

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Tehnoloogiainstituut

Marko Muro  
**Robotondi akulahenduse ning 12 V pingeregulaatori  
prototüüpimine**

Bakalaureusetöö (12 EAP)  
Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

Veiko Vunder, Ph.D  
Renno Raudmäe, MSc

Tartu 2023

## Resümee/Abstract

### Robotondi akulahenduse ning 12 V pingeregulaatori prototüüpimine

Haridusrobotika tähtsus on üha kasvamas ning järjest enam kasutatakse robotika integreerimiseks koolide õppekavadesse robotiplatvorme. Üks sellistest on Tartu Ülikoolis arendatav Robotont, mille kolmanda generatsiooni arenduse käigus uuendatakse mitmeid tähtsaid süsteeme ja sõlmi nagu aku ning selle kinnitus, laadimissüsteem, juhtmoodulite elektroonika, keredetailid. Käesolevas töös keskenduti uue akulahenduse prototüübi valmistamisele ning ühtsesse trükkplaati integreeritava pingeregulaatori disainile. Lõputöö raames asendati roboti vana aku uuega ja modifitseeriti roboti keredetaile võimaldamaks uue aku integratsiooni ning loodi lukustusmehhanismi prototüüp, mis võimaldaks aku kiiret vahetamist ja tagaks andmevahetuse aku ning laadija vahel. Töö käigus disainitud pingeregulaator valmis eraldi trükkplaadina. Nii lukustusmehhanismi kui pingeregulaatori testimiseks viidi läbi katseid hindamaks mõlema funktsionaalsust ning toimivust. Aku vahetamiseks kuluv aeg vähenes ligikaudu viis korda 20 sekundini. Pingeregulaator suutis 12 A koormuse korral väljundpinge hoida  $12,7 \pm 0,1$  V piires.

**CERCS:** T125 Automatiseerimine, robotika, control engineering

**Märksõnad:** haridusrobotika, aku, lukustusmehhanism, pingeregulaator, Robotont

### Prototyping battery solution and 12 V voltage regulator for Robotont

The importance of educational robotics is growing and different robot platforms are used more extensively to integrate robotics into school curricula. One such platform Robotont, developed in University of Tartu, is undergoing several important updates for next generation including battery and its mounting, charging system, control modules' electronics and body parts. This thesis focused on prototyping a new battery solution for the robot as well as designing a voltage regulator which could be integrated into unified printed circuit board. During the work old battery was replaced with new type, robot's body parts were modified to allow for integration of new battery, and locking mechanism was prototyped to allow for faster battery attachment while also enabling data exchange between charger and battery. The voltage regulator designed during the work was manufactured as separate PCB. Tests were conducted to evaluate the functionality and performance of both the locking mechanism and voltage regulator. Time needed to swap battery decreased approximately five times down to 20 seconds. Regulator's output voltage remained steady at  $12,7 \pm 0,1$  V under 12 A load.

**CERCS:** T125 Automation, robotics, control engineering

**Keywords:** educational robotics, battery, locking mechanism, voltage regulator, Robotont

# Sisukord

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Resümee/Abstract</b>                                                  | <b>2</b>  |
| <b>Jooniste loetelu</b>                                                  | <b>5</b>  |
| <b>Tabelite loetelu</b>                                                  | <b>6</b>  |
| <b>Lühendid, konstandid, mõisted</b>                                     | <b>7</b>  |
| <b>1 Sissejuhatus</b>                                                    | <b>8</b>  |
| <b>2 Kirjanduse ülevaade</b>                                             | <b>9</b>  |
| 2.1 Haridusrobotika tähtsus . . . . .                                    | 9         |
| 2.2 Robotid kui õppevahendid . . . . .                                   | 10        |
| 2.3 Akutehnoloogiad robotikas . . . . .                                  | 11        |
| 2.3.1 LiPo ja Li-ion akude võrdlus . . . . .                             | 11        |
| 2.3.2 Olulised aspektid aku lõimimisel robotisse . . . . .               | 12        |
| 2.4 Pinge reguleerimine . . . . .                                        | 12        |
| <b>3 Robotont generatsioon 2</b>                                         | <b>14</b> |
| 3.1 Üldstruktuur . . . . .                                               | 14        |
| 3.2 Akulahendus . . . . .                                                | 15        |
| 3.3 Elektroonika . . . . .                                               | 15        |
| <b>4 Nõuded</b>                                                          | <b>17</b> |
| 4.1 Nõuded akule: . . . . .                                              | 17        |
| 4.2 Nõuded pingeregulaatorile: . . . . .                                 | 17        |
| <b>5 Akude võrdlus ja valiku tegemine</b>                                | <b>18</b> |
| 5.1 Eestis kommertslikult müüdavad akud . . . . .                        | 18        |
| 5.2 Aku sobivuse hindamine . . . . .                                     | 19        |
| <b>6 Lukustusmehhanismi mehaanika lahendus</b>                           | <b>20</b> |
| 6.1 Aku lukustusmehhanism . . . . .                                      | 20        |
| 6.2 Muudatused roboti keres . . . . .                                    | 22        |
| <b>7 Pingeregulaatori elektroonika lahendus</b>                          | <b>24</b> |
| 7.1 Pingeregulaatori disain . . . . .                                    | 24        |
| 7.2 Pingeregulaatori elektriskeem . . . . .                              | 26        |
| 7.3 Trükkplaadi kujundus ja valminud prototüüp . . . . .                 | 26        |
| <b>8 Tulemuste analüüs ja järeldused</b>                                 | <b>27</b> |
| 8.1 Lukustusmehhanismi funktsionaalsuse testimine ning analüüs . . . . . | 27        |
| 8.2 Pingeregulaatori testimine ning analüüs . . . . .                    | 28        |
| <b>9 Kokkuvõte</b>                                                       | <b>30</b> |
| <b>Viited</b>                                                            | <b>31</b> |
| <b>Lisad</b>                                                             | <b>35</b> |



## Jooniste loetelu

|    |                                                                                  |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Pingeregulaatorite efektiivsuse võrdlus . . . . .                                | 13 |
| 2  | Robotondi 2. generatsioon ja selle põhikomponendid . . . . .                     | 14 |
| 3  | Teises generatsioonis kasutusel olev 4S LiPo aku . . . . .                       | 15 |
| 4  | Teise generatsiooni elektroonika arhitektuur . . . . .                           | 16 |
| 5  | Kommertslikult müüdavad akud . . . . .                                           | 19 |
| 6  | Vaade 3D mudelist koos akuga . . . . .                                           | 20 |
| 7  | Lukustusmehhanism 3D mudel . . . . .                                             | 21 |
| 8  | Trükkplaat vedruklemmidega . . . . .                                             | 22 |
| 9  | Distantspuksid (märgitud punaste nooltega) roboti koostus . . . . .              | 23 |
| 10 | Põhimõtteline COT-arhitektuuriga lülitatav pingeregulaatori skeem . . . . .      | 25 |
| 11 | Pingeregulaatori elektriskeem . . . . .                                          | 26 |
| 12 | KiCadis valminud trükkplaadi disain ja valminud prototüüp . . . . .              | 27 |
| 13 | Lukustusmehhanismi testimiseks läbi viidud katse koos aku ja laadijaga . . . . . | 28 |
| 14 | Lukustusmehhanismide prototüübid kronoloogilises järjestuses . . . . .           | 35 |
| 15 | Lukustusmehhanism painutatud klemmidega . . . . .                                | 35 |

## Tabelite loetelu

|   |                                                        |    |
|---|--------------------------------------------------------|----|
| 1 | LiPo ja Li-ion akude võrdlus . . . . .                 | 11 |
| 2 | Kommertslikult müüdavate akude võrdlus . . . . .       | 18 |
| 3 | Pingeregulaatori testikatse mõõtmistulemused . . . . . | 29 |

## Lühendid, konstandid, mõisted

**BMS** - ingl *battery management system*, aku haldamise süsteem

**COT** - ingl *constant on-time*, konstantse sisselülitatud ajaga

**ESL** - ingl *equivalent series inductance*, ekvivalent jadainduktiivsus

**ESR** - ingl *equivalent series resistance*, ekvivalent jadatakistus

**JST** - ingl *japan solderless terminal*, elektroonikas kasutatav pistiku tüüp

**GND** - ingl *ground*, maandus

**LED** - ingl *light emitting diode*, valgusdiod

**Li-Ion** - liitium-ioon (aku)

**LiPo** - liitiumpolümeer (aku)

**MOOC** - ingl *massive open online course*, piiramatu arvule osalejatele avatud e-kursus

**PLA** - ingl *polylactic acid*, 3D printimisel kasutatav filamendi tüüp

**RC** - ingl *radio controlled*, raadio teel juhitud

**$R_{DS(on)}$**  - ingl *drain-source ON resistance*, neelu ning lätte vahelise avatud kanali takistus

**RGB** - ingl *red-green-blue*, liitvärvimudel (punane, roheline, sinine)

**ROS** - ingl *robot operating system*, roboti operatsioonisüsteem

**SLAM** - ingl *simultaneous localization and mapping*, samaaegne asukoha määramine ning kaardistamine

**STEAM** - Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics

# 1 Sissejuhatus

Robotont on avatud platvorm robotika-alaseks teadus- ja õppetööks, mille arendust koordineerib Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituut. See avatud riistvara ning lähtekoodiga omniliikuv mobiilne robot kasutab ROS tarkvara tuge ning on tasuta kasutamiseks kõigile soovijatele. Kuna järjest kasvav robotlahenduste vajadus tekitab suurenenud nõudluse ka vastavate oskustega inimeste järele tööturul, sai universaalne katserobot Robotont loodud õppematerjalide näitlikustamiseks ning praktilisteks harjutusteks eesmärgiga võimaldada õpilastel omandada robotite kasutamise ja programmeerimisega seotuid oskuseid [1].

Selleks, et eelpool mainitud robotikomplekti võimekust ja funktsionaalsust suurendada, maksumust alandada ning robotit lihtsamini komplekteeritavaks teha, hakati arendama järgmise ehk kolmanda põlvkonna robotit. Uue platvormi juures on jätkuvalt rõhku pandud modulaarsusele, kuid samas on varasemast rohkem tähelepanu suunatud akule ning selle ohutusele, tootmiskulude vähendamisele, alternatiivsetele koostematerjalidele, lisaseadmete paigaldamisele ja elektroonika komponentide optimeerimisele. Paralleelselt on tööga seotud mitu inimest erinevate lõputööde raames, milles igaüks panustab erinevale suunale lõplikus lahenduses. Uuendatakse järgmisi sõlmi nagu trükkplaat ja juhtmestik, autonoomne laadimissüsteem ning aku ja selle integratsiooniga seonduv. Võrreldes teise generatsiooni robotiga, mille keredetailid on valmistatud polükarbonaadist, on nüüd lisaks võetud ka suund ka 3D prinditud lahendusele, et roboti kere oleks võimalik valmistada ka kodustes tingimustes.

