreetset sõitu. Robot võib sõitma hakata mitte varem kui 5 sekundit pärast stardisignaali [11]. Võistluse väljaku seinad on valget värvi ning raja trajektoori on kõver ja kinnine. Joonisel 5 on kujutatud näide Robotexi rajast.



Joonis 5. Robotexi *Folkrace* raja näide. Allikas: [12].

Folkrace võistlusrobot peab reeglite järgi enne rajale lubamist läbima tehnilise kontrolli, kus valideeritakse järgnevaid nõudeid:

1. roboti mõõtmed on maksimaalselt 20 x 15 cm (pikkus x laius);
2. roboti mass on kuni 1 kg;
3. robotil peab olema käivitamise ja peatamise jaoks nupp, kuid soovituslik oleks kaugjuhtimispuldi kasutamine;
4. robot peab tehnilises kontrollis käivituma;
5. robot peab olema autonoomne;
6. robot ei tohi mõõtmetelt muutuda, kahjustada väljakut või olla pealtvaatajatele ohtlik, eritada gaase, vedelikke või puru.

Tehniline kontroll võimaldab võistlusel osaleda, kuid edukaks soorituseks peaks roboti disainil arvestama veel täiendavate nõuetega. Väljakul võib olla erinevaid takistusi, näiteks auke ja lahtiseid materjale, mis ei tohiks segada roboti opereerimist. Rajal võib olla sild, mis tähendab, et robot peaks suutma sõita nii üles- kui allamäge ilma probleemideta. Robot saab kasutada väljaku äärsed valgeid seinu rajal navigeerimiseks, kuid liikumise strateegias tuleks arvesse võtta, et rajal võivad esineda takistavad seinad, mis tagavad, et seina ääri mööda liikuv robot ei ole võimeline rada läbima. Samuti tuleb arvestada, et aktiivselt teiste robotite rammimine või nende liikumiseks kasutamine on reeglite kohaselt keelatud.

3.2 Komponentide valimise olulisemad kriteeriumid

Süsteemi toiteks on planeeritud kasutada kahe jadaelemendiga akut, kuna neid kasutatakse TTÜ Robotiklubis laialdaselt ning need on piisava väljundvooluga enamike väikerobotite jaoks. Ühe jadaelemendi klemmipinge täislaetud aku korral on kuni 4,2 V ning töövahemik on umbes 3,2 V kuni 4,2 V. Nominaalpingeks loetakse 3,7 V, seega võiks mootorite toitepinge olla 7,4 V või vähem.

Mootorid võiksid olla suhteliselt kerged ja väikesed. Harjastega alalisvoolu mootorite nimipinge määratakse aku toitepinge põhjal. Lähimad harjastega alalisvoolu mootorite nimipinged on 6 V ja 12 V, millest sobivad toitepinget arvestades paremini 6 V mootorid. Kuna tegemist on robotite võidusõiduga, siis on peamiseks mootorite valiku kriteeriumiks pöörlemiskiirus. Mootorite ühtlaseks juhtimiseks ja ratta kiiruse mõõtmiseks võiksid olla kasutusel mootori asendi enkoodrid. Mootorite kiiruse reguleerimiseks on vajalikud ka mootori draiverid, mis valitakse mootorite maksimaalse voolutarbe alusel.

Roboti pööramiseks kasutatakse Ackermanni juhtimismehhanismi, mistõttu on robotil ka üks servo esirataste pööramiseks. Selle valimise kriteeriumiteks on eelkõige väikesed mõõtmed ja sobiv toitepinge.

Inertsiaalandur (IMU, *Inertial Measurement Unit*) võimaldab tuvastada kokkupõrkeid, kuid veelgi olulisem *Folkrace* võistluse kontekstis on võime tuvastada kaldtee esinemist. Üles- või allamäge sõites võib olla vajalik jõu ülekande reguleerimine, et vältida roboti ümberminemist või vähenenud võimet tuvastada takistusi ja teisi roboteid kaugusandurite piiratud nähtavuse tõttu. Inertsiaalanduri valimisel on kõige olulisem arvestada selle resolutsiooni, müra ja diskreetimissagedusega. Anduri tüübi väljundandmete ebatäpsuse ja nende töötlemise eripära tõttu on eriti oluline valida kvaliteetne inertsiaalandur.

Seinade ja takistuste tuvastamiseks on vajalikud kaugusandurid. *Folkrace* võistluse konteksti sobivad kõige paremini infrapuna sensorid (ToF, *Time-of-Flight* sensorid), mis on kiiremad kui ultraheli sensorid. Roboti asendi tuvastamiseks kasutatakse inertsiaalandureid.

3.3 Mikrokontrolleri valik

Kogu süsteemi juhtimiseks on vaja mikrokontrollerit või selle arendusplaati. Mikrokontrolleri valimisel on oluline võtta arvesse järgnevaid faktoreid:

1. Pordid (analoog, digitaal, kommunikatsioon)
2. Sisemised funktsioonid (muundurid, PWM jne)
3. Arvutuskiirus
4. Välmälu, EEPROM ja SRAM mälu suurused

5. Korpuse konfiguratsioon
6. Hajuvõimsus, energiasäästlikud režiimid
7. Programmeerimise, simulatsiooni ja süsteemi sisemised silumisvahendid

Lihtsam on alustada seeria “premium” variantidest, millel on kõige kiirem taktsagedus ning kõige rohkem andmete muutmälu ja programmikoodi välmälu. Enamasti on ülejäänud seeria komponendid nende vähem võimekad versioonid, millele on mõnikord lisatud spetsialiseeritud perifeeria komponente. Suurem osa keerukust programmeerimisel on mikrokontrolleri põhine, seega lihtne arhitektuur pideva mälu ruumiga ja standartsete päisefailidega lihtsustab oluliselt arendusprotsessi. Samuti on oluline võtta arvesse ka olemasolevate teekide olemasolu ja kvaliteeti [13].

Antud töös lähtutakse peamiselt sellest, et mikrokontrolleril oleks piisavalt sobivaid väljaviike, kiire protsessor ja võimalikult palju programmimälu. Kasuks tuleb ka põhjaliku dokumentatsiooni olemasolu ja seadme lihtne kättesaadavus suurematelt tarnijatelt.

3.4 Elektriskeemide ja trükkplaadi koostamise tarkvara

Eksisteerib palju erinevaid raalprojekteerimise (CAD, *Computer-Aided Design*) tarkvarasid, mis aitavad inseneridel automatiseerida ja kiirendada elektroonika disaini protsessi. Lisaks aitavad need kontrollida elektroonika kujunduse nõuete täitmist ja tuvastada vigu.

Ideaalset CAD-programmi ei eksisteeri, kuna igal tarkvaral on erinevad tööriistad ning palju sõltub disainitava toote eripärast. Populaarseimaid CAD-tarkvaraprogrammid trükkplaadi disaini jaoks on Altium Designer IDE, Eagle CAD IDE, KiCad ja OrCAD [14].

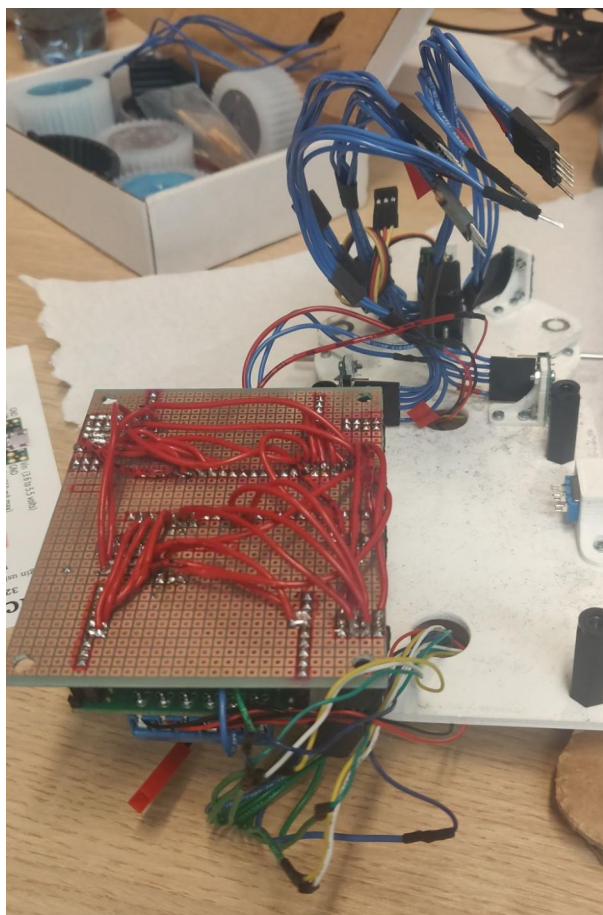
Töö autor on varasemalt kasutanud nii KiCad-i kui ka Altium Designer programme elektriskeemide ja trükkplaatide disainiks. Altium Designer [15] on professionaalne programm, millel on üle maailma palju kasutajaid ja palju funktsioone keerukate disainide tegemiseks. KiCad [16] on seevastu tasuta programm, millel on avatud lähtekood ja kogukond, kes panustab programmi arengusse. KiCad-is olemas teegid paljude komponentide skeemitähiste ja trükkplaadi laotustega komponentide

paigutamiseks, mis vähendab komponentide loomisele kuluvat aega. Kuna aga tegemist on tasuta programmiga, siis võib tarkvara töö olla kõikuva kvaliteediga.

Elektriskeemide ja trükkplaatide disainimiseks otsustati KiCad 7 tarkvara kasuks, kuna töö autor soovis paremini tundma õppida selle funktsionaalsusi ja kasutusvõimalusi. Samuti sobib see programm hästi lihtsamate projektide jaoks ja võimaldab kergesti olemasolevate komponentide kohandamist vastavalt soovile.

4 Esimene prototüüp

Esimene versioon oli edasiarendus varasemast TTÜ Robotiklubis ehitatud robotist, mida on kujutatud joonisel 6. Makett-plaadile üles ehitatud roboti puhul täheldas töö autor, et palju lahtiseid juhtmeid põhjustasid segadust ja suurt keerukust süsteemi haldamisel. Ühendused olid halva kontaktiga ja võisid katkeda ning nende kõrge arv muutis vigade parandamise keeruliseks. Töökindluse tõstmiseks otsustati koostada uus lahendus spetsiaalselt selleks otstarbeks disainitud trükkplaadil.



Joonis 6. Roboti esialgne versioon makett-plaadil. Allikas: erakogu.

Süsteemi ülesehitamisel lähtuti eelkõige lihtsusest ja mugavusest. Prototüüpimiseks võeti terviklikud modulaarsed arenduskomponendid, et arendus oleks esialgu võimalikult kiire ja potentsiaalsete vigade arv väiksem. Komponente otsiti Pololu tootevalikust, kuna tegemist on elektroonikatootjaga, kes toodab sensoreid ja liikumise juhtimise

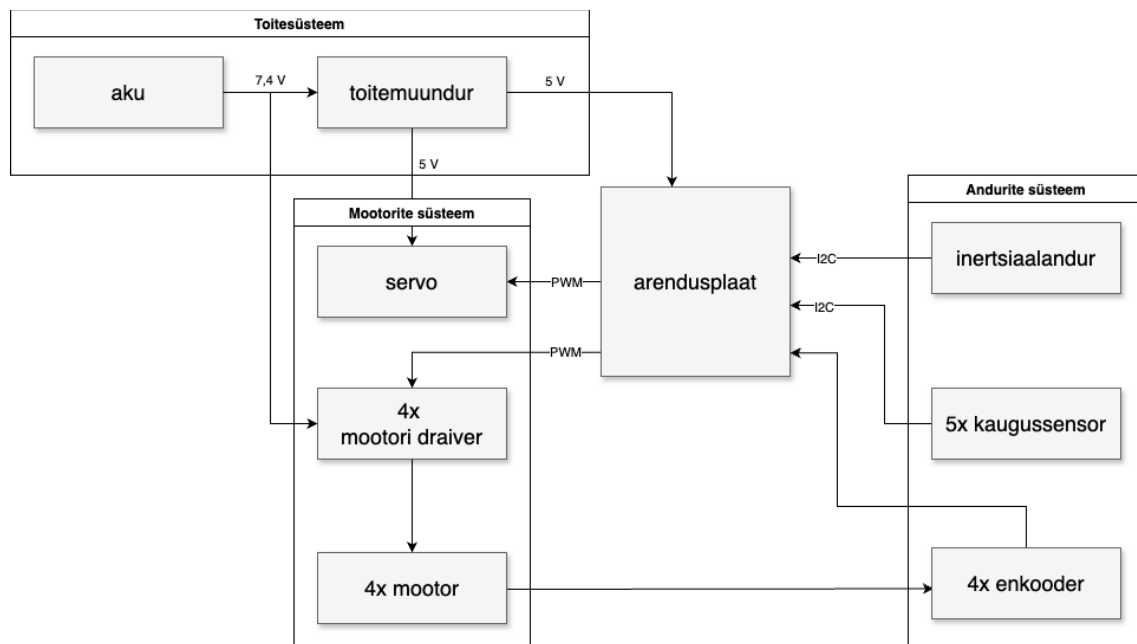
elektroonikat muuhulgas ka hariduslikel eesmärkidel kasutamiseks [17]. Nende tootevalik on lai ja kvaliteetne ning nende omavaheline ühilduvus on väga hea, mis teeb need sobivaks prototüüpimise jaoks.

4.1 Süsteemi ülevaade

Joonisel 7 on toodud kogu juhtsüsteemi plokk skeem. Toitesüsteemi eesmärgiks on kogu süsteemi varustada vajalike toitepingetega. Selle moodustab aku nominaalpingega 7,4 V ja toitemuundur väljundpingega 5V.

Mootorite süsteemi funktsiooniks on roboti liikumise juhtimine. Mootorite süsteemis on neli mootorit koos draiveritega ja servo. Mootoreid toidetakse aku pingega läbi draiverite roboti liikuma panemiseks ning servo kasutab toitemuunduri väljundist saadavat 5 V roboti esirataste keeramiseks Ackermanni juhtimisgeomeetria järgi.

Andurid on vajalikud roboti asukoha tuvastamiseks ja takistuste vältimiseks. Need annavad infot roboti liikumise kohta mikrokontrollerile, kus toimub otsustusprotsess edasise liikumise juhtimiseks. Andurite süsteemi osaks on inertsiaalandur, viis kaugusandurit ja neli mootorite enkoodrit. Kogu süsteemi juhib arendusplaat, millel on olemas ka programmeerimise ja silumise liidesed.



Joonis 7. Esimese versiooni juhtsüsteemi plokk skeem.

4.2 Mootorite alamsüsteemi koostamine

Mootoriteks valiti 50:1 ülekandega Pololu alalisvoolu mootorid [18], kuna nende juhtimine on lihtsam kui harjasteta alalisvoolu mootoritel. Kuna võistlusel on oluline ka kiirus, siis otsustati suurema võimsusega HP seeria mootorite kasuks. Ilma koormuseta on nende pöörlemiskiirus 590 RPM (*Revolutions Per Minute*, pöörete arv minutis) ja kuna koormus on roboti kerge massi tõttu madal, siis hinnanguliselt on see piisav antud rakenduse jaoks. Mootorid vajavad vähemalt 6 V pinget.

Draiveriteks valiti Pololu tootesarjast kahe väikese harjastega alalisvoolu mootori juhtimiseks mõeldud arendusplaat *Dual MAX14870 Motor Driver Shield for Arduino* [19]. Nelja mootori juhtimiseks on vaja seega kahte arendusplaati. Need ühilduvad hästi Arduino arendusplatvormiga, kuid sobivad ka mujal kasutamiseks. MAX14870 draiver on kasutatav pingete vahemikus 4,5 V kuni 36 V, see võimaldab kuni 1,7 A pidevat voolu ning hetkeliselt kuni 2,5 A mootori kohta. Draiveri plaadil on olemas ka vastupolaarse pinge kaitse ning väljund, mis annab märku ülevoolust või ülekuumenemisest.

4.3 Andurite valimine

Valitud mootoritega ühilduvad hästi Pololu magnetilised enkoodrid [20], mis kinnituvad mootorite tagaküljele. Neil on magnetiline ketas ja Halli efektil põhinevad sensorid, mis mõõdavad 12 punkti ühe pöörde jooksul. Magnetilised enkoodrid valiti seetõttu, et neil on hea vastupidavus tolmule, prahile ja vibratsioonile. Enkoodritele sobib toitepingete vahemik 2,7 V kuni 18 V ning nende digitaalse väljundi saab ühendada otse mikrokontrolleri külge.