Teise generatsiooni Robotondi puhul kasutuses olev nelja elemendiga LiPo aku pole kasutusmugavuse seisukohast roboti korpusest kergesti eemaldatav. Lisaks on ilma korpuseta LiPo aku kergemini vastuvõtlik deformatsioonidele ja vigastustele, mille tagajärjel võib olla aku potentsiaalselt süttimisohtlik [2]. Probleemiks on ka asjaolu, et LiPo aku ohutuks laadimiseks ja käsitsemiseks on vajalikud eriteadmised, mis võivad olla algaja robotikasutaja puhul puudulikud. Seetõttu ei ole selline aku enam eelistatud valikuks järgmise generatsiooni mudelis ning puuduseid soovitakse parandada. Samuti pole Robotondis kasutuses olevad otse toiteallikaga ühendatud Pololu 2822 [3, 4] mootorid nominaalpingega 12 volti ette nähtud pikaajaliseks kasutamiseks pingeniivooga, mis seda oluliselt ületab, ning seetõttu on vajalik mootorite toitepinge tuua lubatavasse vahemikku. 12 V väljundpinge võimaldamine avardab ka potentsiaalsete tulevikus robotile paigaldatavate lisaseadmete (nt robotmanipulaator jm) hulka, mis nõuavad rohkem võimsust.

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on leida olemasolevatest nõuetest lähtuvalt robotile uus aku, mis oleks kommertslikult pikema aja jooksul kättesaadav ja integreerida see olemasolevasse mehaanikadisaini ning disainida ja prototüüpida uue aku lukustusmehhanism, mis võimaldaks kiiremat ja mugavamat aku vahetamist. Lisaks on tarvis valmistada ka 12 V alalisvoolu pingeregulaatori prototüüp, et piirata mootorite liiga kõrget toitepinget ning tuua see lubatavasse vahemikku.

Teises peatükis räägitakse lähemalt haridusrobotikast ning selle tähtsusest, akutehnoloogiatest ning pingeregulaatoritest. Kolmandas peatükis tuuakse ülevaade eelmise põlvkonna Robotondist, keskendudes seal kasutatavale akule ning elektroonikale. Töö lähteks olevaid nõudeid on kirjeldatud neljandas peatükis. Lahendusele keskenduvad juba järgmised peatükid – sobiva aku leidmisest võib lugeda viiendas peatükis, lukustusmehhanismi mehaanikalahendusest kuuendas peatükis ning pingeregulaatori elektroonikalahendusest seitsmendas peatükis. Kaheksandas peatükis tutvustatakse tulemusi ning järeldusi.

## **2 Kirjanduse ülevaade**

### **2.1 Haridusrobotika tähtsus**

Tehnoloogia on alati mänginud võtmerolli indiviidi saavutustes ja progressis. Moodsad tehnoloogiad lähevad järk-järgult keerulisemaks ning on omavahel tihti peale põimitud – nendest arusaamiseks läheb vaja rohkemat kui lugemis- ja arvutusoskust. Selle asemel, et treenida inimesi kasutama erinevaid tehnoloogiaid, tuleks hoopis vormida haridusmaastikku, võimaldamaks inimestel süvitsi aru saada kasutatavast tehnoloogiast. Sellise väljakutse üheks võimaluseks on hariduses juurutada robotikaõpet, luues selleks asjakohaseid õppekavasid koos toetavate õppevahenditega [5]. Samas võib see osutada keerukamaks ülesandeks, kui algul tundub, sest riiklikud õppekavad on juba varasemalt rangelt paigas ning õpetajatel mänguruumi muutusteks vähe [6].

Koolides, kus siiski on võimalik robotikaõpet integreerida, saavad õpilased autonoomseid roboteid disainides, ehitades ja programmeerides erinevaid teadmisi robotitehnoloogia kohta ning siduda ka teistes ainetundides omandatud teadmisi ja oskuseid põneva praktilise tegevusega. Lastel, kes on tavaliselt tehnoloogia tarbija rollis, tekib nüüd võimalus korraldada teemat peatuda, küsimusi esitada ning selle üle sügavamalt järele mõelda. Haridusrobotid aitavad õpilasel arendada koostööoskusi, suurendada väljendusoskust, mõelda kriitiliselt ja innovatiivselt ning leida erinevaid tahke probleemide lahendamisel. Robotikas levinud käed-külge õppemetoodika võimaldab luua lõbusa ning huvitava õpikeskkonna, mis omakorda motiveerib õpilasi omandama vajalikke oskuseid ja teadmisi, et saavutada eesmärged erinevate projektide elluviimisel [6]. Samas – robotikakomplektide küllus võimaldab küll mitmekesisest kasutusest õppetöös, aga sellegipoolest peaks tehtama regulaarseid pingutusi hindamiseks nende efektiivsust õppeväljundites ning vajadusel tuleks teha muudatusi, mitte lihtsalt eeldada, et kõik robotikakomplektid annavad garanteeritud oodatud tulemuse õppetöös [5].

Eestis on haridusrobotika kasutamine koolides ja õppekeskustes viimasel kümnel aastal kiiresti levima hakanud ning selle eesmärk on parandada õpilaste huvi tehnoloogia ja teaduse vastu ning suurendada nende tehnilisi oskusi. Kuna tööstus ja teadus arenevad kiiresti, vajatakse tulevikus sellealase tehnoloogilise kompetentsiga inimesi veelgi rohkem. Haridusrobotika

pakub erinevaid väljundeid enda proovile panekuks – mõned vähesed näited siinkohal oleks Eestis korraldatavad populaarsed võistlused Robotex, Delta X, Robomiku lahing, Ahhaa Robolahing, First Lego League [1].

## 2.2 Robotid kui õppevahendid

Illustreerimaks, kui erinevatele vanusegruppidele ning haridustasemega inimestele on robootikaõpe jõukohane, on järgnevalt välja toodud mõningad näited populaarsetest hariduslikel eesmärkidel kasutatavatest robootikakomplektidest. Välja on toodud ka robotites kasutatavad akulahendused.

**Lego SPIKE Prime** on juba algklassidesse sobilik hariduslik robootikakomplekt, mille komplekti kuuluvad värvilised ehitusklotsid, kontrolleri 5x5 LED maatriksiga, güroskoop, valjuhääldi, aku, mootorid, puuteandur, ultraheli kaugusandur, värviandur. Tarkvara põhineb Scratchil. Selline kooslus on mõeldud STEAMi populariseerimiseks koolides [7]. Roboti 2100 mAh Li-Ion aku on eraldi tugevdatud korpuse sees, mida on võimalik ilma eemaldamata USB kaabliga laadida. Samas on eemaldamine lihtne ning ei vaja selleks tööriistu [8].

**TurtleBot3** puhul on tegemist väikese ja taskukohase robotiga, mis on sobilik kasutamiseks hariduses, teaduses ja hobikorras. Robotil kasutatakse vabavaralist tarkvararaamistikku ROS (ingl *Robot Operating System*), mis võimaldab kasutada kõige kaasaegsemaid SLAM (ingl *Simultaneous Localization and Mapping*) algoritme, et luua ümbruskonnast kaarte ja ruumides navigeerida. Robotit saab kontrollida distantilt kasutades selleks sülearvutit, juhtpulti või Android nutitelefoni. Turtleboti 1800 mAh LiPo aku on paigutatud roboti põhjaplaadile, kust saab seda ühest küljest välja tõmmata, eemaldades kinnitusklambrid. Laadimiseks on vajalik aku robotist eemaldada [9].

**Thymio** on sobilik õpperobot väga laiale vanusevahemikule - täielikust algajast kuni inimeseni, kes juba tunneb mõningaid robootikaalaseid algoritme. Thymio on ostes juba kokku monteeritud ja koheselt kasutusvalmis. Robotit saab programmeerida Pythoni keeles ja Aseba keskkonnas, tänu millele on temaga võimalik viia ka ülikooli tasemel praktikume ja eksperimente. Thymio avatud riistvara platvorm annab kasutajale paremad võimalused süsteemi ise parandada ja vajadusel täiustada [10]. Thymio 1500 mAh LiPo aku on peidetud roboti sisse ning on kinnitatud kahepoolse teibiga – aku vahetamiseks on tarvis eemaldada roboti all paiknev nelja kruviga katteplaat [11].

**mBot2** on algajatele mõeldud robootikakomplekt, mida on võimalik lihtsasti kruvikeeraja ja juhendite abil kokku panna. Üle maailma on nüüdseks selle tootega kokku puutunud rohkem kui 4,5 miljonit last. Kuigi tegemist on suhteliselt algelise robotiga, on temaga edukalt võisteldud ka suurematel robotivõistlustel nagu MakeX. Komplekti kuuluvad emaplaat, ultraheli- ja joonejälgitamise andur, bluetooth moodul, valgusandur, kere ning rattad [12]. Akuna on kasutusel ühe elemendiga 1800 mAh LiPo aku, mida saab laadida ilma robotist eemaldamata kasutades

selleks USB kaablit. mBoti on kasutatud ka Tartu Ülikooli MOOC kursusel "Robootikast puust ja punaseks"[13].

## 2.3 Akutehnoloogiad robotikas

Mobiilsed autonoomsed robotid vajavad ülesannete ning toimingute sooritamiseks energiat – selleks sobivad hästi akud, mis on kerged ja kompaktsed ning mida saab kiiresti laadida või välja vahetada võimaldades robotitel pikemat aega töötada ilma seisakuteta. Järgnevalt on käsitletud kahte tänapäeval enamlevinud akutehnoloogiat – Li-ion ja LiPo.

Liitiumakude kasutamine autonoomsetes robotites omab häid väljavaateid – akudel on kõrge energiatihedus, pikk kasutusiga ning neid saab laadida võrdlemisi kiiresti. Li-ion akudel on kasutusel vedelal kujul keemiline elektrolüüt. Sellised akud on ühed levinuimad kommertslike robotite puhul kasutuses olevad toiteallikad. Eriti paistavad silma just akud, mille katoodiks on  $\text{LiFePO}_4$  ja anoodiks grafiit. Autonoomsetes robotites kasutatavate Li-ion toiteallikate väljundpingete vahemik on üsna suur, ulatudes kuni 96 V-ni. Ka võimalik mahutavus on üsna suur, ulatudes kuni 200 Ah [14].

Samas on levinud ka LiPo akutehnoloogia, mille puhul on kasutusel kuiv ja poorne või geeljas elektrolüüt. Need akud on arendatud just kergemat kaalu ning suurenenud väljundvoolutugevust silmas pidades ning omab sarnaselt Li-ion akudega küllaltki laia töötemperatuurivahemikku (-20...60 °C) [15]. LiPo akud on laialdaselt kasutusel näiteks raadio teel juhitud mudelautodes ja -lennukites.

### 2.3.1 LiPo ja Li-ion akude võrdlus

Tabelis 1 on välja toodud tähtsamad aspektid kummagi tehnoloogia puhul [16, 17].

*Tabel 1: LiPo ja Li-ion akude võrdlus*

|                                 | <b>LiPo</b>         | <b>Li-ion</b>      |
|---------------------------------|---------------------|--------------------|
| <b>Energiatihedus</b>           | 140 – 200 Wh/kg     | 100 – 265 Wh/kg    |
| <b>Laadimistsüklite arv</b>     | kuni 1500           | kuni 3500          |
| <b>Laadimis- ning tarbevool</b> | kuni 5 C            | kuni 3 C           |
| <b>Tootmiskulud</b>             | 1300 – 1800 eur/kWh | 500 – 1400 eur/kWh |
| <b>Tühjenemiskiirus seistes</b> | 5% kuus             | 2.5% kuus          |

Üldiselt on Li-ion akud kaalult raskemad kui LiPo akud. LiPo akusid on saada ka väga õhukestena (isegi 0,4 mm paksusega [18]), mistõttu saab neid eelistatult kasutada mõningates spetsiifilistes konstruktsioonides. Kuigi laadimiskiirus ning koormamisvõimekus (amprites)

räägib LiPo akude kasuks, on Li-Ion akudel suurem energiatihedus [16]. Tootmiskulusid silmas pidades on eelisseisus Li-ion akud – nende kulud jäävad vahemikku 500 – 1400 eur/kWh. Laadimistsüklite arv on jällegi suurem Li-ion akudel, mistõttu on majanduslikus mõttes on eelistatum just see tehnoloogia [17]. Kokkuvõttes võib öelda, et kui tähtis on väike aku pingelang suurte koormuste juures ning erivajadustest lähtuvalt mängib rolli aku kuju ning mõõtmed, siis on eelistatud valik LiPo tehnoloogia. Samas tuleb olla hoolas, et aku pinge ei langeks alla lubatud piiri ning arvestada tuleb asjaoluga, et korpuseta LiPo akud on tuleohtlikumad vigastuste korral. Kui tähtsam on kõrgem energiatihedus ning pikem aku eluiga, võiks olla eelistatud Li-Ion aku. Samas on üldiselt suurte koormuste all Li-Ion akude pingelang suurem võrreldes LiPo-dega [19].

### **2.3.2 Olulised aspektid aku lõimimisel robotisse**

Robotite voolutarbijad saab jagada laias laastus kolme valdkonda – masinnägemine, navigatsioon ja motoriseeritud liikumine. Et robot saaks efektiivselt talle seatud tööülesandeid täita, peab olema tagatud eelnevalt nimetatud kolme põhilise funktsiooni samaaegselt koostoimimine – selle saavutamise üheks eelduseks on sobivalt valitud energiaallika integratsioon roboti koostu, et võimsusevajadus oleks piisaval tasemel kaetud [14].

Võimsusanalüüside tegemiseks tuleb eelnevalt mõõta või hinnata roboti erinevate komponentide maksimaalset voolutarvet. Seejärel on võimalik teha järeldusi, milline aku oleks üldse sobilik. Akut valides on tähtis silmas pidada järgmisi karakteristikud: ohutus, kõrge energiatihedus, laadimis- ja tühjenemiskiirus, eluiga, maksumus ning keskkonnajalajalg [14, 20].

Võimalusel tuleks valida aku, millel on juba integreeritud BMS (ingl *battery management system*, aku haldamise süsteem) – et saaks jälgida individuaalsete elementide pinget ja vältida laadimisel ning tühjenemisel võimalikke tekkivaid kahjustusi. Antud süsteem mõõdab mitmeid aku parameetreid, laetustaset, temperatuuri ning määrab piirangud väljundvoolule ja -pingele, mis tagab ohutuse [14, 21].

## **2.4 Pinge reguleerimine**

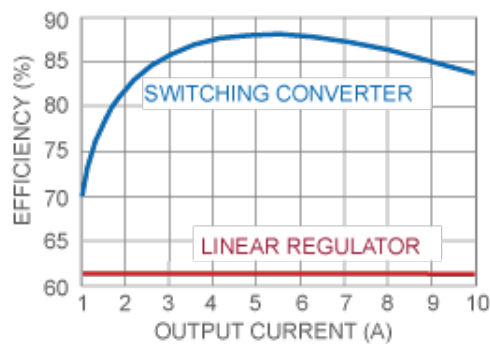
Iga roboti juhtelektroonika sisaldab mitmeid integraallülitusi, mille toitepinge on üldjuhul 3,3 V või 5 V. Lisaks on suure tõenäosusega erineva toitepingega robotite mootorid ning muud sõlmed. Akude väljundpinged võivad olla oluliselt kõrgemad elektroonikakomponentide ning mootorite nominaalpingest. Olenevalt akutehnoloogiast võib väljundpinge ühekordse kasutustsükli jooksul olulisel määral erineda (näiteks neljaelemendilise LiPo puhul 14,8 – 16,8 V). Korrektse toitepinge tagamiseks kasutatakse pingeregulaatoreid, mida on olemas kahte põhilist tüüpi – lineaarsed ja lülitatavad.

Lineaarsetes regulaatorites kasutatakse transistorit, mida juhitakse tagasisideahela abil läbi operatsioonivõimendi. Koormuse muutuse korral väljundis reageerib regulaator kiiresti ning

hoiab väljundis stabiilset pinget. Lineaarsed pingeregulaatorid on odavad, lihtsa ehitusega ning sobivad hästi madala voolutarbega seadmete toiteks, kus erinevus sisend- ja väljundpinge vahel on väike. Paraku on nende efektiivsus madal, kuna pingelang regulaatoril eraldub soojusena [22].

Lülitatavad regulaatorid on see-eest keerulisema ehitusega, hinnalt kallimad, kuid samas võimaldavad kõrge efektiivsuse juures suuremaid väljundvõimsuseid. Lülitatavas regulaatoris kasutatakse eraldi kiibina juhtkontrollerit, mis väljundist tuleva tagasisideahela abil lülitab kõrgel sagedusel väljatransistoreid, et tagada väljundis stabiilne pinge koormuse muutusel. Sellise regulaatori energiakaod on väikesed ning need suudavad ka pinget tõsta ehk madalama sisendpinge muundada kõrgemaks pingeks väljundis [22]. Tänu kõrgele lülitussagedusele on võimalik kasutada väiksemate mõõtmetega passiivkomponente ning muundamisel läheb vähem energiat soojuse näol kaotsi [23].

Joonisel 1 on võrreldud pingeregulaatorite efektiivsust.



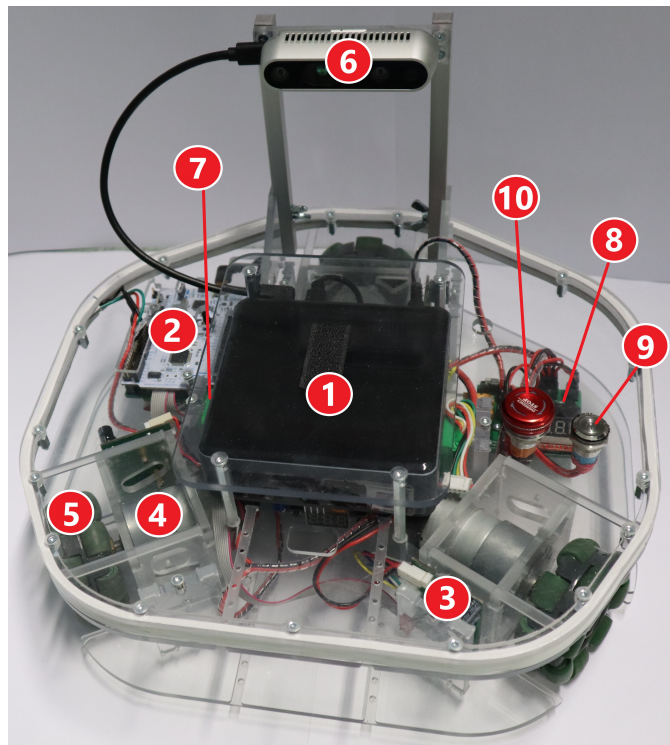
Joonis 1: Pingeregulaatorite efektiivsuse võrdlus [22]

### 3 Robotont generatsioon 2

Antud bakalaureusetöö lähtepunktiks oli teise generatsiooni Robotont, mis töötati välja Renno Raudmäe magistritöö käigus, kus pandi suurt rõhku ka struktureeritud dokumendihalduse loomisele edasiste arenduste tarbeks. Teise generatsiooni robot on hetkel viimane suuremas koguses toodetud versioon, millega on võimalik läbi viia mitmeid kursuseid ülikoolides [1]. Alljärgnevalt tutvustatakse roboti üldstruktuuri ning kirjeldatakse täpsemalt senise akulahenduse ja pinge reguleerimise puudujääke.

#### 3.1 Üldstruktuur

Joonisel 2 on kujutatud peamised komponendid, millest koosneb teise generatsiooni Robotont.



Joonis 2: Robotondi 2. generatsioon ja selle põhikomponendid: 1 – pardaarvuti; 2 – juhtkontroller; 3 – mootori juhtplaat; 4 – koodriga alalisvoolumootor; 5 – omniratas; 6 – Intel Realsense Sügavuskaamera; 7 – aku; 8 – toitelahenduse plaat; 9 – toitenupp; 10 – E-Stop [1]

Teise generatsiooni Robotondi kere ning rattamoodulid on ehitatud polükarbonaadist. Robot saab liikuda tänu kolmele Pololu 2822 mootorile, mille külge on kinnitatud topeltrullikutega omnirattad. Robotondi pardaarvutina on kasutusel Intel NUC7i5BNK, mille ülesandeks on suhelda juhtkontrolleriga ning kontrollida mootorite kiiruseid. Samuti suhtleb pardaarvuti läbi USB liidese Intel Realsense D435 sügavuskaameraga võimaldamaks robotil navigeerida ruumis ning tegeleda kaardistamisülesannetega. Juhtkontrollerina on kasutusel NUCLEO-L476RG arendusplaat, millega on ühendatud mootorite juhtplaadid. Kogu toiteahel on võimalik välja lülitada eraldi nupust ning avariiolukordade puhuks on paigaldatud ka E-Stop nupp [1].

Roboti juhttarkvarana kasutatakse ROSi – tegemist on avatud lähtekoodiga raamistikuga, mis koondab endas tarkvaratekke ja tööriistu, et oleks võimalik lihtsamalt luua keerukaid robotirakendusi ja tarkvara erinevatele platvormidele [24]. Õppuri või arendaja jaoks on see mugav, sest uue platvormi kasutamiseks pole tarvis kõigepealt selgeks õppida uut keskkonda.

### 3.2 Akulahendus

Teise generatsiooni Robotondis on kasutusel nelja elemendiga LiPo aku (Joonis 3), mille eemaldamiseks peab keerama lukustushooba ning seejärel eemaldama roboti põhja all asuva akut hoidva plaadi. Peale seda on võimalik altpoolt lähendes aku välja tõmmata ning eemaldada XT60 pistik. Selline lahendus küll täidab oma eesmärgi, aga võrreldes näiteks kommertslikult saadavate akutoitel lahendustega vajab kasutajalt oluliselt rohkem samme ja aega. Ka Renno Raudmäe magistritöös [1] on välja toodud, et teise generatsiooni aku ühendamine ja vahetamine tuleks teha mugavamaks.