Kaugussensoreid on Pololu tootevalikus on nelja tüüpi:

1. Binaarsed, mis tuvastavad ainult objekti olemasolu alates kindlast distantist, kuid ei anna väljundina selle täpset kaugust;
2. ToF anduriga alamsüsteem, mis on iseseisev lidar infrapuna laseriga;
3. Sharp kaugusandurid, mis põhinevad samuti infrapunal ja mõõdavad tagasipeegelduva valguse intensiivsust;

4. Ultraheli kaugusandur, mis mõõdab heliimpulsi tagasipeegeldumiseks kulunud aega.

Folkrace võistluse kontekstis sobivad kõige paremini ToF andurid, kuna nende väljundi järgi on võimalik kaugust välja arvutada. Need on täpsemad kui Sharp kaugusandurid, mille mõõtmistulemus sõltub tugevalt välistest teguritest, mis võivad mõjutada tagasipeegelduva valguse intensiivsust. ToF andurid on ka kiiremad kui ultraheli kaugusandurid, mis sõltuvad heli liikumise kiirusest keskkonnas.

Valituks osutusid VL53L1X *Time-of-Flight Distance Sensor Carrier with Voltage Regulator* infrapuna sensorid [21], kuna neid kasutati TTÜ Robotiklubis kõige sagedamini võistlusrobotite ehitamiseks. Pololu tootevalikus on ka paremaid variante kõrgema mõõtesageduse, vaatevälja või töökauguse poolest, kuid kõnealuste andurite kõrge hinna tõttu otsustati kasutada olemasolevaid andureid.

Inertsiaalanduriks valiti *MinIMU-9 v5 Gyro, Accelerometer, and Compass (LSM6DS33 and LIS3MDL Carrier)* [22]. Pololu tootevalikus on erinevaid lahendusi, kus kombineeritakse omavahel güroskoope, kiirendusandureid, magnetomeetreid ja altimeetreid. Nendest on vajalikud antud roboti puhul vaid güroskoop ja kiirendusandur. Nimetatud inertsiaalanduril on ka magnetomeeter, kuid kuna see oli TTÜ Robotiklubis käepärast, siis ei tellitud eraldi andurit ilma magnetomeetrita.

4.4 Arendusplaadi valimine

Arendusplaadi valimisel on saadaval palju erinevaid arendusplatvorme, millel on oma tugevused. Arduino on hea prototüüpimiseks, kuid antud lahenduse jaoks otsiti paremat jõudlust. Samuti tuli arvestada vajalike väljaviikude arvuga ja liidestega. Tabelis 1 on toodud ülevaade roboti komponentidest ja liidetamisest kontrolleriga. Kokku peab seega arendusplaadil olema vähemalt 38 väljaviiku.

Tabel 1. Esimese prototüübi komponentide vajaminev perifeeria.

Alamsüsteem	Komponent	GPIO	PWM	I2C	Kokku
Mootorid	Draiver	10	4		14
	Servo		1		1
Sensorid	Enkooder	8			8
	TOF	10		2	12
	IMU				
Muu	LED	3			3
Kokku		31	5	2	38

Valituks osutus Teensy 4.1 [23], millel on väga kõrge taktsagedusega protsessor. Teensy arendusplaadi mikrokontroller on 600 MHz ARM Cortex-M7 tuumaga. Mikrokontrolleril on väga palju muutuvmälu ning 42 piikriba väljaviiku (kokku on saadaval 55 sisend-väljund väljaviiku). PWM ja I2C liideseid on samuti piisavalt - vastavalt 35 ja 3. Teensy 4.1 arendusplaat on kompaktsem võrreldes paljude Arduino tootevalikus olevate arendusplatvormidega, näiteks Arduino Uno või Arduino Mega ning oli bakalaureusetöö kirjutamise ajal tellimiseks saadaval.

4.5 Toitesüsteemi koostamine

Kogu süsteemi toiteks on kasutusel kahe jadaelemendiga aku, mille nominaalpinge on 7,4 V. Aku mahutavuse valimisel lähtuti aku mõõtmetest ja süsteemi voolutarbest. Tabelis 2 on ülevaade komponentide maksimaalsest voolutarbest ja arvutuslikust võimsusest lähtudes andmelehtedel saadaval olevast informatsioonist. Valides 500 mAh 30C liitium-polümeer aku on võimalik täislaetud akuga sõita peaaegu 30 minutit, mis teeb kokku 10 võistlusvooru.

Toitepinge muundamiseks 5 V peale valiti Pololu tootevalikust madaldav impulsspingemuundur (*switching step-down voltage regulator*) 5V, 3.2A *Step-Down Voltage Regulator* D36V28F5 [24]. Sellel on piisav väljundvool, parem hind ja väiksemad mõõtmed kui suurema väljundvooluga D36V50Fx seeriasse kuuluvatel muunduritel, mistõttu sobis see valik kõige paremini.

Tabel 2. Roboti voolutarve ja võimsusbilanss.

Tarbija	Kogus	Maksimaalne voolutarve (A)	Voolutarve (A)	Maksimaalne võimsustarve (W)
Mootor Micro Metal HP 6V	4	0,200	0,800	5,920
Servo DSM44	1	0,100	0,100	0,500
Mootori enkooder 12 CPR	4	0,007	0,028	0,092
Kaugusandur VL53L1X	5	0,018	0,090	0,297
Inertsiaalandur MinIMU-9 v5	1	0,005	0,005	0,017
Pingemuundur D36V28F5	1	0,003	0,003	0,022
Arendusplaat Teensy 4.1	1	0,110	0,110	0,363
Valgusdiod OSTAMC51A5A	3	0,001	0,003	0,010
Kokku			1,139	7,221

4.6 Elektriskeem ja trükkplaat

Lisas 2 on kujutatud esimese prototüübi põhimõtteskeemid. Mootori draiverite skeem on koostatud hierarhilise lehena ruumi kokkuhoiu eesmärgil.

Trükkplaadi disainimisel lähtuti roboti korpuse- ja komponentide mõõtmetest. Trükkplaadi mõõdud pidid olema võimalikult väikesed, et jääda roboti kere piiridesse, aga piisavalt suured, et vajalikud komponendid ära mahutada. Kui trükkplaadi mõõtmed ületaksid roboti kere mõõtmeid, siis kokkupõrke korral on oht, et trükkplaat saab kahjustada. Trükkplaadi suuruseks kujunes 75 mm x 64 mm.

Otsustati disainida kahekihiline trükkplaat, kuna tegu on madala keerukusega skeemiga, kus enamik komponente on aukmontaažiga ja ühendusi ei ole kuigi palju. Kahekihilise trükkplaadi tootmine on ka kõige aja- ja kuluefektiivsem variant.

Mootori draiverite moodulite ja arendusplaadi paigutuse tõttu ei olnud võimalik teha trükkplaadi sisse montaažiauke, mis oleks sobinud robotil ettenähtud kinnituskohadega. Seetõttu oli vajalik 3D prinditud vaheplaat, mis sobitas roboti ja trükkplaadi kinnitusaugud.

Joonisel 9 on kujutatud esimese prototüübi trükkplaadi disain. Lisas 3 on toodud pildid trükkplaadi esi- ja tagaküljest. Lisas 4 on näha esimest prototüüpi koos trükkplaadiga pärast kõikide komponentide jootmist ja juhtmete ühendamist. Selleks, et juhtmed

ühendatuks ja nende otsad pandi kleeplindiga kokku. Roboti testsõitude ajal tekkis olukordi, kus ühendus kaugusanduritega kadus ära, kuna juhtmed olid pinge all. Selle lahenduseks lisati ka kaugusandurite pistikutesse veidi kuuma liimi ning see lahendas probleemi. Kuuma liimi ühenduse eemaldamine oli ka üllatavalt lihtne, kuna selleks tuli lihtsalt kuumutada vastavad väljaviike komponendil.

Kõige rohkem probleeme põhjustas aga roboti kõrgus. Kallakuga teel ülesmäge sõites kukkus robot sageli külili, kuna raskuskese paiknes liiga kõrgel. Komponentide paigaldamiseks suhteliselt väikesele trükkplaadile pidi mooduleid paigutama selliselt, et need on kolmel tasandil (ülemine, alumine ja trükkplaadi enda tasand). Juhtmed lisasid veelgi kõrgust ning viisid roboti tasakaalust välja kohe kui robot ühele poole kaldus.

Üldjoontes oli esimene prototüüp edukas ja vigu trükkplaadil ei tuvastatud. Samas jäid juhtmed endiselt ette ning kuuma liimiga juhuslikult lahendatud olukord ei olnud soovitatav. Seati eesmärgiks leida parem lahendus kaugusandurite ühendamiseks. Roboti tasakaalu probleemi lahendamiseks sooviti vabaneda arendusplaatidest, mis robotile kõrgust juurde andsid.

4.8 Majanduslik ülevaade

Lisas 5 on toodud esimese prototüübi komponendid ja nende maksumused. Ühe prototüübi hinnaks kujunes ligikaudu 367,21 € (ilma käibemaksuta). Trükkplaat telliti JLCPCB-st, kus on tellimuse miinimumkoguseks viis trükkplaati. Viie trükkplaadi hinnaks oli 19,28 €, mis teeb tükihinnaks 3,86 €.

5 Teine prototüüp

Teise *Folkrace* roboti disainil võeti arvesse kogemusi, mida saadi eelmise versiooni arendamisel ja Robotexi võistlusel osalemisel. Eelmisel juhtsüsteemil esines palju puudusi: mitme erineva trükkplaadi peale jaotunud elektroonika tõttu oli sellel palju väljaulatuvaid juhtmeid ja liiga kõrge raskuskese. Viimase tõttu tekkis oht roboti ümber minekuks takistuste ja sildade ületamise käigus. Eelmise versiooni arenduse käigus lisandus ka erinevaid soove ja täiendavaid nõudeid roboti järgmise versiooni jaoks, näiteks võimalus akupinge monitoorimiseks.

Kokkuvõtlikult seati uuele disainile järgmised nõuded:

- varasemalt kasutatud arendusmoodulite asendamine,
- ühele trükkplaadile integreeritud süsteem,
- kompaktsus,
- füüsiline kokkusobivus eelmise versiooni 3D-prinditud kerega,
- võimalikult vähe väliseid juhtmeid,
- mugavam testimine,
- akupinge monitoorimine,
- roboti käivitamine kaugjuhtimispuldist.

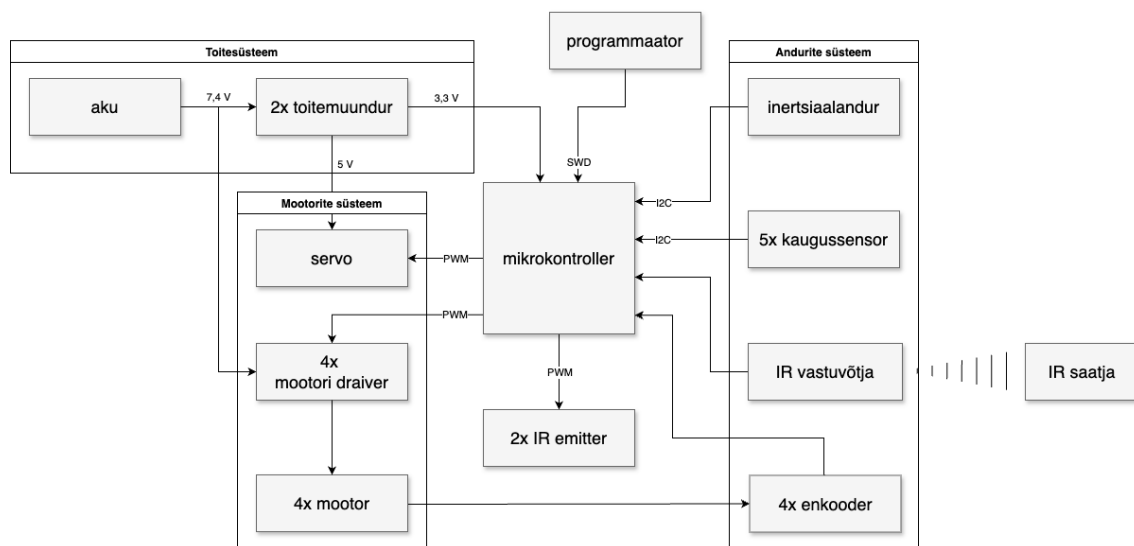
Peamiseks eesmärgiks seati süsteemi ümberehitamine sellisel viisil, et terviklike arendusmoodulite asemel on kogu juhtsüsteem täielikult ühele trükkplaadile integreeritud (välja arvatud kaugussensorid, mis paiknevad trükkplaadiga risti ja enkoodrid, mis on mootorite küljes). Teises versioonis sooviti eemaldada 3D prinditud vaheplaat, mis oli mõeldud trükkplaadi kinnitusaukude sobitamiseks roboti kere omadega. See lisas robotile kõrgust ning eraldi moodulite eemaldamisel ei ole sellist vaheplaati enam vaja.

Mugavamaks testimiseks pidid trükkplaadil olema testpunktid, valgusdiodid toite indikeerimiseks ja pingejagur akupinge monitoorimiseks. Kaugjuhtimispuldist käivitamise võimekuse jaoks plaaniti süsteemile lisada infrapuna-signaali vastuvõtja.

5.1 Süsteemi ülevaade

Joonisel 9 on näha kogu juhtsüsteemi plokkskeem. Üldjoontes toimib kogu süsteem sarnaselt esimese versiooniga, kuid lisandunud on mõned täiendavad funktsioonid. Esimeses versioonis oli arendusplaadil olemas toitemuundur, mis muundas 5 V sisendi 3,3 V peale, mis on vajalik loogika juhtimiseks. Teises versioonis asendati arendusplaat mikrokontrolleriga, mistõttu lisati toitesüsteemi veel üks toitemuundur 3,3 V väljundpinge saamiseks. Mootorite süsteemis funktsionaalselt midagi ei muutunud. Lisandus infrapunasignaali vastuvõtja, mis võimaldab robotit puldist käivitada ja peatada. Kogu süsteemi juhitakse mikrokontrolleriga.

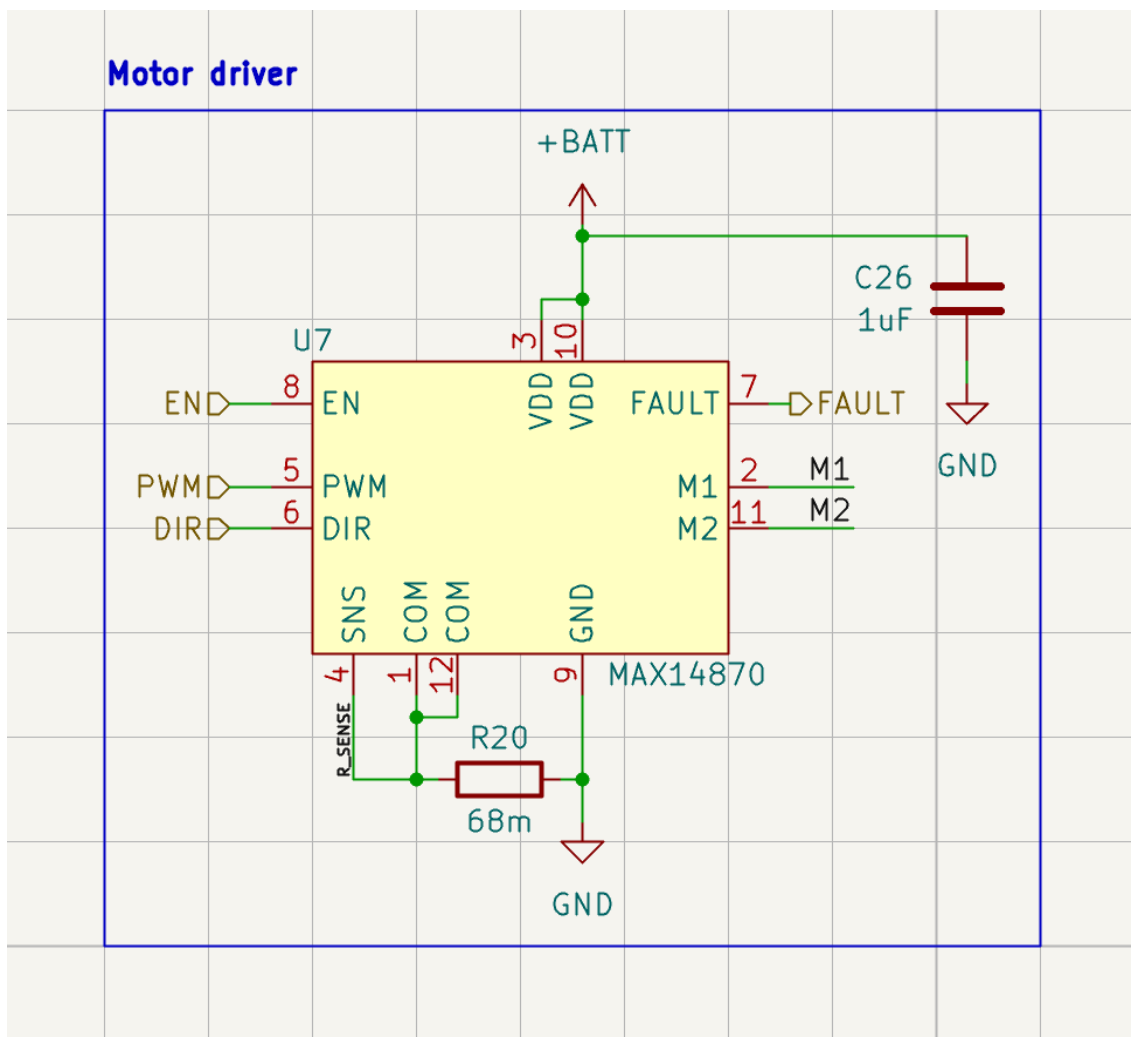
Eelmise versiooni arendusplaadil oli juba integreeritud lahendus programmeerimiseks ja silumiseks, kuid sellel versioonil tuli programmeatori liides lisada eraldi. Lisati ka kaks infrapuna emitterit, mille funktsiooniks on teiste robotite andurite segamine. Emitterid paigutati roboti tagaossa, kus need ei sega roboti enda kaugusandureid.