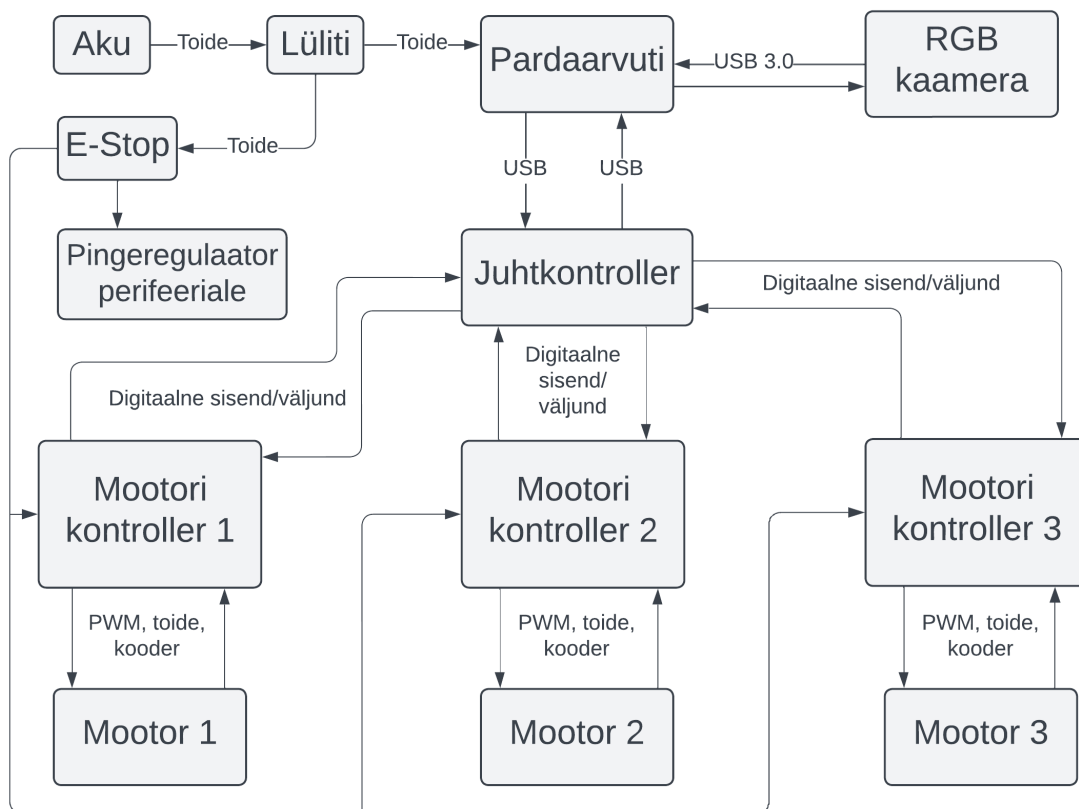


Joonis 3: Teises generatsioonis kasutusel olev 4S LiPo aku [25]

Kuna antud aku ei oma integreeritud aku haldamissüsteemi, peab roboti kasutaja olema teadlik ning tähelepanelik õigete laadimissätete valimisel. Sõltuvalt laadijast tuleb valida korrektne akutehnoloogia, jadamisi ühendatud elementide arv ning maksimaalne laadimisvool. Korrektsete seadete määramist aga ei saa igalt algajalt robotikasutajalt eeldada. Lisaks võib kasutaja seisukohast olla ebamugav asjaolu, et kui robotit pikema aja vältel mitte kasutada, siis tuleks leida ka turvaline koht aku hoiustamiseks 3,8 V pingele juures ning seda aeg-ajalt kontrollida [26].

### 3.3 Elektroonika

Teise generatsiooni Robotondis on kesksel kohal STM32 NUCLEO-L476RG juhtkontroller, mis suhtleb Intel NUC7i5BNK pardaarvutiga ning määrab pulsilaiusmodulatsiooni kasutades mootorite kiirused kooderitest saadud tagasiside põhjal. Mootorite juhtimiseks kasutatav juhtplaat kasutab MC33886 või MC33887 H-silda – lisaks mootorite kiiruskäskluste edastamisele ning mootoritelt tulnud koodrite väärtuste juhtkontrollerile tagastamisele juhib see voolu otse akust mootori mähistele. Kogu elektroonika (Joonis 4) toide tuleb ühelt neljaelemendiliselt liitium-polümeer (LiPo) akult [1]. Puudub eraldi pingeregulaator, mis võimaldaks mootoreid käitada ettenähtud nominaalpingega. Robotondis kasutusel olevate Pololu 2822 [4] mootorite puhul on nominaalpingeks 12 V.



Joonis 4: Teise generatsiooni elektroonika arhitektuur

Alalisvoolumootori käitamine üle nimipinge võib põhjustada mitmesuguseid negatiivseid mõjusid, mis võivad lühendada mootori eluiga. Mootori voolu suurenemine võib põhjustada ülekuumenemist ja mootori läbipõlemist - mähis võib liigselt kuumeneda ning kahjustada isolatsiooni degradeerumise või sulamise näol, kuna isolatsiooni dielektrilised omadused halvenevad. Suurenenud pinge võib põhjustada harjade kiiremat kulumist – kommutaatori ja harjade vahel võib tekkida sädelahendus, suureneb harjade kulumine ja hõõrdumine. Selle tulemusel muutuvad nad vähem tõhusaks ning võivad põhjustada mootori jõudluse ja efektiivsuse vähenemist [27, 28]. Näiteks on tänaseks on juba esinenud osade mootorite hävimist, kuna teise generatsiooni süsteem võimaldab modifitseeritud püsivaraga (pulsilaiusmoduleeritud signaali täiteteguri piirang eemaldatud) ja täislaetud akuga kasutada mootoreid ülekoormatud tingimustel.

## 4 Nõuded

Sissejuhatuses seatud eesmärkide täitmisel lähtuti Robotondi kolmanda generatsiooni nõuetest, mis tulenesid teise generatsiooni kasutamise käigus selgunud puudustest ja tähelepanekutest. Lisaks lähtuti nõuete sõnastamisel Erik Kõivu ja Jatan Shrestha aine "Andmehõive ja signaalitöötlus" käigus valminud tööst, milles analüüsiti Robotondi energiakasutust.

### 4.1 Nõuded akule:

- Robot peab kasutama kommertskaubanduses levinud akut ja laadimissüsteemi, mis oleks poodide tootevalikus vähemalt järgmise viie aasta jooksul
- Aku peab võimaldama kasutada robotit sel moel, et temaga oleks võimalik aktiivselt 60 minuti jooksul ringi sõita ja ülesandeid täita
- Aku peab mõõtnetelt mahtuma olemasolevasse gen 2 roboti keresse – asukoht uues robotis peaks olema selline, mis võimaldaks madalat massikeset ning ühilduks uue trükkplaadi disainiga.
- Akut peab olema võimalik lihtsasti korpusest eemaldada ning aku laadimiseks ei pea olema spetsiifilisi eelteadmisi
- Aku peab olema võimeline väljastama 15 A voolutugevust
- Aku käsitlemine peab olema ohutu
  - akutehnoloogia minimeerib võimaliku süttimisohu
  - akule ei tohi tekkida hävitavaid kahjustusi juhuslikul kukkumisel 0,5 meetri kõrguselt

### 4.2 Nõuded pingeregulaatorile:

- Pingeregulaator peab sisendpinge alandama 12 V-ni
- Pingeregulaator peab olema võimeline 12 V väljundpinge korral taluma 15 A koormust
- Pingeregulaator peab olema integreeritav roboti trükkplaadile

## 5 Akude võrdlus ja valiku tegemine

Bakalaureusetöö üheks osaks oli Eesti jaeturul müüdavate akude analüüs, mille alusel oleks võimalik leida nõuetele vastav sobilike mõõtmete ning omadustega aku, mida saaks lihtsasti integreerida teise generatsiooni Robotondi mehaanikadisaini. Akude otsingul kasutati peamiselt ehituspoodide ning tööriistamüügile orienteeritud asutuste andmebaase.

### 5.1 Eestis kommertslikult müüdavad akud

Nõuetele vastavaid akusid õnnestus leida mitmeid (Joonis 5) – Makita LXT BL1850 5.0Ah [29], Metabo LiHD 5.5Ah [30], Bosch PBA 18 6.0Ah [31], Milwaukee M18 RedLithium 5.0Ah [32], Hilti Nuron B22-110 5.2Ah [33] ning DeWalt Powerstack DCBP518-XJ 5.0Ah [34]. Makita LXT 18V seeria puhul on tegemist maailma suurima tööriista valikuga platvormiga [35]. Nii Bosch [36], Metabo kui Makita on säilitanud aastate jooksul aku ühenduspistiku, mistõttu on ka vanemad mudelid uuemates seadmetes ning tööriistades tagasiühilduvad. Kõikide tootjate akude väljundvõimsused on ajas kasvanud tänu järjest uuenevale akutehnoloogiale. Milwaukee ja DeWalt on Eestis vähem tuntud, mida illustreerib ka asjaolu, et neil pole kohapeal esindust, mis kergendaks olulisel määral võimalikke remondi- ja garantiitöödega seotud asjaajamisi. Hilti seevastu on teada oma kvaliteedi poolest, kuid hinnatasemelt oluliselt kallim.

Järgnevalt on tabelis 2 välja toodud mitmeid aspekte, mille alusel võrreldi Eestis jaemüügis kättesaadavaid akusid. Hindade määramisel on kasutatud portaali [www.hinnavaatlus.ee](http://www.hinnavaatlus.ee) andmeid, mis võimaldas leida hetkel kõige soodsama turul saadaoleva variandi.

Tabel 2: Kommertslikult müüdavate akude võrdlus

|                  | Hind (eur) | BMS | Kasutusaeg 60 min | Mahutavus | Elemendid korpuse sees | Esindus Eestis |
|------------------|------------|-----|-------------------|-----------|------------------------|----------------|
| <b>Makita</b>    | 65         | ✓   | ✓                 | 5 Ah      | ✓                      | ✓              |
| <b>Metabo</b>    | 128,90     | ✓   | ✓                 | 5,5 Ah    | ✓                      | ✓              |
| <b>Bosch</b>     | 108,60     | ✓   | ✓                 | 6,0 Ah    | ✓                      | ✓              |
| <b>Milwaukee</b> | 84         | ✓   | ✓                 | 5 Ah      | ✓                      | ✗              |
| <b>Hilti</b>     | 227,90     | ✓   | ✓                 | 5,2 Ah    | ✓                      | ✓              |
| <b>Dewalt</b>    | 137,90     | ✓   | ✓                 | 5 Ah      | ✓                      | ✗              |

Tabelist 2 selgub, et tegelikult on kõik võrdluses välja toodud akud nõuetele vastavad neis osades, mis puudutab vastupidavust mehaanilistele löökidele ja kukkumistele ning võimekust käitada robotit vähemalt 60 minutit. Milwaukee ja Dewalti miinusena võib tuua välja, et Eestis kohapeal puudub ametlik esindus. Kõigil akudel on olemas ka juhtelektroonika ehk BMS, mis

tagab ohutuse laadimisel ja aku kasutamisel. Hinna poolest on selge eelis Makita akul, olles lähimast konkurendist (Milwaukee) ca 20% odavam. Lisaks on Makita kodulehel väidetud [37], et lähitulevikus ei ole neil plaanis kaotada 18V LXT akusüsteemi, mis annab pigem kindlustunde, et nõuetest lähtuvalt on lähima viie aasta jooksul aku endiselt kättesaadav.



Joonis 5: Makita (a) [38], Metabo (b) [39], Bosch (c) [40], Milwaukee (d) [41], Hilti (e) [42] ja DeWalt (f) [43] akud

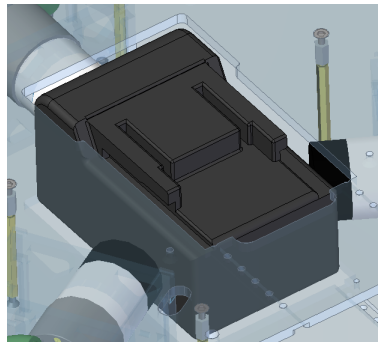
Eelkõige hinda ning järgmise viie aasta jooksul kättesaadavust silmas pidades osutus valituks Makita aku.

## 5.2 Aku sobivuse hindamine

Aku sobivuse kontrolliks viidi läbi ka eeltestimine – valmistati juhtmestik ning soetati 12 V 20 A Pololu D24V150F12 [44] pingeregulaator, läbi mille ühendati mootori kontrollid. Mootorite jaoks kasutatud *step-down* regulaatori väljundpinge jäi stabiilselt 12 – 12,1 V juurde. Test hõlmas tasasel pinnal ringi sõitmist takistuse imiteerimisega (roboti kinni hoidmine) ning samaaegselt rohkelt ressursi nõudvate kaardistamis- ja pilditöötlusprogrammide käitamist. Testimise käigus jälgiti kahe multimeetriga (Victor VC 9804A+) pingeid Makita aku klemmidel ning pingeregulaatori väljundklemmidel. Kogu tegevuse käigus täheldati aku klemmidel vaid 0,5 V-ne pingelang, mis näitab, et ka tavapärasest oluliselt rohkem koormatud tingimustes sobib valitud aku hästi kavandatava roboti toiteallikaks.

## 6 Lukustusmehhanismi mehaanika lahendus

Kolmanda generatsiooni Robotondi arendamisel jälgiti, et eelmise generatsiooni kerelahendus muutuks võimalikult vähe ning saaks jätkuvalt kasutada selle modulaarset ehitust – pidi säilima omnirataste algupärane kontseptsioon, mille järgi peab olema võimalik neid lihtsasti vahetada ilma muid keredetaile eemaldamata. Selleks tuli integreerida uus aku olemasolevasse mudelisse niimoodi, et ei peaks kogu robotit nullist ümber ehitama – oma koha säilitasid omnirataste moodulid ning roboti mõõtmed jäid samaks. Roboti massikeskme madalal hoidmise vajalikkusest tulenevalt ei olnud võimalik akut paigaldada pardaarvuti peale – lisaks oleks sellise lahenduse puhul olnud oluliselt piiratud ka sügavuskaamera vaateväli. Modelleerides leiti koht kolme mootori ja alumise ning ülemise polükarbonaadist kereplaadi vahel – selliselt paigutatuna mahtus Makita aku roboti kerekesse ning võimaldas hoida ka madalat roboti massikeset (Joonis 6). Aku jaoks tehti mudelis nii alumisse kui ülemisse kereplaati kaks piisavalt suurt ava, et akut oleks võimalik paigaldada roboti alt asuvast avast.



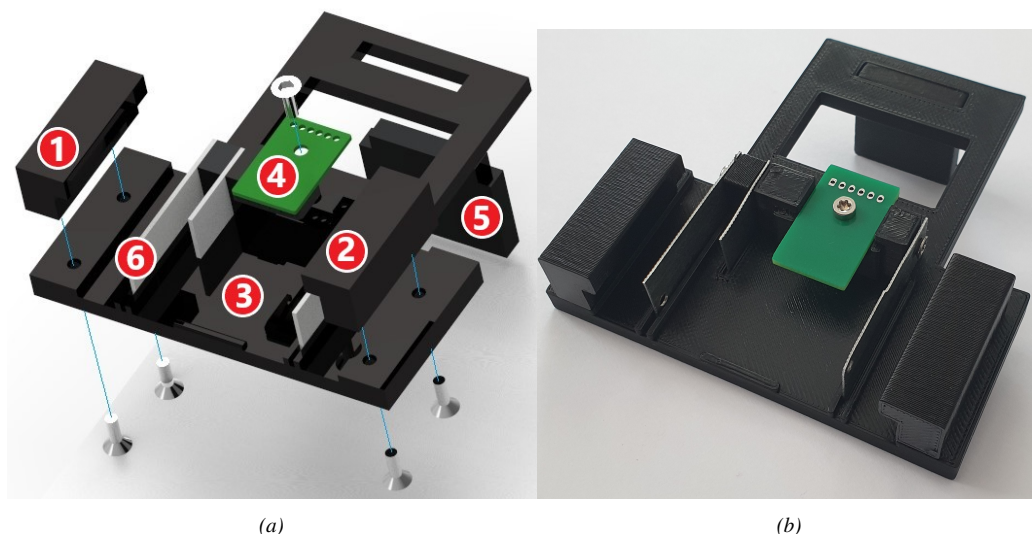
*Joonis 6: Vaade 3D mudelist, kus näha aku paigaldatuna uude asukohta (pardaarvuti ja katteplaat peidetud)*

Peale aku asukoha paika seadmist oli vaja leida moodus aku fikseerimiseks nii, et see tavapärasel kasutamisel paigal püsiks ja ühenduse säilitaks. Makita akul on külgedel olemas tootjapoolsed süvendid akutööriistade kinnitamiseks – neid süvendeid saab edukalt ära kasutada ka aku kinnitamiseks roboti kerekesse. Lisaks oli vaja aku laadimise funktsionaalsust, ilma et akut peaks robotist eemaldama – selleks oli tarvilik võimaldada ühendust aku toite- ja andmeklemmidele. Eelmainitud vajadustest lähtuvalt disainiti arendustöö käigus lukustusmehhanism ning loodi prototüüpimise käigus neli iteratsiooni – alljärgnevas kirjeldatakse neist kõige viimast.

### 6.1 Aku lukustusmehhanism

Lukustusmehhanismi prototüübi (Joonis 7) tööpõhimõte on järgmine: mehhanism libiseb roboti kere ülemise plaadi ja pardaarvuti all oleva plaadi vahel, mis on omavahel eraldatud 6 mm distantspuksidega. Lükates mehhanismi roboti tsentri suunas, libisevad liugfiksaatorid Makita aku külgedel asuvatesse süvenditesse ning mehhanismi kontaktid ja andmeklemmid ühenduvad aku klemmidega. Samal ajal on ära kasutatud Makita aku küljes olevat originaalseades vedruga vabastusnuppu, mis haakub pardaarvuti aluse plaadi sees oleva süvendatud pesaga, mille

tulemusel jääb aku lukustatud olekus oma paigale ega nihku roboti liikumise ajal.



Joonis 7: Lukustusmehhanism 3D mudelina (a) ning valminud prototüübina (b). Joonisel (a) on näha põhikomponendid: 1 ja 2 – L-profiiliga liugfiksaatorid, 3 – põhiraam, 4 – trükkplaat koos vedruklemmiga, 5 – pide, 6 – lehtmetailist klemm

Joonisel 7 on kujutatud lukustusmehhanismi viimane ehk neljas iteratsioon ning lisas oleval joonisel 14 on kujutatud lukustusmehhanismi lõplikule versioonile eelnenud kolm iteratsiooni.

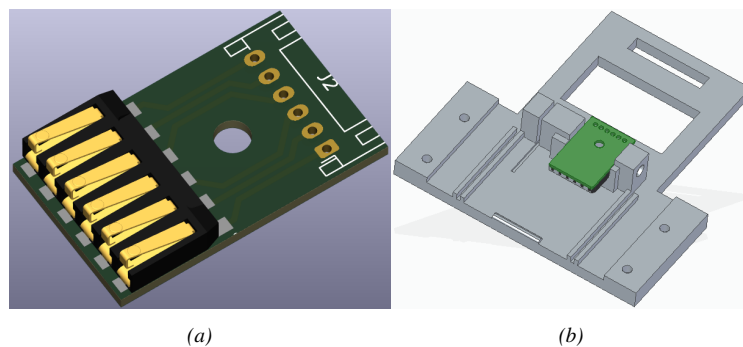
Lukustusmehhanism koosneb järgmistest komponentidest ning on valmistatud PLA-st kasutades 3D printimistehnoloogiat (v.a. klemmid ja trükkplaat):

- Põhiraam
- L-profiiliga liugfiksaatorid
- Trükkplaat koos vedruklemmidega
- Eemaldatav pide
- Terasplekist klemmid

Põhiraamis (joonis 7-a-3) on ava käepideme jaoks ning seda läbivad poldiaugud liugfiksaatorite kinnituseks. Keskmise sektsiooni sisse paigaldatud messingisulamist pressmutritesse kinnituvad M2.5 poltidega klemmid ning pisike trükkplaat.

Põhiraami külge kinnituvad M2.5 poltide abil L-profiiliga liugfiksaatorid. Fiksaatorite sisse on vastupidamise suurendamiseks lisatud messingisulamist pressmutrid. Prototüüpimise käigus muudeti liugfiksaatorid (joonis 7-a-1) eraldi monteeritavateks tükkeks, kuna sel moel saab detaile 3D printides asetada niimoodi, et prinditavad kihid jääksid 90-kraadise nurga alla võrreldes põhiraami kihtidega. Sel moel saab välistada võimaliku filamendi kihtide eraldumise, kuna just liugfiksaatorite kanda jääb kogu aku kaal.

Aku laadimise funktsionaalsuse jaoks oli vajalik ka andmeviikude ühendamine aku ja laadija vahel. Selleks puhuks disainiti ja telliti pisike trükkplaat (joonis 7-a-4), mille ühte otsa joodeti kuue vedruklemmiga kontakt (ühendamaks aku pistikuga) ning teise otsa läbivatesse avadesse joodeti juhtmed, mis ühenduvad läbi JST pistiku aku laadija pistikuga. Trükkplaat kinnitub põhiraami külge M2.5 poldiga. Vedruklemm oli vajalik, et tagada stabiilne kontaktide ühendus. Eelnevalt oli proovitud 2.54 mm sammuga *pin header*'it (vt Lisad joonis 14-c), kuid sellise lahenduse puhul ei püsinud ühendusviigud pesas sees ja hakkasid korduval mehhanismi kasutamisel nihkuma, mistõttu katkes kontaktide vahel ühendus ja laadimine polnud enam võimalik. Joonisel 8 on kujutatud lõplikku lahendust andmeviikude ühendamise osas.