Joonis 9. Teise versiooni juhtsüsteemi plokkskeem.

5.2 Mootorite alamsüsteemi koostamine

Mootorite alamsüsteemis jäid mootorid ja servo samaks, kuna need sobisid hästi antud rakenduse jaoks. Eelmises versioonis kasutusel olnud *Dual MAX14870 Motor Driver Shield* arendusplaadid asendati eraldiseisvate MAX14870 mootori draiveritega [25]. Nende põhimõtteskeem on toodud joonisel 10. Mootori draiveri andmelehe põhjal arvutati šunttakisti R20 väärtuseks 62,5 mΩ [25, lk 12], arvestades, et mootori poolt tarbitav maksimaalne vool võib olla 1,6 A [18]. Lähim takisti väärtus E12-seerias on seega 68 mΩ. Mootori draiveri toite juures on vajalik ka keraamiline lahtisidestuskondenaator mahtuvusega 1 uF [25, lk 8], et siluda toitepinget.



Joonis 10. Mootorite alamsüsteemi põhimõtteskeem.

5.3 Andurite valimine

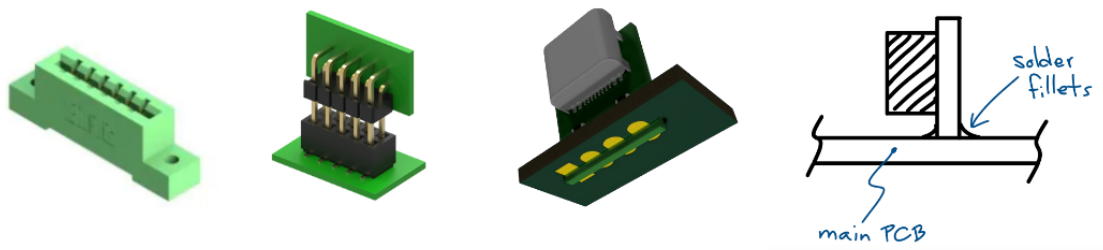
Esimeses versioonis valitud Pololu magnetilised enkoodrid sobisid hästi ning need otsustati muutmata jätta. Enkoodri põhimõtteskeem on toodud lisas 6.

ToF andurid toimisid samuti hästi, kuid probleeme põhjustasid juhtmed, mis jäid ette ToF anduritele ning mille ühendused olid problemaatilised. Selle lahendamiseks mõeldi välja erinevaid variante:

1. Peenemate juhtmete ja väiksemate pesade kasutamine (näiteks samad JST SH-tüüpi juhtmed ja pesad, mis olid kasutusel enkoodrite jaoks)
2. Andurite ühendamine trükkplaadi külge, mis ei vajaks üldse juhtmeid

Mõlemad lahendused tähendavad, et ToF andurile tuleb disainida sobiv trükkplaat ning esimeses prototüübis kasutatud kaugusandurite mooduleid ei ole võimalik kasutada. Esimene variant on kulukas, kuna nimetatud juhtmed on suhteliselt kõrge hinnaga. Nende kättesaadavus töö kirjutamise ajal oli piiratud, seega sellest variandist loobuti.

Teise variandi disainimiseks leiti palju erinevaid lahendusi ning mõned võimalused on kujutatud joonisel 11. Näiteks on esimesel pildil kujutatud pesa, kuhu kinnitub teise trükkplaadi serv. Teisel pildil on näha täisnurga all asetsev piikriba, mis on kõige lihtsam lahendus ning komponendid on madala hinnaga ja lihtsasti kättesaadavad kõigilt tarnijatelt. Kolmandal pildil on põhisüsteemi trükkplaadi sees pilu, kuhu joodetakse teine trükkplaat. Selline lahendus on vastupidav ja antud variantidest kõige kompaktsem. Samas vähendab see trükkplaadil kasutatavat pindala. Neljandal pildil on sarnane lahendus, aga teine trükkplaat ei kinnitu pilusse, vaid trükkplaadi tasapinnale. Selline kinnitus ei ole kõige sobivam kiiresti liikuva roboti jaoks, kuna on jäik ning tina võib lahti murduda koos pinnalaotuse platsidega. Seda soodustab vibratsioon roboti sõitmise ajal ja potentsiaalselt ka kokkupõrked teiste robotitega.



Joonis 11. Ülevaade erinevatest kinnitusvariantidest kahe trükkplaadi vahel, mis on üksteise tasapindade suhtes risti [26] [27] [28] [29].

Leitud lahendustest valiti teisel pildil kujutatud variant, kuna see on kõige odavam, kättesaadavam ja piisavalt vastupidav.

Kuna otsustati disainida eraldi trükkplaat ToF andurite jaoks, siis sooviti kasutusele võtta ka uuemad ja võimekamad andurid. Esimeses versioonis kasutusel olnud VL53L1X on ühepikslise andur, kuid ST Microelectronics ettevõttel on tootevalikus uuemad ja võimekamad mitmepikslised andurid. Need võimaldavad luua 8x8 pikslise sügavuskaardi kuni 4 meetri piires. VL53L8CX on kõige uuem ja kõige paremate karakteristikutega andur, kuid töö kirjutamise hetkel ei olnud see saadaval ning seetõttu võeti järgmine sarnaste näitajatega variant VL53L5CX.

Inertsiaalanduri moodul vahetati samuti välja ning otsustati LSM6DSOTR kasuks, kuna selle kiirendusanduril on võrreldes teiste sama seeria komponentidega väiksem müra.

5.4 Mikrokontrolleri valimine

Mikrokontrolleri valimisel lähtuti eelmise roboti peal kasutusel olnud Teensy 4.1 mikrokontrollerist. Sooviti leida mikrokontroller, mis oleks näitajalt võimalikult lähedal, kuid oleks kergemini kättesaadav. Kuna ST Microelectronics ettevõttel on väga lai tootevalik ja nende mikrokontrollerid on ka saadaval kõikidelt peamistelt elektroonika edasimüüjatelt, otsustati leida sobiv mikrokontroller nende tootevalikust. Nende tugevaks küljeks on muuhulgas ka võimalus kergesti vahetada ühte mikrokontrollerit teise vastu, kuna need on disainitud sarnastel põhimõtetel ning programmikoodi loogikas ulatuslikke muudatusi ei kaasne. Tööstuses on STM32 mikrokontrollerid samuti laialdaselt kasutatavad.

Tabelis 3 on ülevaade roboti komponentidest ja liidestamisest kontrolloriga. Kokku peab seega arendusplaadil olema vähemalt 47 väljaviiku.

Tabel 3. Teise prototüübi komponentide vajaminev perifeeria.

Alamsüsteem	Komponent	GPIO	PWM	I2C	SWD	USART	Kokku
Mootorid	Draiver	6	4				10
	Servo		1				1
Sensorid	Enkooder	8					8
	TOF	10		2			12
	IMU			2			2
Muu	IR receiver	1					1
	IR emitter		2				2
	LED	6					6
	Programmeerimisliides				3	2	5
Kokku		31	7	4	3	2	47

Teensy 4.1 arendusplaadi mikrokontrolleri tuumaks on ARM Cortex M7, mis on üks võimekamaid mikrokontrolleri tuumasid. Otsiti sama tuumaga mikrokontrollereid ning kõige kõrgema taktsagedusega neist oli STM32H723VGT6 [30]. Tabelis 4 on toodud esimese ja teise prototüübi mikrokontrollerite võrreldud tunnuste ülevaade. Mikrokontroller jääb küll alla Teensy 4.1 mikrokontrollerile, kuid sellegipoolest on selle karakteristikud hinnanguliselt piisavad *Folkrace* roboti sujuvaks juhtimiseks. Oluline on ka märkida, et valitud mikrokontrolleril on rohkem digitaalseid sisend-väljund väljaviike kui oli Teensy 4.1 arendusplaadil, mis võimaldab kasutusele võtta rohkem perifeeriakomponente. STM32H723VGT6 mikrokontrolleril on piisavalt väljaviike kõikide selliste komponentide jaoks.

Tabel 4. Esimese ja teise prototüübi mikrokontrollerite võrdlus.

Omadus	Esimene prototüüp	Teine prototüüp	Ühik
Arendusplaat	Teensy 4.1	-	-
Protsessor	IMXRT1062DVJ6	STM32H723VGT6	-
Tuum	ARM Cortex M7	ARM Cortex M7	-
FPU	32 & 64	32 & 64	bitti
Taktsagedus	600	550	MHz
Välkmälu	7936	1024	kB
Töömälu	1024	564	kB
DMA	32	16	kanalit
Digitaalne sisend-väljund	55	80	väljaviiku
Maksimaalne väljundvool	10	20	mA
PWM väljundite arv	31	45	väljaviiku
Jadaliides	8	6	-
I2C	3	5	-

5.5 Roboti käivitamine

Robotit on lubatud reeglite järgi käivitada nii surulüliti kui ka kaugjuhtimispuldiga. Infrapuna vastuvõtja on üks lihtsamaid variante roboti käivitamiseks ning robotikavõistlustel laialdaselt levinud. Infrapuna vastuvõtjaks valiti TSOP38238, kuna see on levinud komponent hobialektroonikute seas. Saatjana on võimalik kasutada pea ükskõik millist koduelektroonika juhtimiseks mõeldud kaugjuhtimispuhti.

5.6 Toitesüsteemi koostamine

Uue süsteemi toiteks kasutati, nagu ka esimese versiooni puhul, kahe jadaelemendiga akut toitepingega 7,4 V ja mahutavusega 500 mAh. Eelmises versioonis kasutati pingemuunduri arendusplaati 5 V saavutamiseks ning 3,3 V saadi otse mikrokontrolleri arendusplaadilt. Kuna arendusplaadid uues versioonis eemaldati, siis tekkis vajadus kahe toitepinge muunduri järele.

Toitepinge muundamiseks 5 V peale valiti pinget madaldav impulss-regulaator TPS563203, mille eeliseks võrreldes lineaarse pingemuunduriga on suurem kasutegur. 5 V muundamiseks 3,3 V pingele valiti lineaarne pingemuundur, mis on küll madalama kasuteguriga, kuid see-eest lihtsama skeemiga kui impulss-muundur.

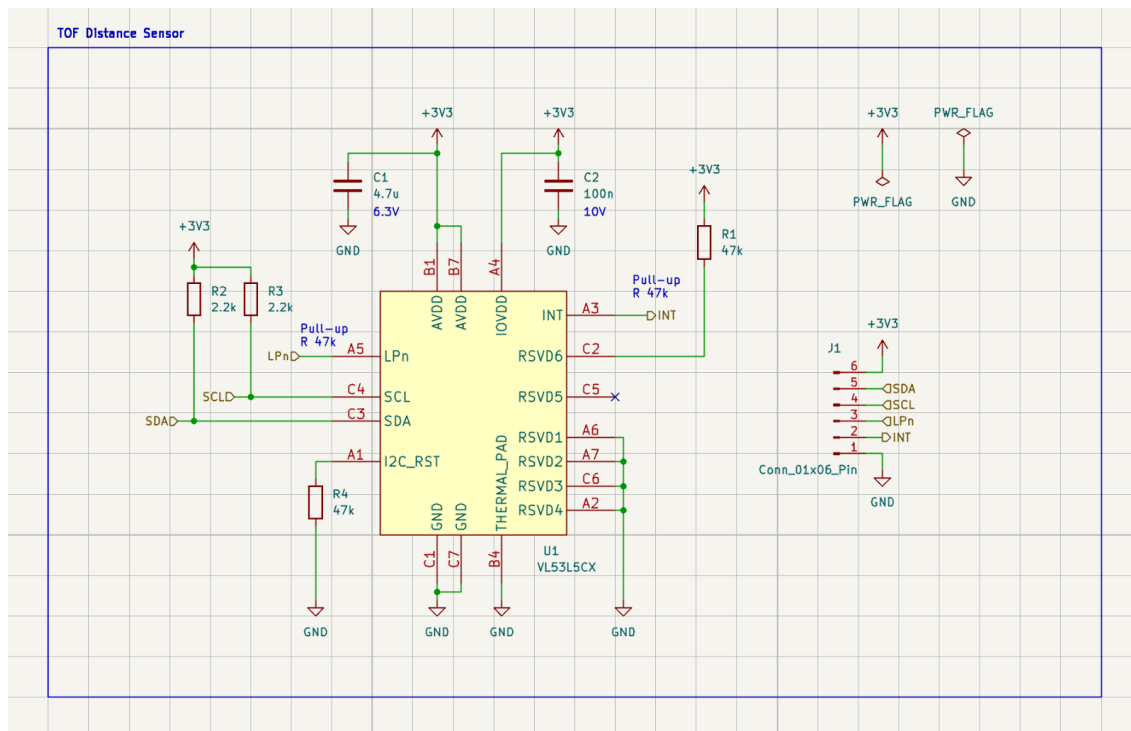
5.7 Elektriskeemid ja trükkplaadid

Elektriskeemide koostamisel kasutati ära KiCad-i võimekust luua korduvate osade jaoks hierarhilisi lehti, mis muudab skeemid selgemaks ja ülevaatlikumaks. Lisas 6 on kujutatud ülevaade teise prototüübi põhimõtteskeemidest.

Trükkplaadi disainil lähtuti peamiselt roboti kere mõõtmetest ja ToF andurite asukohtadest, kuna need pidid kinnituma trükkplaadile. Otsustati disainida neljakihiline trükkplaat, kuna trükkplaadi keerukus oli suurem ja kõik rajad ei oleks kahele kihile ära mahtunud. Lisas 7 on kujutatud teise prototüübi trükkplaadi disain ja pildid trükkplaadi esi- ja tagaküljest. Trükkplaadi suuruseks kujunes 112 mm x 65 mm.

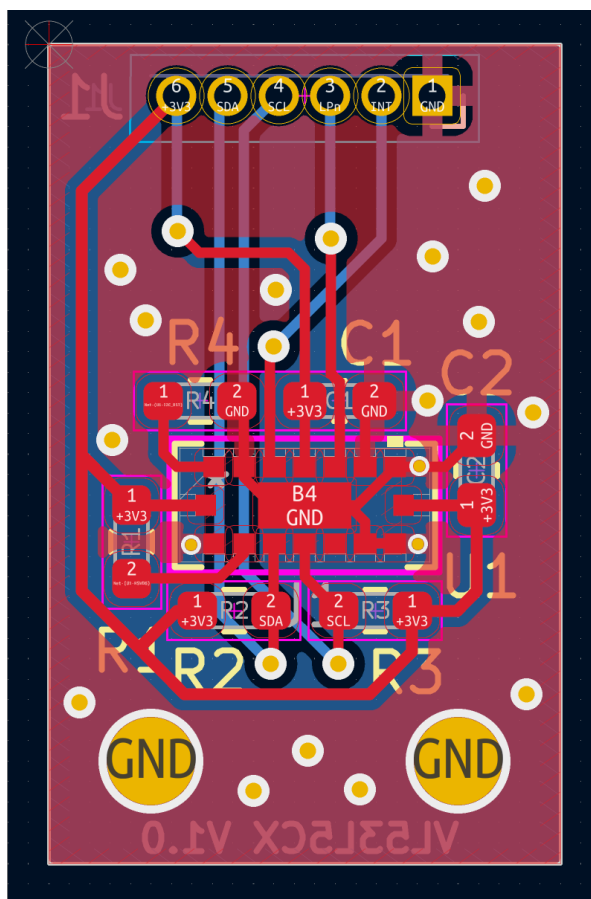
5.8 Kaugusanduri elektriskeem ja trükkplaat

Kaugusanduri elektriskeem on toodud joonisel 12. Kaugusandurite jaoks loodi eraldi trükkplaat, kuna viimased peavad olema peamise trükkplaadi tasapinna suhtes füüsiliselt risti. Kuna kaugusanduri trükkplaat on väikeste mõõtmetega ning komponentide paigutus sellel on korduv, siis on võimalik lasta tootjal trükkplaadid paneliseerida. See lihtsustab ka komponentide jootmise protsessi.



Joonis 12. Kaugusanduri põhimõtteskeem.