Joonis 8: Trükkplaat vedruklemmidega (a), põhiraam koos vedruklemmiga (b)

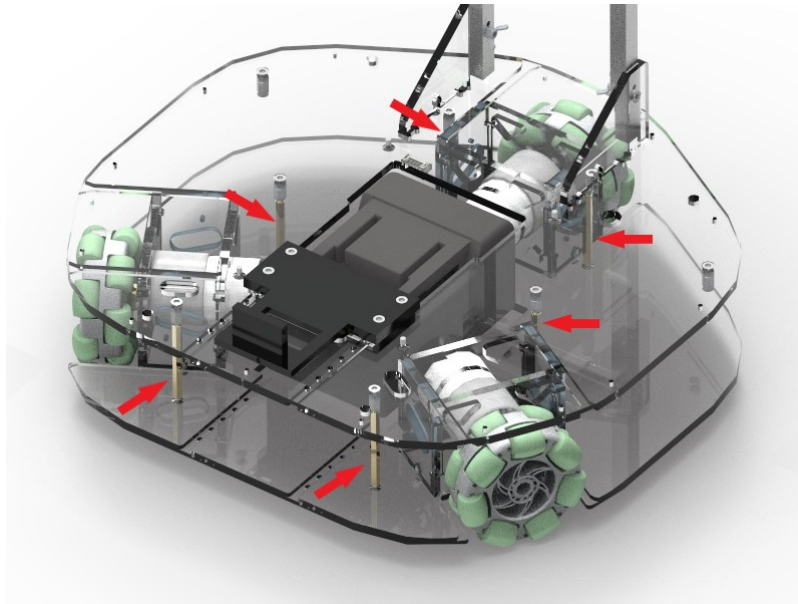
Lukustusmehhanismi liigutamiseks ning aku vabastamiseks roboti küljest tehti täpse istuga detail (joonis 7-a-5), mis kinnitub põhiraami pessa.

Akult toite ülekandeks on mehhanismis kasutusel kolm klemmi (joonis 7-a-6): positiivse ning negatiivse polaarsusega toiteklemmid ning eraldi laadimise klemm. Prototüübis kasutatakse 1 mm paksusega riskülikukujulist terasplekki, mille otstesse on puuritud 3 mm avad, et neid saaks poltidega kinnitada mehhanismi külge. Samade poltide alla kinnituvad ka toitejuhtmete ning laadimisjuhtme terminalid. Eelnevates prototüüpides (vt Lisad joonis 15) olid klemmid ka veel paindekohtadega, millele vastasid põhiraamis vastusega pesad ja seetõttu ei pidanud kasutama kinnitamiseks polte. Kuid selline lahendus võttis liiga palju ruumi ning ka painutusoperatsioonid oleks lisanud tootmisprotsessile asjatut lisakeerukust.

## 6.2 Muudatused roboti keres

Kolmanda generatsiooni robotis ei kasutata enam eraldiseisvaid mootori kontrollereid – need hakkavad olema ühtsel suurel trükkplaadil. Seega kaob ära vajadus vertikaalsete distantssplaatide järele, mille külge kinnitusid kontrollid. Uue trükkplaadi pindala maksimeerimise tõttu tekkis probleem ka muude vertikaalsete distantssplaatidega, mis tagasid roboti konstruktsiooni jäikuse. Kõik need distantssplaadid asendati metallist sisekeermestatud otstega kuuskant distantspuksidega (Joonis 9). Pukside paigutamisel võeti aluseks eelnevate distantssplaatide tsentrid, mistõttu säilis

üleüldine konstruktsiooni geomeetria, kuid vaba ruumi tekkis roboti sisemusse juurde. Uue ühtse trükkplaadi kinnitamiseks sai trükkplaati disainitud distantspuksidega kohakuti olevad avad nii, et trükkplaat jääb kahelt poolt pukside vahele. Pukside kõrguse muutmisega on võimalik muuta ka trükkplaadi kõrguslikku asetust, kuid roboti algupärane kõrgus säilib. Täiendavalt lisati roboti koostu pardaarvuti alla uus plaat (mõõtmetelt identne pardaarvuti kohal oleva plaadiga), mis oli vajalik lukustusmehhanismi toimimiseks.



*Joonis 9: Distantspuksid (märgitud punaste nooltega) roboti koostus*

## 7 Pingeregulaatori elektroonika lahendus

Roboti rattaid vedavate Pololu mootorite eluea huvides oli tarvilik tuua sisendpinge 12-voldise nominaalpinge lähedale. Lisaks oli vajadus 12 V väljundpinge järele, et tulevikus oleks roboti külge võimalik ühendada lisaseadmeid nagu robotmanipulaator jm. Nõuetest lähtudes tuli silmas pidada, et pingeregulaatorit oleks võimalik lihtne integreerida kolmanda generatsiooni ühtsesse suurde trükkplaati ning tagatud oleks piisav väljundvõimsus.

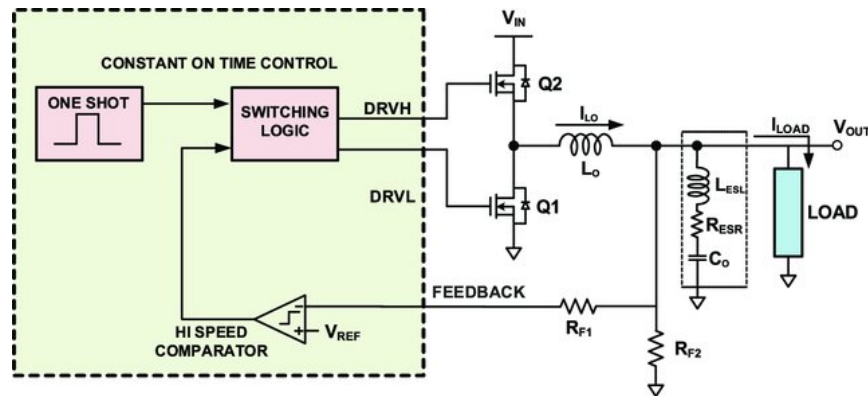
### 7.1 Pingeregulaatori disain

Kulude kokkuhoidmiseks tellitakse roboti trükkplaat ning pindmontaaž ühelt tootjalt. Hetkel on selleks tootjaks valitud JLCPCB, millest lähtuvalt tuli komponentide valikul silmas pidada JLCPCB komponentide laoseisu ning saadavust. Võimsusnõuetest lähtuvalt leiti tootevalikust Texas Instruments'i LM3150 kiip, mille puhul on tegemist kiirelt lülitatava pinget alandava kontrolleri-ga. Kiip on ühe väljundiga ning talub 6 – 42 V sisendpinget. Selle väljundpinge on reguleeritav vahemikus 0,6 – 40 V ning lülitussagedust on võimalik programmeerida vahemikus 200 kHz – 1 MHz. LM3150 omab järgnevaid funktsioone: väljundvoolu piiramine; sageduse sünkroniseerimine; sujuvkäivituse seadistamine; väljalülitus ülekuumenemise ning ülepinge korral. Tüüpilises lahenduses on kontrolleri võimeline taluma konstantselt 12 A väljundkoormust. Selles kontrolleri-s kasutatud COT (ingl *constant on-time*) arhitektuur võimaldab kasutada väljundis madala ESR (ingl *equivalent series resistance*, ekvivalent jadatakistus) väärtusega kondensaatoreid, mis omakorda tagab stabiilsema väljundpinge (vähem pulsseerivat pinget väljundis) [45].

COT arhitektuuri puhul kasutatakse konstantse pikkusega aega, mille jooksul väljatransistor on avatud – lülitamist juhtiva kastsignaali täituvust reguleeritakse hoopis väljatransistori kinnioleku ajaga. Sellest lähtuvalt on lülitussagedus küllaltki konstantne ühtlase koormuse ja sisendpingega, kuid võib muudel juhtudel siiski varieeruda [46]. Väljatransistori avatud oleku aeg on skeemis paika pandud 604 k $\Omega$  takistiga. Pingeregulaatori väljundpinge pannakse paika vastavalt andmelehele 10 k $\Omega$  ja 191 k $\Omega$  takistiga. Väljundpinge saadetakse tagasi kontrolleri komparaatorisse, kus seda võrreldakse referentspingega – nii toimib tagasisideahel, mis võimaldab väljundpinget hoida ühtlaselt, kui muutub koormus väljundis [47]. COT arhitektuuri eeliseks on kiire reageerimisaeg tagasisideahelas ning see võimaldab lihtsat lahendust [46]. Joonisel 10 on kujutatud tüüpiline COT arhitektuuriga lülitatav pingeregulaatori skeem lihtsustatud kujul.

Induktor valitakse vastavalt lubatud maksimaalset pulsatsioonipinget (*ingl ripple voltage*) silmas pidades niimoodi, et koormuse muutumisest tingitud pingelangu korrigeerimise viide oleks minimaalne. Samas tuleb meeles pidada, et induktorid küllastuvad mingil tasemel – see näitaja peab olema kõrgem kui maksimaalne vool süsteemis. Lisaks pole induktiivsus konstantne – see langeb vastavalt sellele, kui palju voolu induktorist läbi jookseb. Valides suurema väärtusega

induktori saab vähendada pulsseerivat pinget, kuid samas piirab see ka tagasisideahelas reageerimiskiirust koormuste muutumisel väljundis [23]. Andmelehele[47] tuginedes ning arvutades valiti nomograafi järgi  $4.7\ \mu\text{H}$  induktor ning leiti laoseisus saadaolev komponent SXN SMMS1770-4R7M (pingetaluvus 30 V, küllastusvoolu tase 25 A), mis rahuldab ja ületas nõudeid.



Joonis 10: Põhimõtteline COT-arhitektuuriga lülitatav pingeregulaatori skeem [48]

Sisendi poolel olevaid kondensaatoreid valides on oluline pulsatsioonipinge amplituudi vähendamine, et saaks omakorda vähendada vahelduvvoolu komponenti, mis läbib kondensaatoreid ja liigub ülemisse väljatransistorisse – komponentide RMS voolu taluvus peab olema selleks piisav. Selle jaoks on kondensaatoreid valides oluline väike ESL (ingl *equivalent series inductance* - ekvivalent jadainduktiivsus) ning väike ESR. Kondensaatoreid pingetaluvus peaks olema minimaalselt 1,3 kordne võrreldes sisendpingega [23, 49]. Andmelehes[47] olevate valemite järgi arvutati vajaminev mahtuvus ning ESR väärtused, mille alusel valiti sisendisse rööbiti kolm  $39\ \mu\text{F}$  35V alumiinium elektrolüütkondensaatorit maksimaalse ESR väärtusega  $30\ \text{m}\Omega$  (Panasonic-35VPF39M) ja üks  $100\ \text{nF}$  keraamiline kondensaatoreid.

Väljundis kasutatakse kondensaatoreid müra filtreerimiseks, tagasisideahela karakteristikute parendamiseks ning toite stabiliseerimiseks koormuste muutumise ajal. Tähtis on ESR väärtus, mis mõjutab tagasiside ahela tööd ja peab seetõttu olema ettenähtud piirides [23]. Kuna sellist piisavalt madala ESR väärtusega elektrolüütkondensaatoreid ei õnnestunud leida (selle tulemusel oli häiritud tagasisideahela töö, mille tõttu ei suutnud regulaator hoida väljundis korrektset pinget), siis kasutati hiljem lisaks  $120\ \mu\text{F}$  elektrolüütkondensaatoreid rööbiti veel keraamilist kondensaatoreid, mis on  $200\ \text{kHz}$  lülitussageduse juures  $10\ \text{m}\Omega$  [50] ESR väärtusega. Peale  $100\ \mu\text{F}$  keraamilise kondensaatoreid lisamist hoiti väljundis stabiilset pinget erinevate koormuste korral.

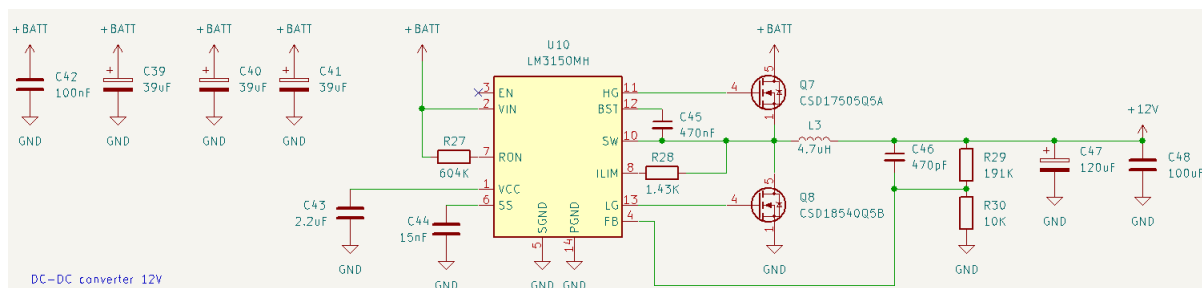
Väljatransistori valikul on tähtis väärtus  $R_{DS(on)}$  ehk tema takistus voolu juhtimise ajal, millest sõltub väljatransistoril eralduv soojuskadu. See võiks jääda soovituslikult millioomide vahemikku. Vaatama peab ka paisu parasiitmahtuvust, kuna sellest sõltub väljatransistori avanemiskiirus ning seeläbi lülitumiskiirus ja energiakaod. Üldiselt võiks paisu avanemiseks vajamineva laengu suurus jääda mõnekümne nanokuloni piiresse [23]. Lahenduses kasutati kahte

Texas Instruments väljatranistorit CSD17505Q5A/CSD18540Q5B, mille vastavad näitajad on  $3.7\text{ m}\Omega$  /  $2.6\text{ m}\Omega$  ja  $10\text{ nC}$  /  $20\text{ nC}$ .

Lisaks on disainis kasutatud voolu piiramise funktsiooni jaoks  $1.43\text{ k}\Omega$  takistit, pehmestardi jaoks  $15\text{ nF}$  keraamilist kondensaatorit (aitab siluda käivitamisel tekkivaid voolupiike ja liigset koormamist), tagasisideahela stabiilseks toimimiseks  $470\text{ pF}$  keraamilist kondensaatorit, väljatransistori paisu pingestamiseks vajalikku  $470\text{ nF}$  keraamilist kondensaatorit ning  $2.2\text{ }\mu\text{F}$  keraamilist kondensaatorit, mis on soovitatud kiibi toitepinge stabiliseerimiseks [47].

## 7.2 Pingeregulaatori elektriskeem

Pingeregulaatori elektriskeem koostati vabavaralises programmis KiCad 6.0 ning on nähtaval joonisel 11.



Joonis 11: Pingeregulaatori elektriskeem

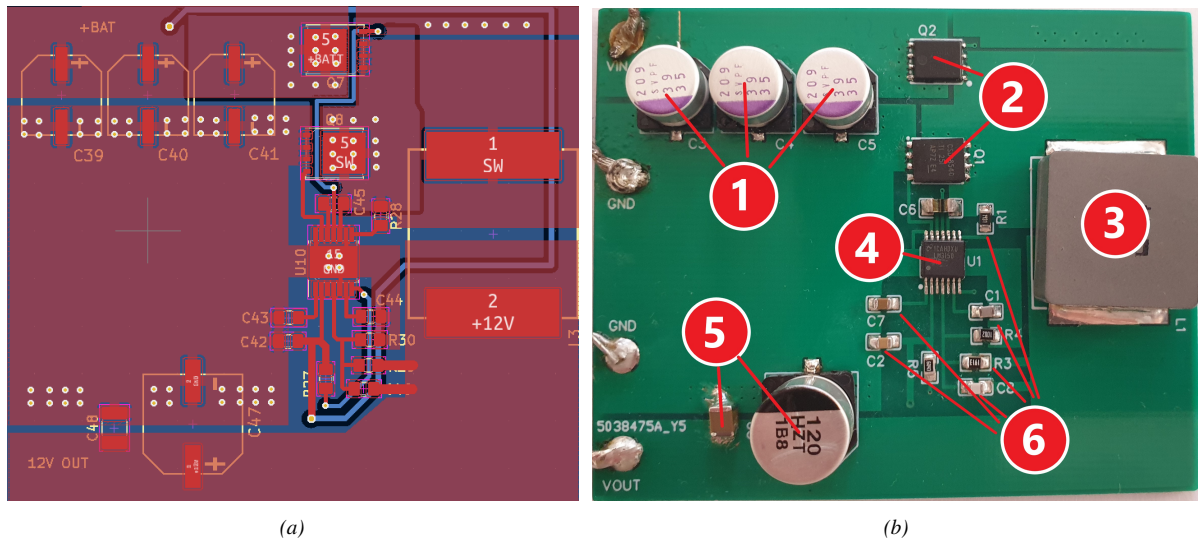
## 7.3 Trükkplaadi kujundus ja valminud prototüüp

Käesolevas töös kirjeldatud pingeregulaatori trükkplaadi visandamiseks kasutati vabavaralist programmi KiCad 6.0, millega on võimalik koostada elektriskeemi, disainida trükkplaati, koostada tootmise jaoks Gerber faile ning genereerida ka 3D vaateid trükkplaadist.

Kõik komponendid on paigutatud ülemisele trükkplaadi poolele, alumine pool on peamiselt kasutusel GND polügonina. Disainimisel on lähtutud dokumentatsioonist [47, 51] ja kasutatud on järgnevaid soovitusi:

- Väljatransistorid on paigutatud peegelpildis, et vähendada elektromagneetilise interferentsi mõju.
- Paremaks soojusjuhtimiseks on kasutatud läbiviikuseid GND polügonile. Väljatransistoritel eralduva soojuse juhtimiseks on otse nende all alumisel kihil spetsiaalsed polügonid.
- Väljatransistori paisu pingestamise kondensaator on toodud kontrolleri lähedale.
- Radade parasiitinduktiivsuse minimeerimiseks paigutati sisendkondensaatoreid GND, kontrolleri GND ja väljatransistori GND viigud üksteisele võimalikult lähedale.

Joonisel 12 on kujutatud trükkplaadi disain (a), millel näha nii pealmist kui ka alumist vasekihti ning valminud trükkplaati koos joodetud komponentidega (b).



Joonis 12: KiCadis valminud trükkplaadi (a) disain (kõik kihid) ja valminud prototüüp (b) oluliste komponentidega: 1 – sisendi kondensaatorid, 2 – väljatransistorid, 3 – induktor, 4 – kontrolleri, 5 – väljundi kondensaatorid, 6 – passiivid

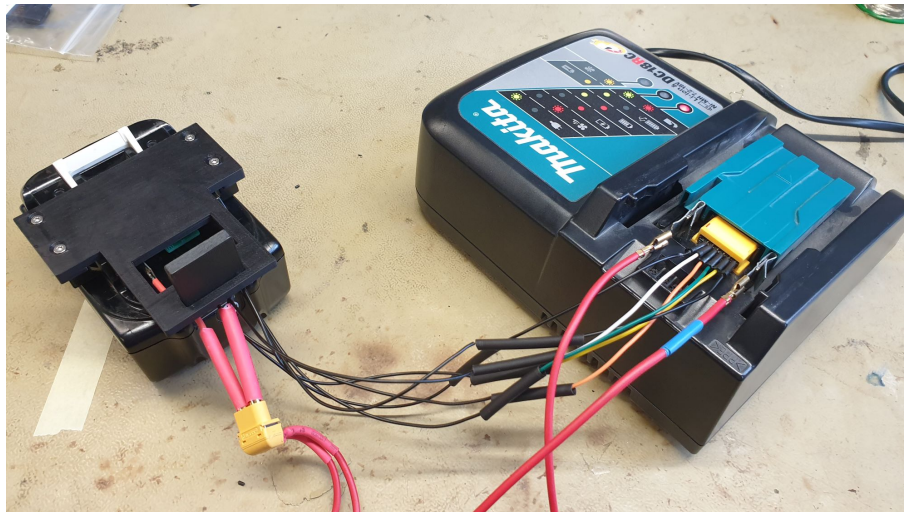
## 8 Tulemuste analüüs ja järeldused

Bakalaureusetöö käigus valminud lukustusmehhanismi ning pingeregulaatori prototüüpide toimimise ning funktsionaalsuse kontrolliks viidi läbi testkatsed. Alljärgnevas kahes alapeatükis on kirjeldatud testimisprotseduuri ning analüüsitud saadud tulemusi.

### 8.1 Lukustusmehhanismi funktsionaalsuse testimine ning analüüs

Testimise käigus kasutati lisaks lukustusmehhanismile ka Makita 18V LXT akut ning Makita DC18RC laadijat järgnevas konfiguratsioonis (Joonis 13) – lukustusmehhanismi trükkplaadi külge joodeti kuus juhet, mis ühendati laadija andmeviikude pistikuga ning mehhanismi plekist klemmid ühendati juhtmetega laadija vastavate terminalidega. Lukustusmehhanismi prooviti korduvalt aku külge kinni ning lahti ühendada, samal ajal mehhanismi koos akuga loksutades püüdes imiteerida võimalikke mõjuvaid jõude, mis esineksid, kui seade oleks paigaldatud robotisse ringisõitmise ajal. Lukustusmehhanism jäi testimise käigus kindlalt akuga ühendusse ega nihkunud raputamise käigus. Igakordse mehhanismi ühendamise käigus hakkas aku laadimisprotsess korrektselt pihta ning ei katkenud isegi aku loksutamise ajal. Sellise katse tulemuste põhjal saab järeldada, et liugfiksaatorite ja vedruklemmide ühendus toimis ettenähtud moel, hoides akut paigal ning tagades sujuva laadimise.