Joonisel 13 on kujutaud kaugusanduri trükkplaadi disain. Kõik komponendid asuvad plaadi ühel küljel kuna teise külje vastas asuvad 3D printitud mehaanilised toed. Kaugusanduri trükkplaadi mõõtmete määramisel lähtuti varem kasutatud kaugusandurite mõõtudest. Andurite kruviaukude asukohad sõltuvad sellest kummale roboti küljele andurid kinnitatakse. Vältimaks kahe eraldi disaini koostamist lisati kruviaugud kaugusanduri trükkplaadi mõlemasse alumisse nurka.



Joonis 13. Kaugusanduri trükkplaadi disain.

Kaugusandur ise paigutati trükkplaadi keskele. Kuna kaugusanduri trükkplaadi tagaküljel on 3D-prinditud tugi, siis pidi trükkplaati pikendama ühenduskoha (J1) võrra. Lahtisidestuskondensaatorid paigutati toiteviikude lähedale, et need oleksid võimalikult efektiivsed. Suure mahtuvusega C1 peamine funktsioon on ajutine toite tagamine kui anduri voolutarve mingil põhjusel hetkeliselt kasvab. Väiksema mahtuvusega C2 filtreerib välja võimalikke häireid.

Trükkplaadi mõlema poole kasutamata vasekihid ühendati maandusega ning parema ühenduse jaoks loodi nende vahele läbiviigud üle kogu plaadi. Kuna trükkplaadi pindala on kõigi vajalike ühenduste jaoks piisavalt suur siis otsustati siin majanduslikel kaalutlustel piirduda kahekihilise lahendusega.

5.9 Majanduslik ülevaade

Lisas 8 on teise esimese prototüübi komponendid ja nende maksumused. Anduri trükkplaat on üksi tellimiseks liiga väike ning kuna ühel robotil läheb neid vaja viis tükki, siis tasub neid paneliseerida. Mõõtmete poolest sai paneliseerida minimaalselt 4x4 anduri trükkplaati ning kuna miinimumkogus tellimiseks on 5, siis kaugusandurite koguseks kujunes 80. Tellimuse hind koos stensiilidega oli 52,68 €, mis teeb ühe trükkplaadi hinnaks 0,66 €.

Viie põhitrükkplaadi hinnaks koos stensiilidega oli 59,31 €, mis teeb tükihinnaks 11,86 €. Ühe prototüübi hinnaks kujunes ligikaudu 342,94 € (ilma käibemaksuta), mis on mõnevõrra soodsam kui esimene prototüüp. Lisaks on trükkplaatide hinnad arvestatud eraldi kohaletoimetamisega, seega ühe tellimusena tehes oleks ka see kulu väiksem. Kui arvestada ka reaalselt kasutatavaid koguseid oleks hind veelgi madalam.

6 Kokkuvõte

Bakalaureusetöö ülesandeks oli välja töötada elektroonika autonoomsele võidusõidurobotile. Peamiseks kriteeriumiks oli vastavus *Folkrace* võistlusreeglites kehtestatud nõuetele.

Lõputöö käigus uuriti, millistele nõuetele peab võistlusrobot vastama, otsustati milliseid elektroonika komponente on vaja, valiti välja sobivad komponendid, koostati elektriskeemid ning disainiti trükkplaat. Seejärel analüüsiti puudujääke ning loodi kompaktsema ja mitmekülgsema lahenduse kontseptsioon. Selle jaoks valiti välja mikrokontroller, andurid ja muud vajalikud komponendid ning koostati elektriskeemid.

Esimese prototüübi koostamine oli edukas ning valmis *Folkrace* robot, mis võistles ka Robotexil. Suurimaks puudujäägiks oli roboti kõrgus, mis tulenes roboti väiksetest mõõtmetest ja sellest tulenevast vajadusest paigutada moodulkomponendid mitmele tasandile. Kuna robot oli üpris kõrge, siis kallakuga teel ülesmäge sõites võis robot külili kukkuda. Seati eesmärgiks leida parem lahendus kaugusandurite ühendamiseks, kus juhtmed ei oleks anduritel ees. Roboti tasakaalu probleemi lahendamiseks sooviti vabaneda arendusplaatidest, mis robotile kõrgust juurde andsid.

Teise prototüübi koostamisel otsiti asendused moodulkomponentidele ning leiti lahendus kaugusandurite ühendamiseks viisil, et juhtmeid ei olnud üldse vaja. Koostati elektriskeemid ja viimaks disainiti trükkplaat. Lisaks disainiti eraldi trükkplaat ka ToF andurile, et see sobiks disainitud lahendusega.

Kasutatud kirjandus

- [1] Robotex International, „Robotex ajalugu,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://robotex.international/et/robotex-ajalugu/>. [Kasutatud 3. märts 2024].
- [2] R. a. K. K. a. J. K. Derevski, „Robotexi mõju-uuring 2017 - 2019,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ibs.ee/wp-content/uploads/2022/07/Robotexi-uuringu-aruanne.pdf>. [Kasutatud 3. märts 2024].
- [3] J. a. E. H. R. a. F. L. a. W. D. Borenstein, „Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques,“ *Journal of Field Robotics*, kd. 14, nr 4, lk 231-249, 1997.
- [4] J. a. E. H. R. a. F. L. Borenstein, "Where am I?" Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning, The University of Michigan, 1996.
- [5] M. O. A. a. M. M. H. a. S. M. I. a. I. N. B. Aqel, „Review of Visual Odometry: Types, Approaches, Challenges, and Applications,“ *SpringerPlus*, kd. 5, nr 1897, 2016.
- [6] „Capacitive Encoder with Higher Accuracy and Durability,“ 29. märts 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/cui-capacitive-encoder-with-higher-accuracy-and-durability>. [Kasutatud 13. mai 2024].
- [7] J. Kordik, „Comparing Encoder Technologies,“ 15. juuni 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.machinedesign.com/motion-system-design/article/21133952/comparing-encoder-technologies>. [Kasutatud 13. mai 2024].
- [8] RealPars B.V., „What is the Difference Between Absolute and Incremental Encoders?,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.realpars.com/blog/absolute-vs-incremental-encoder>. [Kasutatud 7. mai 2024].
- [9] J. Tang, „A Comparison of Encoder Technologies,“ 30. november 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://blog.orientalmotor.com/an-overview-of->

optical-magnetic-and-capacitive-encoder-technologies-and-selection-tips.

[Kasutatud 13. mai 2024].

- [10] „Magnetic rotary encoder. Working Principle,“ 5. august 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eltra-encoder.eu/news/magnetic-rotary-encoder-working-principle>. [Kasutatud 13. mai 2024].
- [11] P. Norak, „TalTech Folkrace reeglid,“ 6. september 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1d0lc3vC3JUgBAavhoGWsVMhc3c0zQCaR/view>. [Kasutatud 13. mai 2024].
- [12] Robotex, „Tehnikaülikool oli Robotexil võidukas,“ 6. detsember 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://tehnika.postimees.ee/6471245/tehnikaulikool-oli-robotexil-voidukas>. [Kasutatud 6. mai 2024].
- [13] P. a. H. W. Horowitz, The Art of Electronics, Cambridge University Press, 2015.
- [14] A. Solovev, „Comparing the Top 5 CAD Software for Electronics Design Development,“ 27. juuni 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://hackernoon.com/comparing-the-top-5-cad-software-for-electronics-design-development>. [Kasutatud 13. mai 2024].
- [15] Altium Limited, „Altium Designer,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.altium.com/altium-designer>. [Kasutatud 3. märts 2024].
- [16] KiCad, „KiCad EDA,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kicad.org/>. [Kasutatud 3. märts 2024].
- [17] Pololu Corporation, „Pololu,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pololu.com/about>. [Kasutatud 13. mai 2024].
- [18] Pololu Corporation, „50:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V with Extended Motor Shaft,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pololu.com/product/2213>. [Kasutatud 13. mai 2024].
- [19] Pololu Corporation, „Dual MAX14870 Motor Driver Shield for Arduino,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pololu.com/product/2519>. [Kasutatud 10. mai 2024].
- [20] Pololu Corporation, „Magnetic Encoder Pair Kit with Top-Entry Connector for Micro Metal Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pololu.com/product/4760>. [Kasutatud 8. mai 2024].

- [21] Pololu Corporation, „VL53L1X Time-of-Flight Distance Sensor Carrier with Voltage Regulator, 400cm Max,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pololu.com/product/2519>. [Kasutatud 2. mai 2024].
- [22] Pololu Corporation, „MinIMU-9 v5 Gyro, Accelerometer, and Compass (LSM6DS33 and LIS3MDL Carrier),“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pololu.com/product/2738>. [Kasutatud 13. mai 2024].
- [23] PJRC, „Teensy® 4.1 Development Board,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>. [Kasutatud 10. mai 2024].
- [24] Pololu Corporation, „5V, 3.2A Step-Down Voltage Regulator D36V28F5,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pololu.com/product/3782>. [Kasutatud 1. mai 2024].
- [25] Maxim Integrated, „MAX14870 andmeleht,“ juuni 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX14870-MAX14872.pdf>. [Kasutatud 15. aprill 2024].
- [26] GCT, „Board to Board Connectors,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://gct.co/board-to-board-connector>. [Kasutatud 2. aprill 2024].
- [27] Electrical Engineering Stack Exchange, „How to mount component perpendicular to PCB,“ 8. aprill 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/367167/how-to-mount-component-perpendicular-to-pcb>. [Kasutatud 2. aprill 2024].
- [28] KiCad, „Footprint for daughterboard mounted vertically in slot - best method?,“ 12 detsember 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://forum.kicad.info/t/footprint-for-daughterboard-mounted-vertically-in-slot-best-method/26396>. [Kasutatud 2. aprill 2024].
- [29] DigiKey, „Connector edge single female 8 positions,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.digikey.ee/en/products/detail/edac-inc/833-008-524-112/11136336?s=N4IgTCBcDaIIwFY4FoAcBmdyAM3XITABZk44xkA5AERAF0BfIA>. [Kasutatud 2. aprill 2024].
- [30] STMicroelectronics, „STM32H723VGT6 andmeleht,“ november 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h723ve.pdf>. [Kasutatud 15. märts 2024].

- [31] HobbyKing, „Turnigy™ TGY-D56LV Coreless Low Voltage DS/MG Servo,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://hobbyking.com/en_us/turnigytm-tgy-d56lv-coreless-low-voltage-ds-mg-servo-0-89kg-0-10sec-5-6g.html?queryID=bd8bc7a5316a12ee5a86fd4ee842a696&objectID=40594&indexName=hbk_live_products_analytics. [Kasutatud 5. mai 2024].
- [32] „Dual MAX14870 Motor Driver Shield for Arduino,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pololu.com/product/3415>. [Kasutatud 3. mai 2024].
- [33] HobbyKing, „Turnigy 500mAh 2S 20C Lipo Pack,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-500mah-2s-20c-lipo-pack.html?queryID=8d12e0eb372eeb9aa07a8e2f853676d9&objectID=18566&indexName=hbk_live_products_analytics. [Kasutatud 7. mai 2024].

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

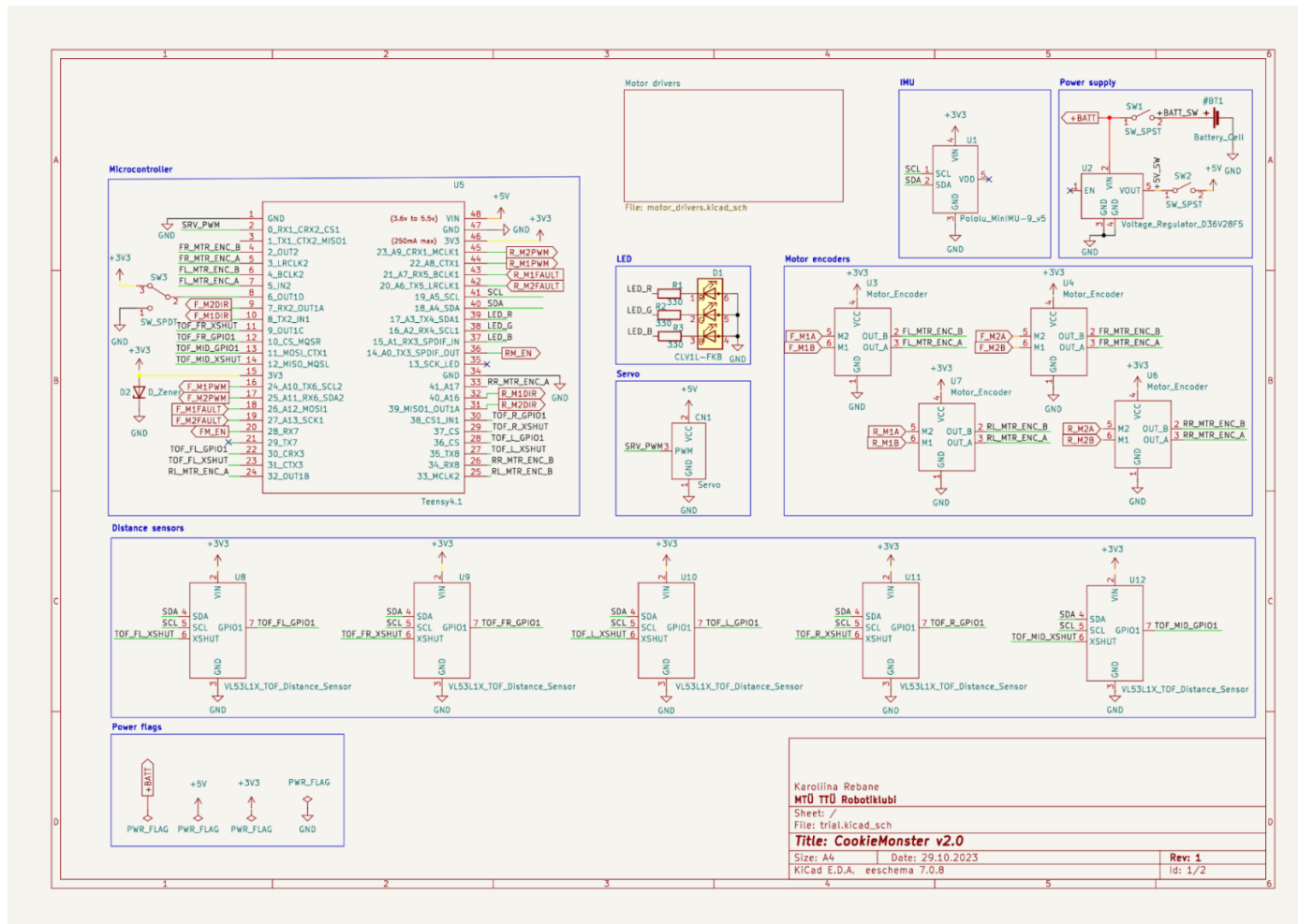
Mina, Karoliina Rebane

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „*Folkrace* võistlusroboti elektroonika arendus“, mille juhendaja on Ivo Mürsepp
 - 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.

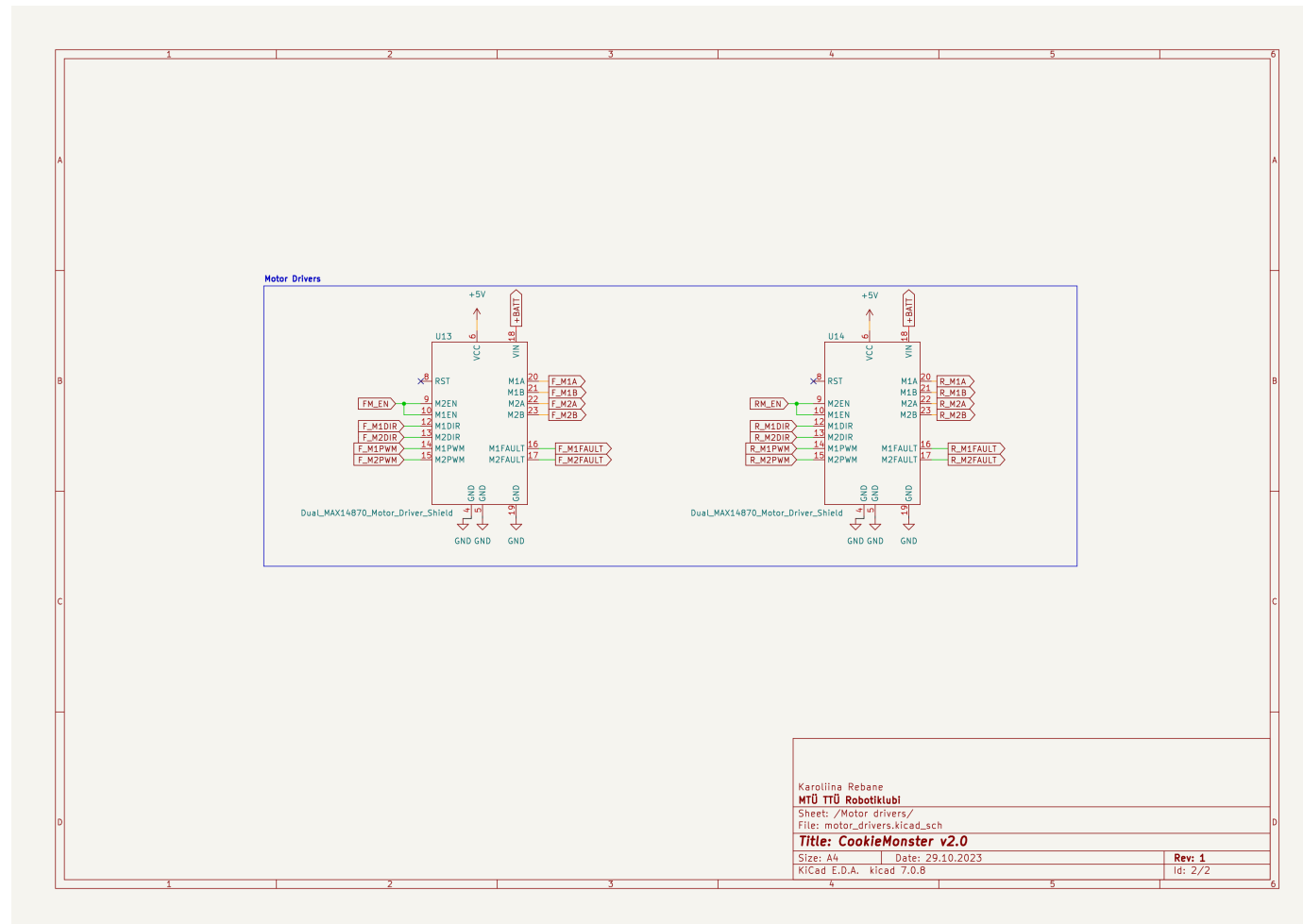
13.05.2024

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

Lisa 2 – Esimese prototüübi põhimõtteskeemid

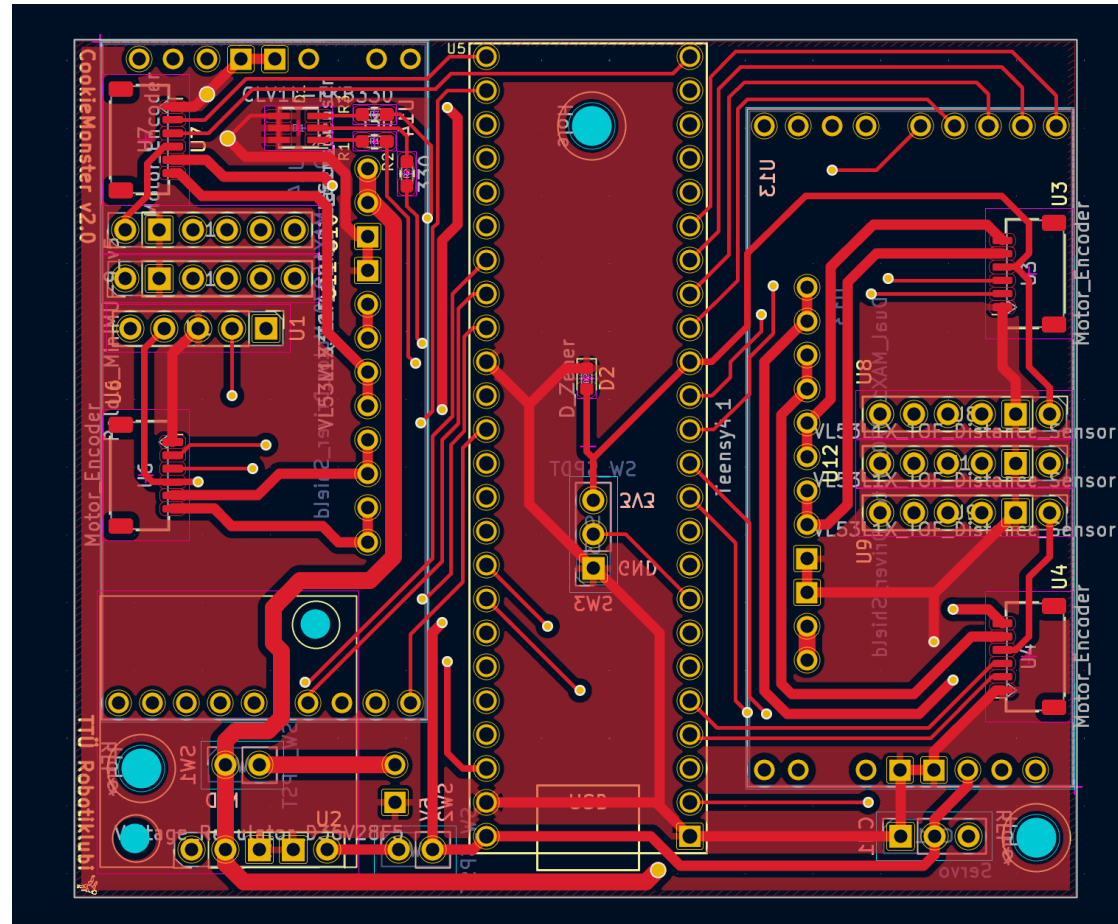


Mootori draiverite põhimõtteskeem:

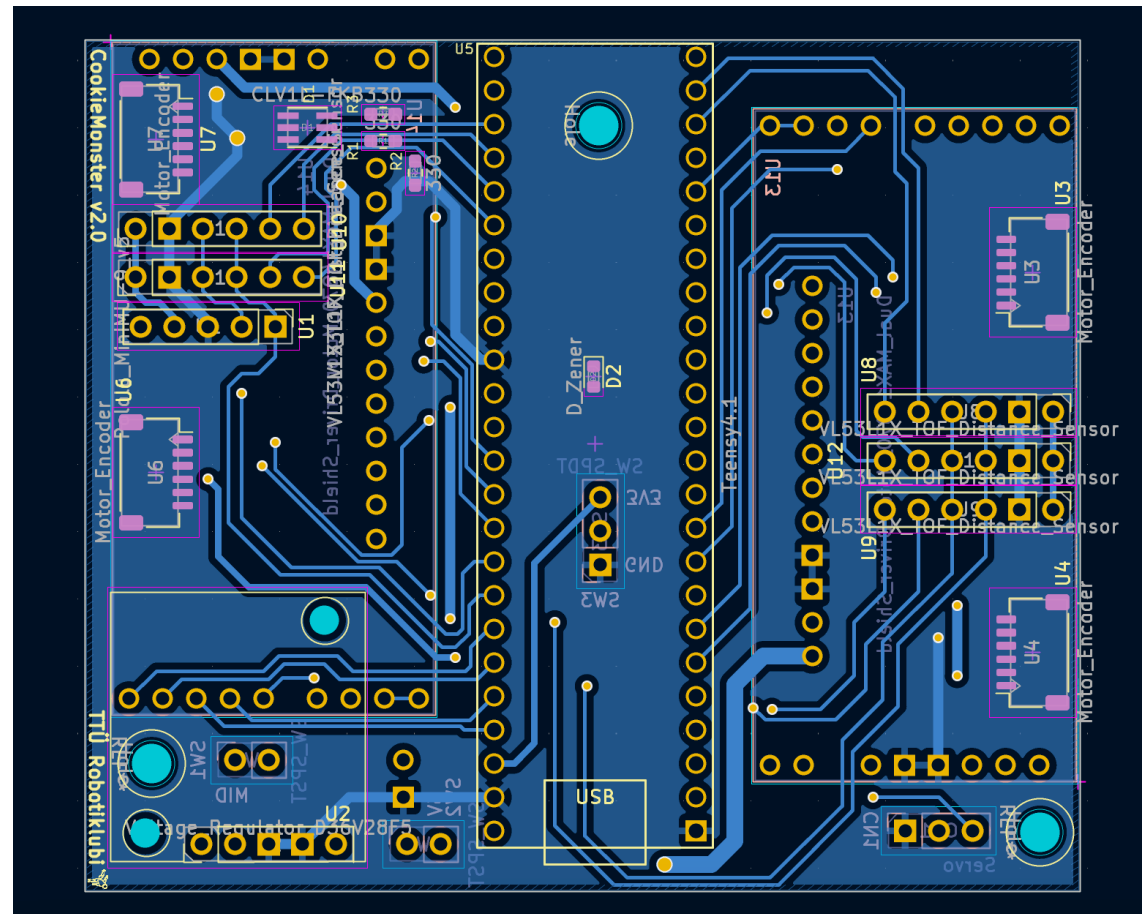


Lisa 3 – Esimese prototüübi trükkplaat

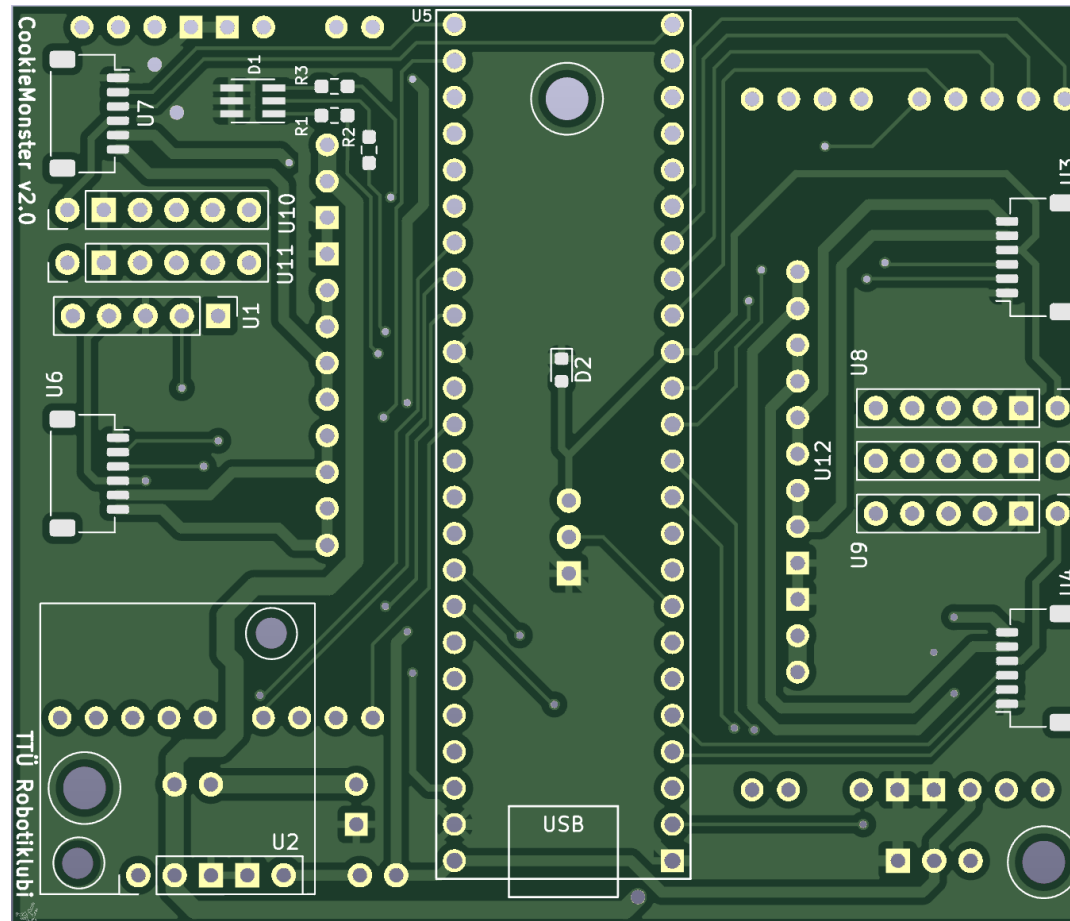
Trükkplaadi esikülje disain:



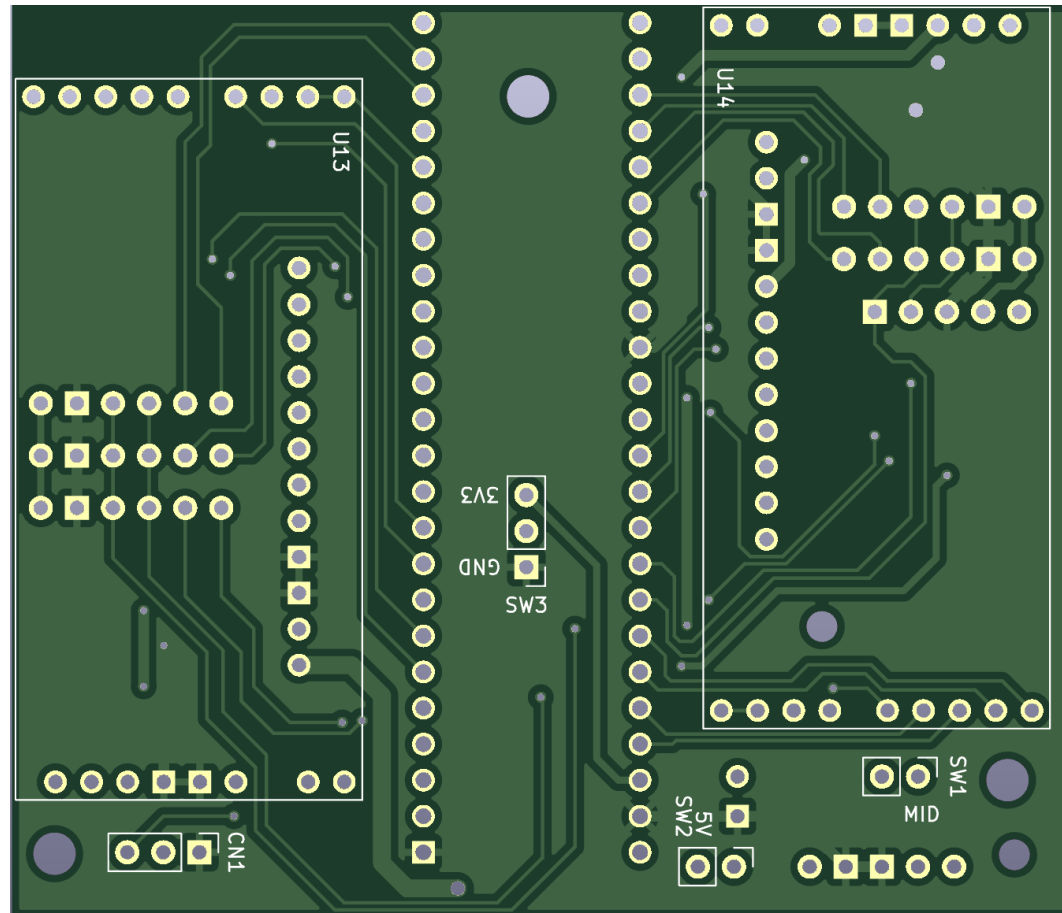
Trükkplaadi tagakülje disain:



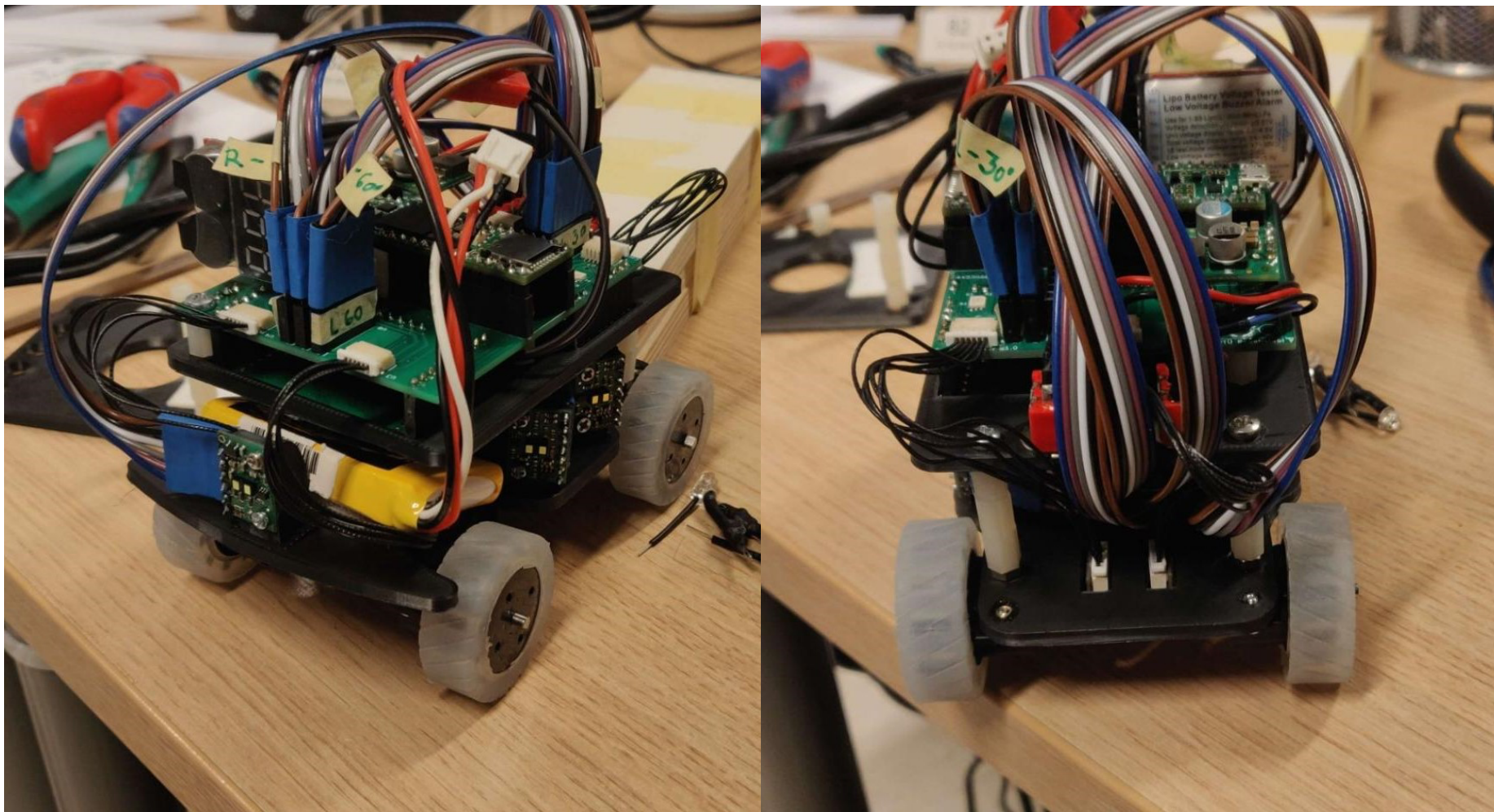
Trükkplaadi esikülg:



Trükkplaadi tagakülg:



Lisa 4 – Esimene prototüüp eest- ja tagantvaatest

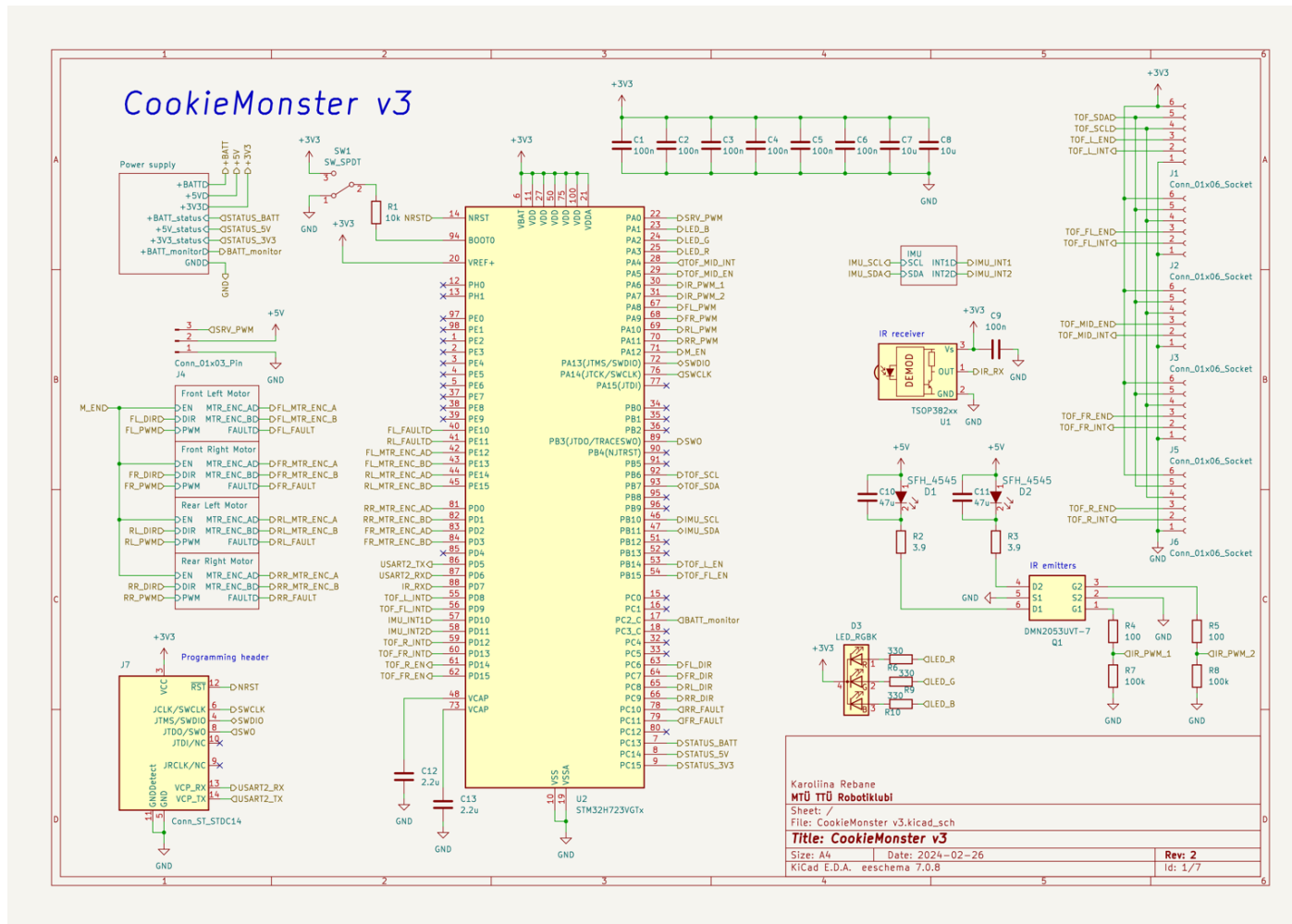


Lisa 5 – Esimese prototüübi komponentide nimekiri

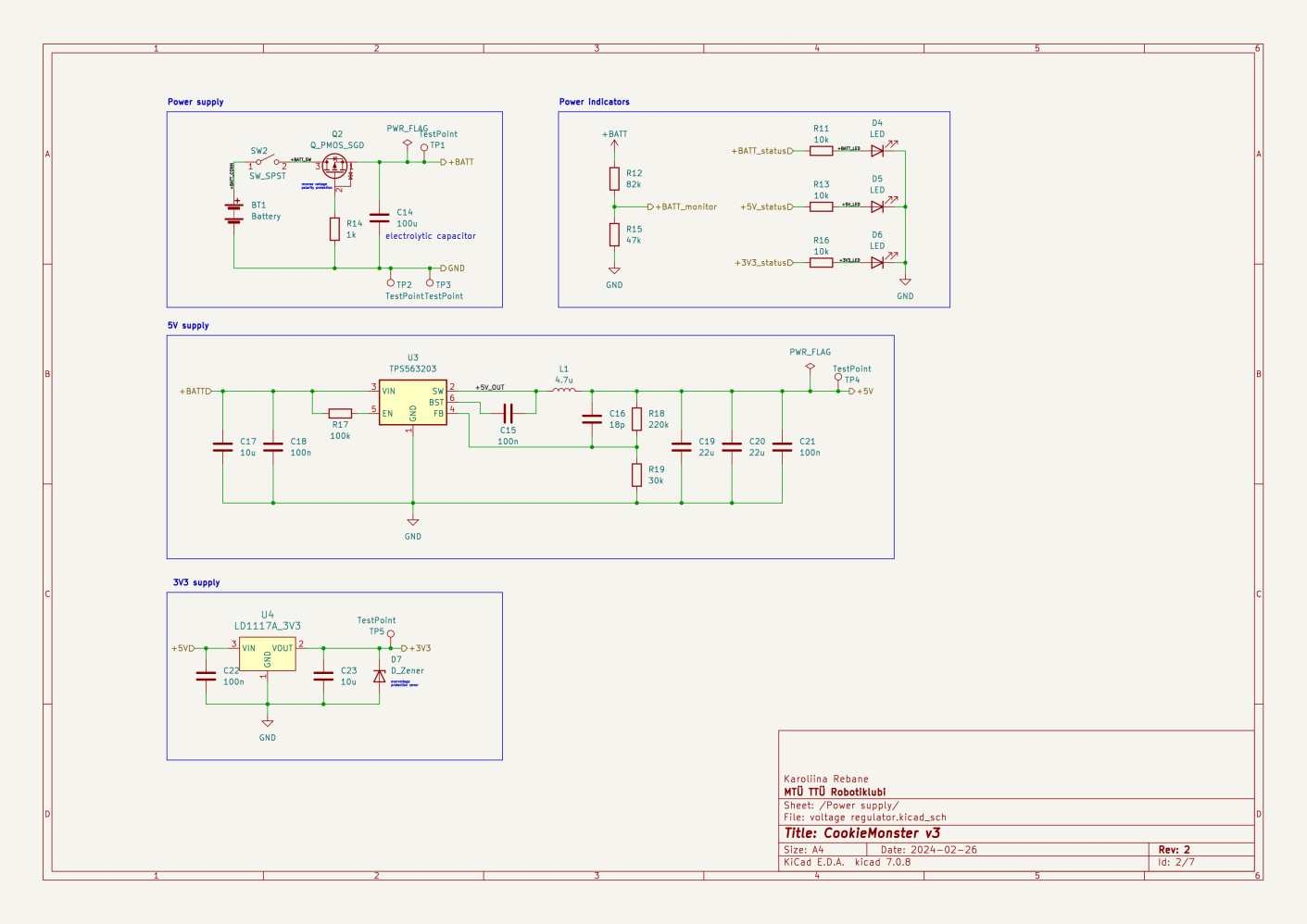
Komponent	Nimi	Skeemitähis	Trükkplaadi pinnalaotus	Tarnija	Tüki hind (€)	Kogus	Hind kokku (€)
Trükkplaat	Kahekihiline trükkplaat	-	-	JLCPCB	3.86	5	19.28
Mootorid	50:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V with Extended Motor Shaft	-	-	TME	21.88	4	87.52
Enkooderid	Magnetic Encoder Pair Kit with Top-Entry Connector for Micro Metal Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V	-	-	TME	7.89	4	31.56
Mootorite driver	Dual MAX14870 Motor Driver Shield for Arduino	U13,U14	Dual MAX14870 Motor Driver Shield	TME	20.32	2	40.64
ToF	VL53L1X Time-of-Flight Distance Sensor Carrier with Voltage Regulator, 400cm Max	U9,U10,U8,U11,U12	TOF_PinHeader_1x06_P2.54mm_Vertical	TME	19.85	5	99.25
IMU	MinIMU-9 v5 Gyro, Accelerometer, and Compass (LSM6DS33 and LIS3MDL Carrier)	U1	IMU_PinHeader_1x05_P2.54mm_Vertical	TME	31.54	1	31.54
LDO	5V, 3.2A Step-Down Voltage Regulator D36V28F5	U2	Regulator_PinHeader_1x05_P2.54mm_Vertical	TME	16.29	1	16.29
LED	OSTAMC51A5A OPTOSUPPLY	D1	LED_Avago_PLCC6_3x2.8mm	TME	1.20	1	1.20
Lüliti	KNX1	SW1,SW2	PinHeader_1x02_P2.54mm_Vertical	TME	1.33	2	2.66
Lüliti	KNX1	SW3	PinHeader_1x03_P2.54mm_Vertical	TME	1.33	1	1.33
Juhtmed	ASSHSSH28K102 JUMPER SSH-003T-P0.2-H X2 4"	-	-	DigiKey	0.40	24	9.67

Juhtmepesad	SHR-06V-S-B CONN RCPT HSG 6POS 1.00MM	-	-	DigiKey	0.18	8	1.44
Enkoodrite pistikud	BM06B-SRSS-TB (LF)(SN)JST	U6,U4,U3,U7	JST_SH_SM06B-SRSS-TB_1x06- 1MP_P1.00mm_Horizontal	TME	0.70	4	2.80
Servo	Turnigy TGY-D56LV Coreless Low Voltage DS/MG Servo	CN1	PinHeader_1x03_P2.54mm_ Vertical	HobbyKing	8.29	1	8.29
Aku	ZIPPY Compact 500mAh 2S 35C Lipo Pack	-	-	HobbyKing	5.56	1	5.56
Mikrokontroller	Teensy 4.1 Development Board	U5	Teensy41	PRJC	27.46	1	27.46
Takistid	330R	R1,R2,R3	R_0603_1608Metric_Pad0.98x 0.95mm_HandSolder			3	
Zener	D_Zener	D2	D_0603_1608Metric			1	
Hind kokku							367.21

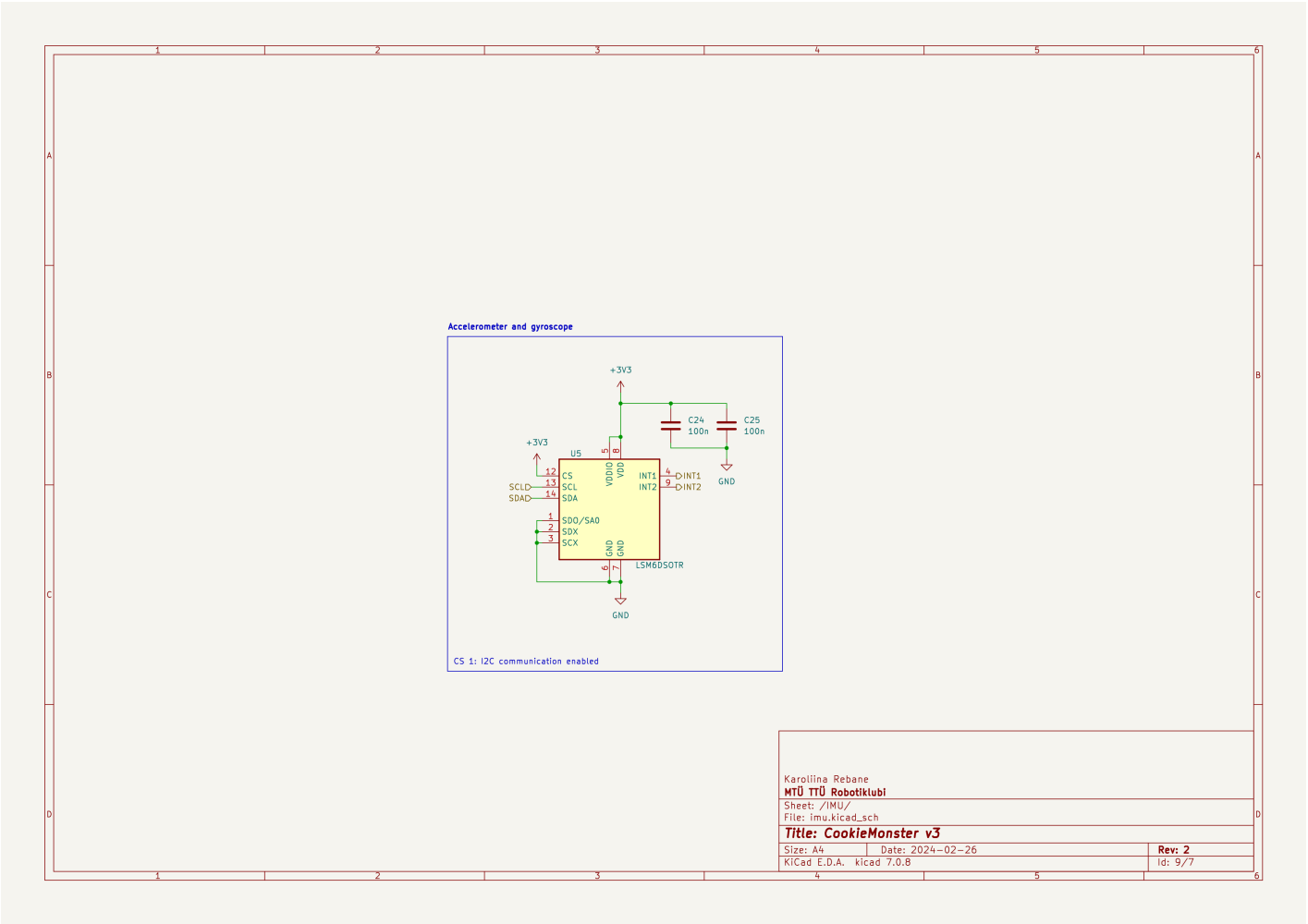
Lisa 6 – Teise prototüübi põhimõtteskeemid



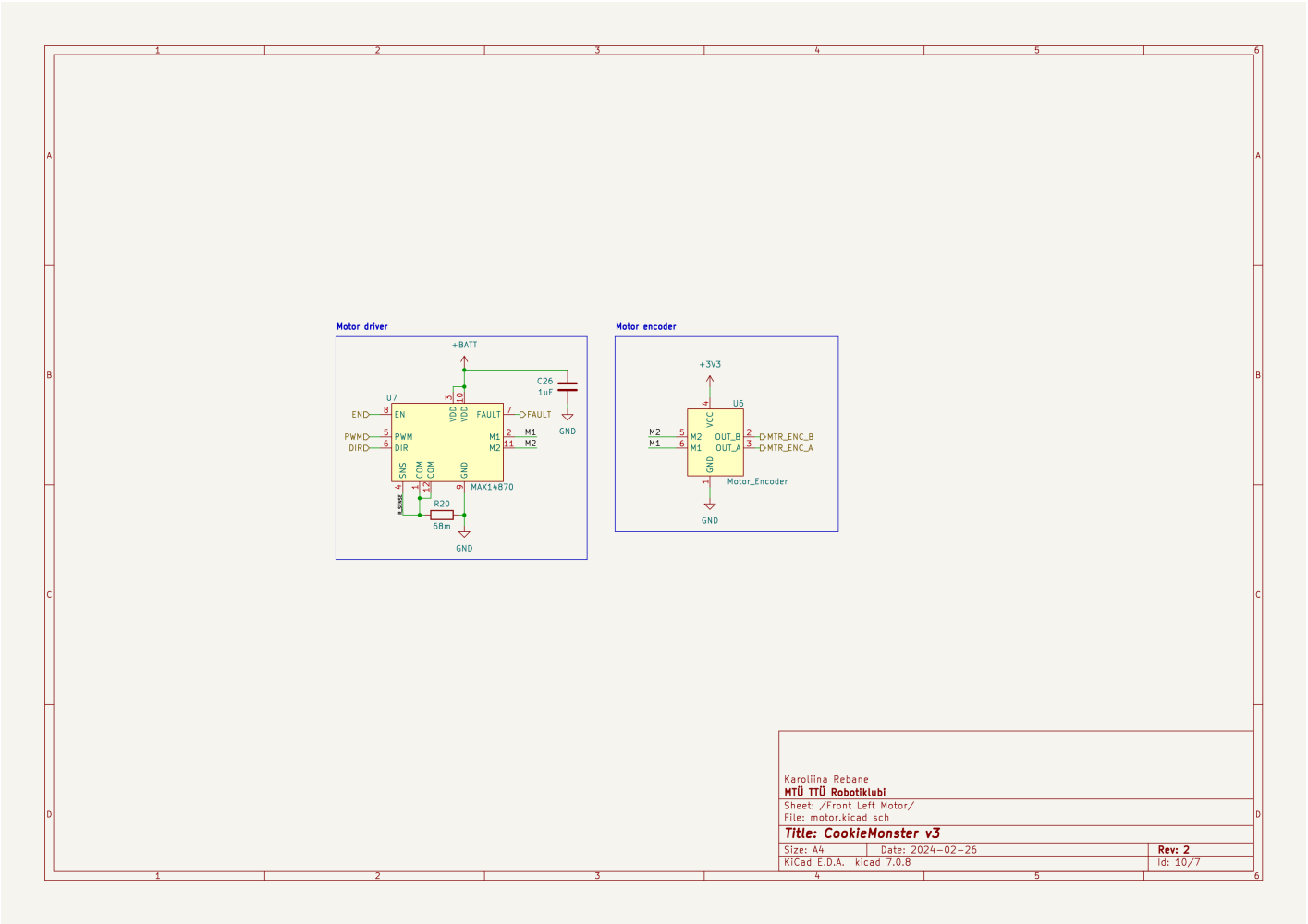
Toitesüsteemi põhimõtteskeem:



Inertsiaalanduri põhimõtteskeem:

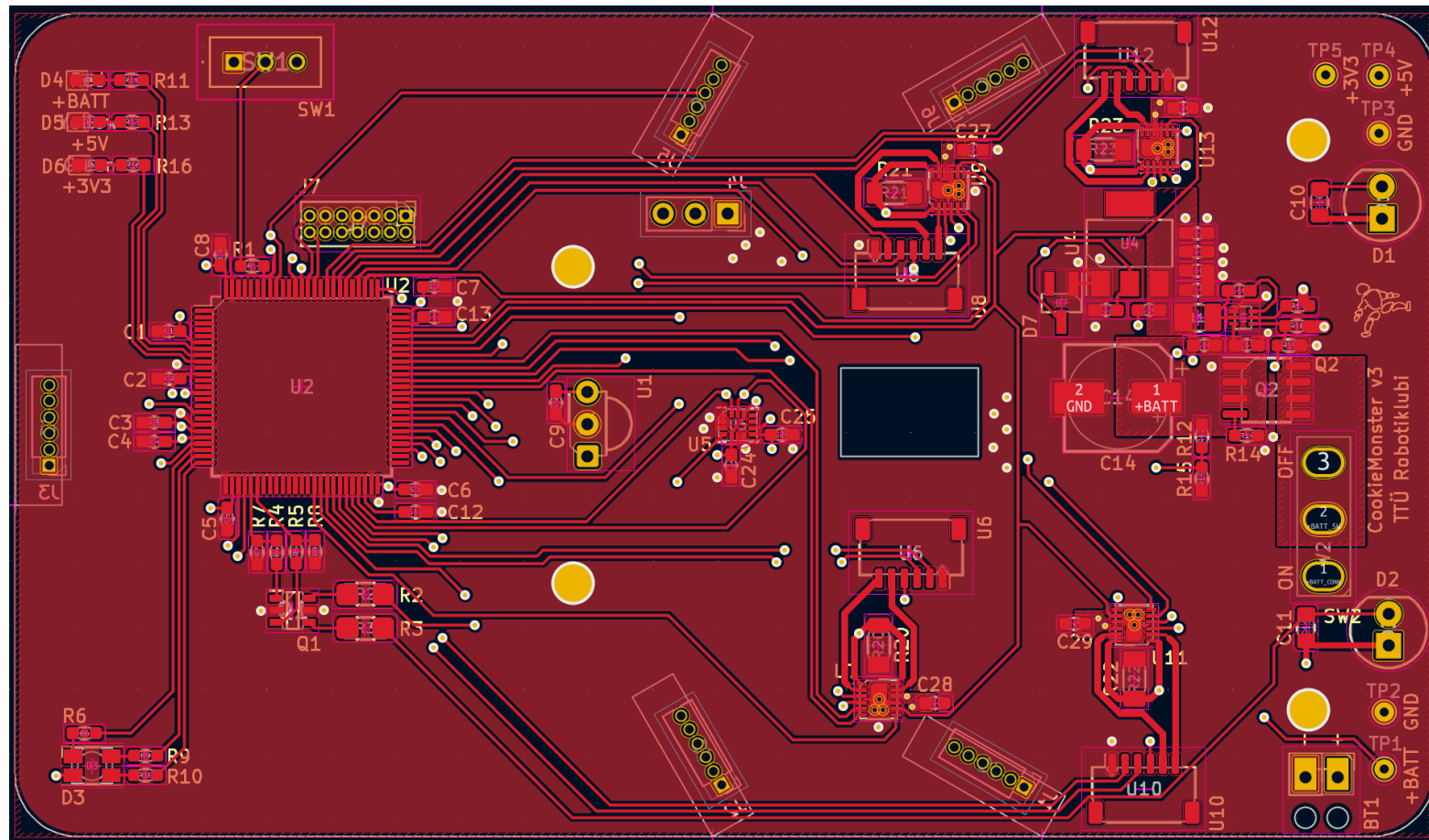


Mootori draiveri ja enkoodri põhimõtteskeemid:

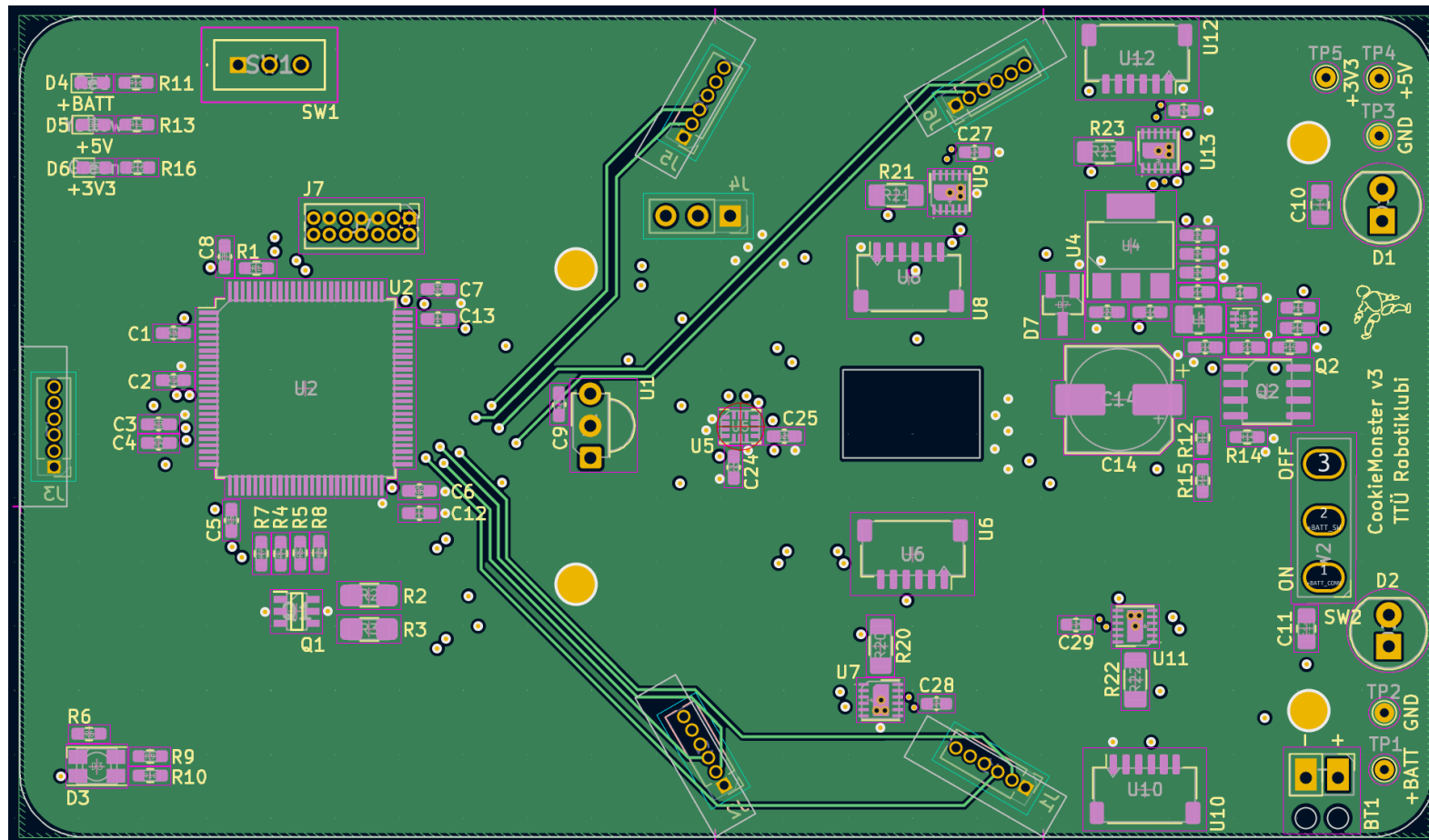


Lisa 7 – Teise prototüübi trükkplaat

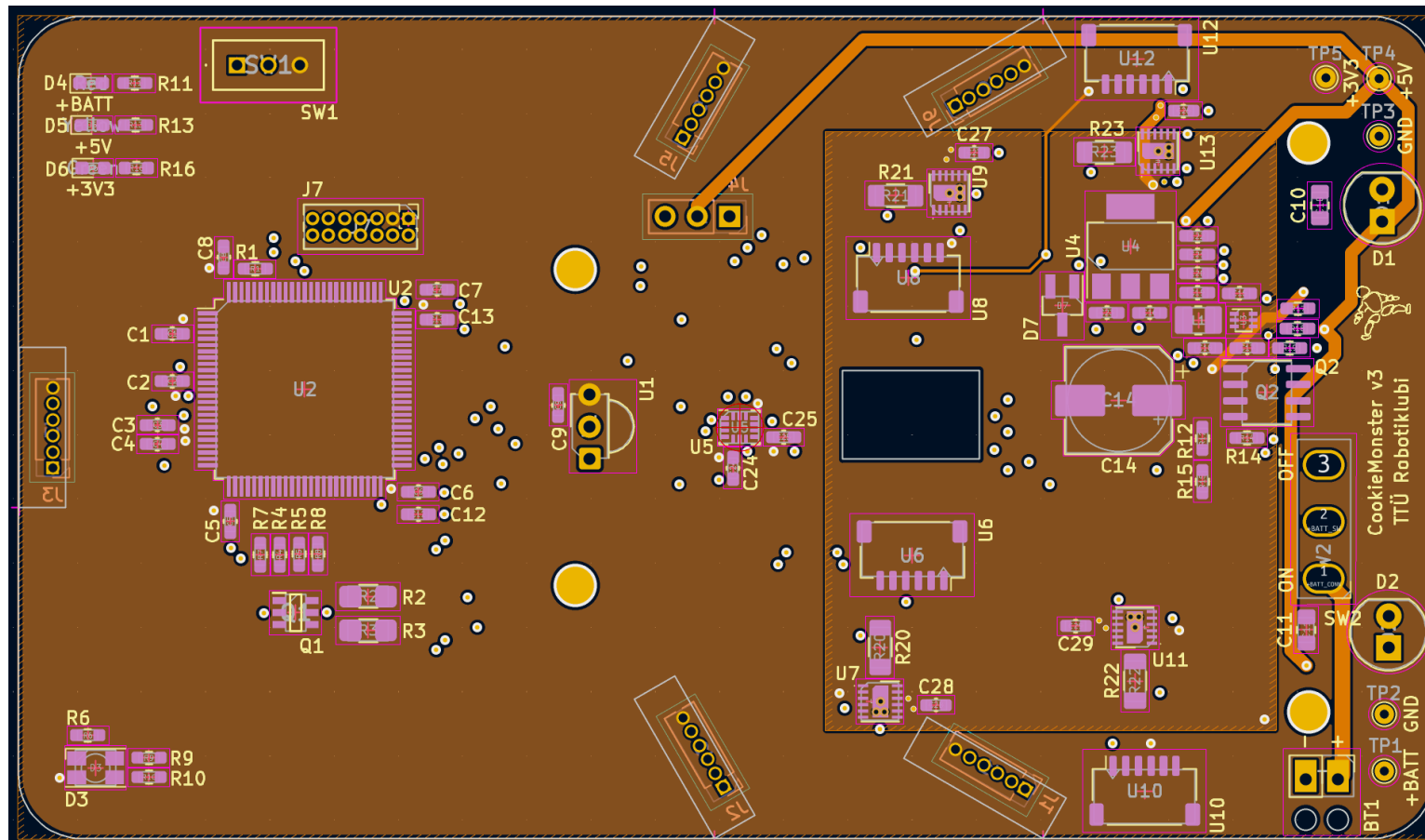
Trükkplaadi esimese kihi disain:



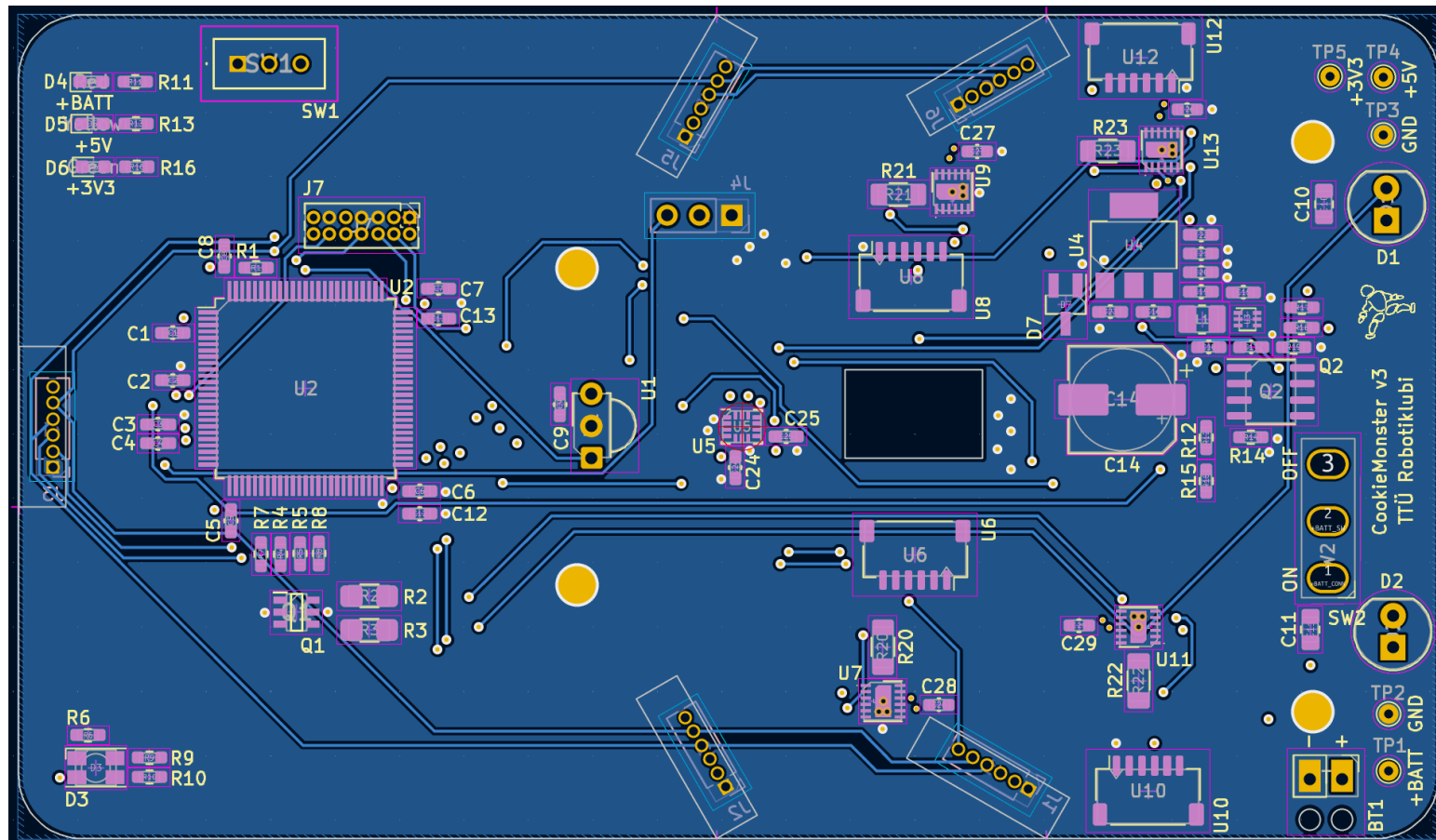
Trükkplaadi teise kihi disain:



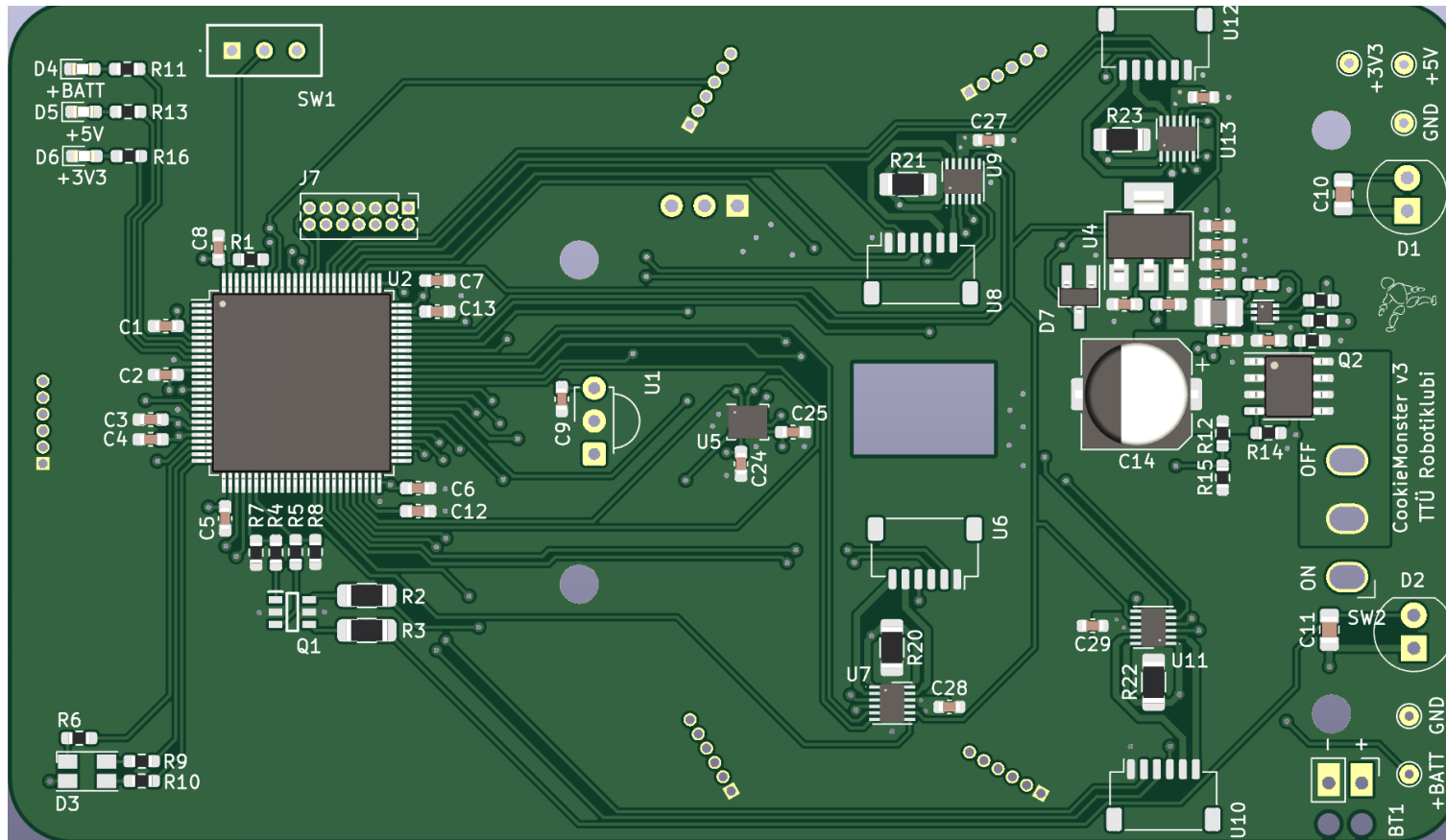
Trükkplaadi kolmanda kihi disain:



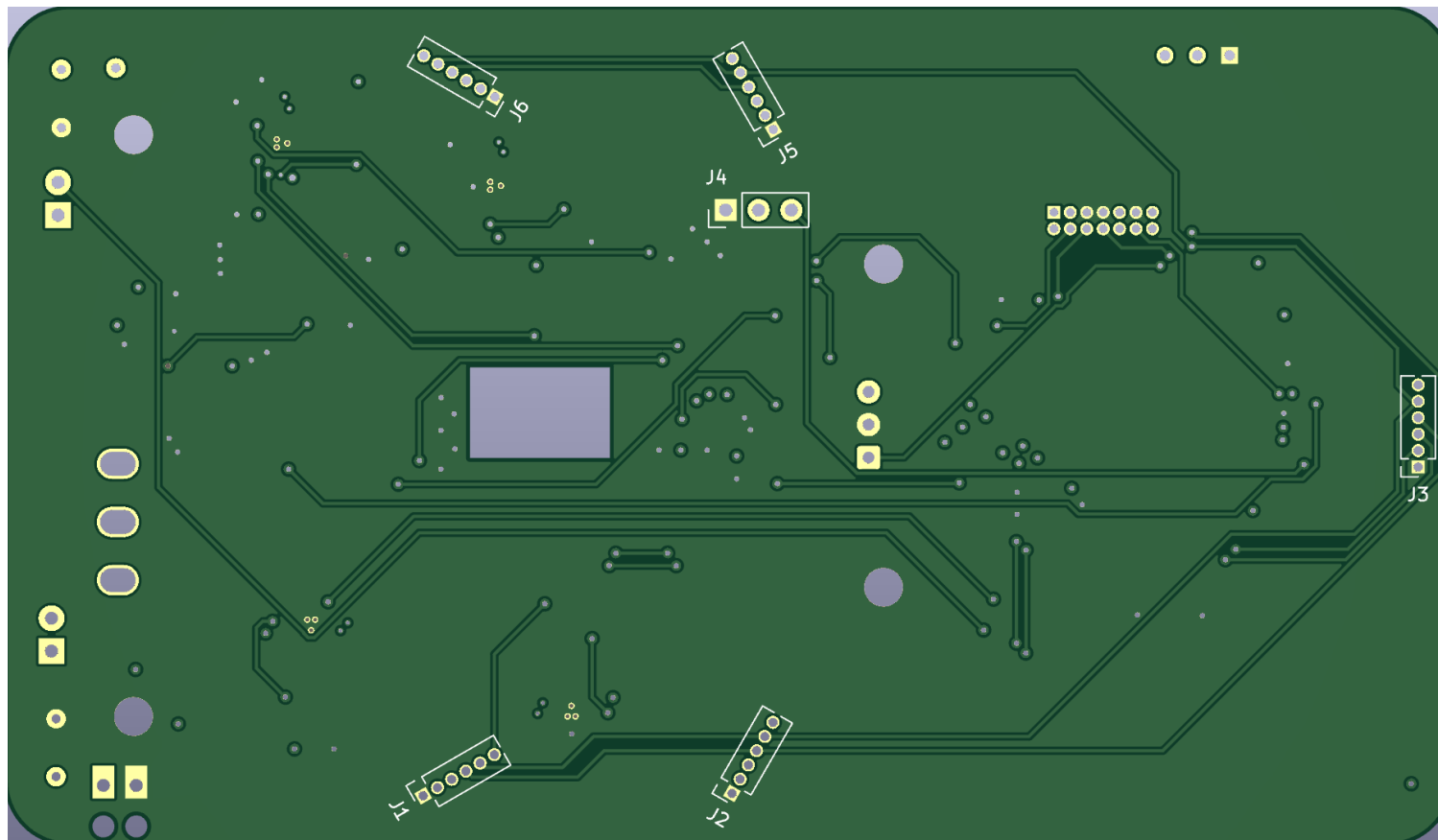
Trükkplaadi neljanda (tagumise) kihi disain:



Trükkplaadi esikül:



Trükkplaadi tagakülg:



Lisa 8 – Teise prototüübi komponentide nimekiri

Komponent	Nimi	Skeemitähis	Trükkplaadi pinnalaotus	Tarnija	Tüki hind (€)	Kogus	Hind kokku (€)
Põhitrükkplaat	Neljakihiiline trükkplaat koos stensiiliga	-	-	JLCPCB	11.86	5	59.31
TOF trükkplaat	Kahekihiiline trükkplaat koos stensiiliga	-	-	JLCPCB	0.66	80	52.68
Mootorid	50:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V with Extended Motor Shaft	-	-	TME	21.88	4	87.52
Enkooderid	Magnetic Encoder Pair Kit with Top-Entry Connector for Micro Metal Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V	-	-	TME	7.89	4	31.56
Enkoodrite pistikud	BM06B-SRSS-TB (LF)(SN)JST	U6, U8, U10, U12	Connector_JST:JST_SH_SM06B-SRSS-TB_1x06-1MP_P1.00mm_Horizontal	TME	0.70	4	2.80
Lüliti	KNX1	SW2	CookieMonsterLibV3:SW_PinHeader_1x02_P2.54mm_Vertical	TME	1.33	1	1.33
Lüliti	SLW-883935-2A-D	SW1	CookieMonsterLibV3:SLW8839352A D	DigiKey	0.42	1	0.42
Juhtmed	ASSHSSH28K102 JUMPER SSH-003T-P0.2-H X2 4"	-	-	DigiKey	0.40	24	9.67
Juhtmepesad	SHR-06V-S-B CONN RCPT HSG 6POS 1.00MM	-	-	DigiKey	0.18	8	1.44

Aku ühendusjuhe		BT1	CookieMonsterLibV3:Battery_connect or	TME	0.31	1	0.31
Mootorite driver	MAX14870ETC	U7, U9, U11, U13	CookieMonsterLibV3:TDFN- 12_3x3mm_P0.5mm	DigiKey	5.01	4	20.04
ToF	VL53L5CXV0GC/1 Proximity Sensors Time-of- Flight 8x8 multizone ranging sensor with wide field of view	J1, J2, J3, J5, J6	Connector_PinSocket_1.27mm:PinSoc ket_1x06_P1.27mm_Vertical	DigiKey	8.16	5	40.80
IMU	LSM6DSOTR Accelerometer, Gyroscope, 6 Axis Sensor I ² C, SPI Output	U5	Package_LGA:LGA- 14_3x2.5mm_P0.5mm_LayoutBorder 3x4y	DigiKey	5.51	1	5.51
Impulss-regulaator	TPS563203 3A Synchronous Step-Down Voltage Regulator, Adjustable Output Voltage, 4.5-17V Input Voltage, SOT-563	U3	Package_TO_SOT_SMD:SOT-563	DigiKey	0.33	1	0.33
LDO	LD1117A_3V3 IC REG LINEAR 3.3V 1A SOT-223	U4	Package_TO_SOT_SMD:SOT-223	DigiKey	0.81	1	0.81
IR vastuvõtja	TSOP38238 Infrared Receivers 2.5-5.5V 38kHz	U1	OptoDevice:Vishay_MINICAST-3Pin	DigiKey		1	
IR emitter	TSFF5510 Infrared (IR) Emitter 870nm 1.3V 100mA 16mW/sr @ 100mA 76° Radial	D1	digikey-footprints:LED_5mm_Radial	DigiKey	1.33	1	1.33
IR emitter	OED-EL-1L2 Infrared (IR) Emitter 940nm 1.2V 100mA 60mW/sr @ 100mA 60° Radial	D2	digikey-footprints:LED_5mm_Radial	DigiKey	0.54	1	0.54

LED	ASMB-MTB1-0B3A2 RGB LED	D3	CookieMonsterLibV3:LED_Cree-PLCC4_3.2x2.8mm_CCW	DigiKey	0.61	1	0.61
LED	B1931USD-20D000814U1930 punane LED	D4	CookieMonsterLibV3:Batt_PowerLED_Green_0603_1608Metric_Pad1.05x0.95mm_HandSolder	DigiKey	0.09	1	0.09
LED	B1931UY--20D000114U1930 kollane LED	D5	CookieMonsterLibV3:5V_PowerLED_0603_1608Metric_Pad1.05x0.95mm_HandSolder	DigiKey	0.09	1	0.09
LED	B1911NG--20D000214U1930 roheline LED	D6	CookieMonsterLibV3:3V3_PowerLED_0603_1608Metric_Pad1.05x0.95mm_HandSolder	DigiKey	0.09	1	0.09
Mikrokontroller	STM32H723VGTx STMicroelectronics Arm Cortex-M7 MCU, 1024KB flash, 564KB RAM, 550 MHz, 1.71-3.6V, 82 GPIO, LQFP100	U2	Package QFP:LQFP-100_14x14mm_P0.5mm	DigiKey	10.88	1	10.88
Servo	Turnigy TGY-D56LV Coreless Low Voltage DS/MG Servo	J4	Connector_PinHeader_2.54mm:PinHeader_1x03_P2.54mm_Vertical	HobbyKing	8.29	1	8.29
Aku	ZIPPY Compact 500mAh 2S 35C Lipo Pack		-	HobbyKing	5.56	1	5.56
N-MOSFET	DMN2053UVT-7 dual N-MOSFET	Q1	CookieMonsterLibV3:SOT95P280X100-6N	DigiKey	0.34	1	0.34
P-MOSFET	DMP3018SSS-13 P-MOSFET	Q2	CookieMonsterLibV3:SOIC-8_3.9x4.9mm_P1.27mm	DigiKey	0.60	1	0.60
Programmeerimisliides	STDC14 ST Debug Connector, standard ARM Cortex-M SWD and JTAG interface plus UART	J7	Connector_PinHeader_1.27mm:PinHeader_2x07_P1.27mm_Vertical			1	

Kondensaatorid	100n	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C9, C15, C18, C21, C22, C24, C25	Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm_HandSolder			13	
Kondensaatorid	10u	C7, C8, C17, C23	Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm_HandSolder			4	
Kondensaatorid	47u	C10, C11	Capacitor_SMD:C_0805_2012Metric_Pad1.18x1.45mm_HandSolder			2	
Kondensaatorid	2u2	C12, C13	Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm_HandSolder			2	
Kondensaatorid	100u	C14	Capacitor_SMD:CP_Elec_8x5.4			1	
Kondensaatorid	18p	C16	Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm_HandSolder			1	
Kondensaatorid	22u	C19, C20	Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm_HandSolder			2	
Kondensaatorid	1u	C26, C27, C28, C29	Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric			4	
Zener		D7	CookieMonsterLibV3:Zener_SOT-23_Handsoldering			1	
Induktor	4u7	L1	Inductor_SMD:L_1008_2520Metric_Pad1.43x2.20mm_HandSolder			1	
Takistid	10k	R1, R11, R13, R16	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			4	
Takistid	3R9	R2, R3	CookieMonsterLibV3:R_1206_3216Metric			2	
Takistid	100R	R4, R5	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			2	
Takistid	330R	R6, R9, R10	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			3	

Takistid	100k	R7, R8, R17	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			3	
Takistid	82k	R12	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			1	
Takistid	1k	R14	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			1	
Takistid	47k	R15	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			1	
Takistid	220k	R18	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			1	
Takistid	30k	R19	Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder			1	
Takistid	68m	R20, R21, R22, R23	Resistor_SMD:R_1206_3216Metric_Pad1.30x1.75mm_HandSolder			4	
Testpunktid		TP1, TP2, TP3, TP4, TP5	TestPoint:TestPoint_THTPad_D1.5mm_Drill0.7mm			5	
Hind kokku							342.94