Testimise käigus viidi läbi ka katsed, kus mõõdeti aku vahetamiseks kuluvat aega nii vana kui uue akulahendusega. Teise generatsiooni aku eemaldamiseks oli vaja eemaldada katteplaat,



*Joonis 13: Lukustusmehhanismi testimiseks läbi viidud katse koos aku ja laadijaga*

lahti ühendada pistik (mille ligipääs on ebamugav), välja tõmmata LiPo aku ning vastupidises järjekorras paigaldada uus aku. Kogu protsess võttis kümne katse keskmisena aega 58,4 sekundit. Seevastu uue akulahenduse puhul piisab lukustusmehhanismi tõmbamisest/lükkamisest ning samaaegselt aku eemaldamisest/sisestamisest roboti all asuva ava kaudu. Kümne katse keskmisena mõõdeti kogu vahetusprotsessi peale kulunud ajaks 20,3 sekundit. Katse põhjal saab järeldada, et uue akulahenduse puhul on akuvahetust võimalik teostada peaaegu viis korda kiiremini.

## 8.2 Pingeregulaatori testimine ning analüüs

Pingeregulaatori testimiseks viidi läbi rida katseid, mille käigus ühendati regulaatori väljundisse erinevaid koormuseid, kasutades selleks rööbiti ühendatud erineva takistusega keraamilisi 20W ja 30W takisteid. Mõõtmised viidi läbi digitaalse multimeetriga Victor VC 9804A+ [52].

Katsete tulemused on koondatud tabelisse 3. Tabelist on näha, et väljundpinge üldine varieeruvus jääb 0,5 V vahemikku ning sõltub sisendpingest (kõrgema sisendpinge korral on ka väljundpinge kõrgem) ja rakendatavast koormusest (suurema koormuse puhul reguleeritakse ka väljundis suurem pinge). Erandiks on siinkohal test 15,5 V sisendpinge korral, kus on näha, et regulaator toimib veel ootuspäraselt 7,85 A koormuse juures (väljundpinge 11,92 V), kuid sealt edasi suuremate koormuste korral hakkab väljundis pinge liigselt langema. Samas pole see suur probleem, sest lähtuvalt Makita akus kasutatavate 18650 Sony Konion elementide andmelehest [53] on sellise pinge juures aku juba ligi 85% tühjenenud ja roboti akut tuleks laadida niikuinii. Tuleviku arendustööd silmas pidades võiks antud probleemile tähelepanu pöörata ja sobivam lahendus leida ka suuremate koormuste jaoks olukorras, kus sisendpinge langeb 15,5 V lähedale. Kuna pingeregulaatori disainimise ajal ei olnud paigas veel ülejäänud trükkplaadi komponendid ega nende täpne asukoht, siis tulevikus võiks pingeregulaatori disaini optimeerida ning suurust vähendada vastavalt ülejäänud komponentide asetust ning ruumivajadust silmas pidades.

*Tabel 3: Pingeregulaatori testikatse mõõtmistulemused*

| <b>Pinge sisendis</b> | <b>Pinge väljundis</b> | <b>Voolutugevus</b> | <b>Võimsus</b> |
|-----------------------|------------------------|---------------------|----------------|
| 18,5 V                | 12,53 V                | –                   | –              |
| 18,5 V                | 12,85 V                | 2,48 A              | 31,87 W        |
| 18,5 V                | 12,86 V                | 5,01 A              | 64,42 W        |
| 18,5 V                | 12,89 V                | 9,53 A              | 122,84 W       |
| 18,5 V                | 12,98 V                | 12,04 A             | 156,28 W       |
| 17,2 V                | 12,43 V                | –                   | –              |
| 17,2 V                | 12,6 V                 | 2,47 A              | 31,12 W        |
| 17,2 V                | 12,71 V                | 5,05 A              | 64,18 W        |
| 17,2 V                | 12,80 V                | 10,03 A             | 128,38 W       |
| 17,2 V                | 12,85 V                | 11,90 A             | 152,91 W       |
| 15,5 V                | 12,30 V                | –                   | –              |
| 15,5 V                | 12,40 V                | 2,3 A               | 28,52 W        |
| 15,5 V                | 12,81 V                | 5,61 A              | 71,86 W        |
| 15,5 V                | 11,92 V                | 7,85 A              | 93,57 W        |
| 15,5 V                | 11,05 V                | 8,55 A              | 94,47 W        |

## 9 Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö raames uuendati haridusliku õpperoboti Robotont kolmanda generatsiooni toitesüsteemi – leiti nõuetele vastav uus aku, valmisid aku lukustusmehhanism ning pingeregulaator veorataste ettenähtud nimipinge tagamiseks.

Töö käigus analüüsiti Eestis jaemüügis olevaid akusid ning eelnevalt seatud nõuetest lähtuvalt valiti sobivate parameetritega Makita LXT seeria 18 V aku. Aku korpuse mõõtmetest ning ehituslikest eripäradest lähtudes modelleeriti erinevaid mehaanikalahendusi lukustusmehhanismile ning valmistati 3D printimise teel mitmeid prototüüpe, mille seast viimati valminud tagas oodatud tulemust – uut akut oli võimalik kinnitada roboti kere, mehhanism võimaldas akutoite ülekannet trükkplaadile ning laadimisfunktsiooni toimimiseks vajaminevat andmeklemmide ühendust. Lisaks mõõdeti akuvahetusele kuluvat aega nii uue kui vana akulahendusega – uue akulahendusega on kogu protsess oluliselt mugavam ning kiirem, võimaldades isegi kuni viiekordset ajavõitu.

Samuti disainiti veorataste mootorite ettenähtud toitepinge tagamiseks 12 V pingeregulaatori lahendus, mis hakkab olema üks osa kogu robotit hõlmavast ühtsest trükkplaadist. Terviklahendusest eraldi valminud trükkplaadi prototüüpi testiti erinevate koormuste all vahemikus 1 – 12 A. Pingeregulaator tagas väljundis oodatud pinge testjuhtudel, kus aku mahutavus oli üle 15%.

## Viited

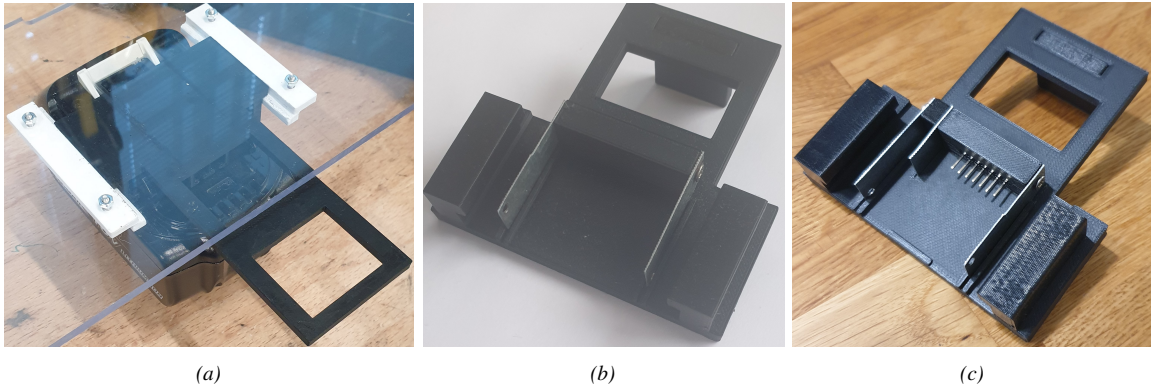
- [1] R. Raudmäe, „Avatud robotplatvorm Robotont“, est, Thesis, Tartu Ülikool, 2019. aadress: <https://dspace.ut.ee/handle/10062/64341> (vaadatud 22.01.2023).
- [2] S. Summer ja T. Maloney, „Fire Hazard Analysis for Various Lithium Batteries“, tehniline raport, märts 2017. aadress: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC-16-17.pdf> (vaadatud 01.03.2023).
- [3] *Pololu - 19:1 Metal Gearmotor 37Dx68L mm 12V with 64 CPR Encoder (Spur Pinion)*, en. aadress: <https://www.pololu.com/product/2822> (vaadatud 22.01.2023).
- [4] „Pololu 37D Metal Gearmotors“, en, 2019. aadress: <https://www.pololu.com/file/0J1706/pololu-37d-metal-garmotors.pdf> (vaadatud 29.01.2023).
- [5] D. Scaradozzi, L. Guasti, M. D. Stasio ja B. Miotti, „Robotics in Education: A Smart and Innovative Approach to the Challenges of the 21st Century“, en, teoses *Makers at School, Educational Robotics and Innovative Learning Environments*, Springer Cham, 2021, lk. 18–23. DOI: 10.1007/978-3-030-77040-2.
- [6] A. Eguchi, „Bringing Robotics in Classrooms“, en, teoses *Robotics in STEM Education: Redesigning the Learning Experience*, M. S. Khine, toim., Cham: Springer International Publishing, 2017, lk. 3–31. DOI: 10.1007/978-3-319-57786-9\_1.
- [7] *LEGO® Education SPIKE™ Prime baaskomplekt*. aadress: <https://www.robomiku.ee/toode/spike-prime-baaskomplekt/> (vaadatud 09.03.2023).
- [8] *SPIKE™ Prime Technical Specifications*. aadress: [https://education.lego.com/v3/assets/blt293eea581807678a/bltb87f4ba8db36994a/5f8801b918967612e58a69a6/techspecs\\_techniclargehubrechargeablebattery.pdf](https://education.lego.com/v3/assets/blt293eea581807678a/bltb87f4ba8db36994a/5f8801b918967612e58a69a6/techspecs_techniclargehubrechargeablebattery.pdf) (vaadatud 09.04.2023).
- [9] Y. Name, *ROBOTIS e-Manual*, en. aadress: <https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/overview/> (vaadatud 08.02.2023).
- [10] F. Mondada *et al.*, „Bringing Robotics to Formal Education: The Thymio Open-Source Hardware Robot“, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, köide 24, nr 1, lk. 77–85, märts 2017. DOI: 10.1109/MRA.2016.2636372.
- [11] *Thymio educational robot*, en. aadress: <https://www.generationrobots.com/en/faqs/thymio-educational-robot.html> (vaadatud 09.04.2023).
- [12] *Robot Kits for Kids : mBot | Makeblock - Global STEAM Education Solution Provider*, en-US. aadress: <https://www.makeblock.com/steam-kits/mbot> (vaadatud 08.02.2023).
- [13] *MOOC: Robootikast puust ja punaseks*, en. aadress: <https://sisu.ut.ee/robot/avaleht?lang=en> (vaadatud 08.02.2023).

- [14] D. McNulty, A. Hennessy, M. Li, E. Armstrong ja K. M. Ryan, „A review of Li-ion batteries for autonomous mobile robots: Perspectives and outlook for the future“, *Journal of Power Sources*, köide 545, oktoober 2022, Publisher: Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.231943.
- [15] Z. M. Salameh ja B. G. Kim, „Advanced lithium polymer batteries“, teoses *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, juuli 2009, lk. 1–5. DOI: 10.1109/PES.2009.5275404.
- [16] U. Technologies, *Li-Polymer vs. Li-Ion Battery: Which One Is Better?*, en-US, oktoober 2022. aadress: <https://www.uettechnologies.com/li-polymer-vs-li-ion-battery/> (vaadatud 01.03.2023).
- [17] F. Sergi, A. Arista, G. Agnello, M. Ferraro, L. Andaloro ja V. Antonucci, „Characterization and comparison between lithium iron phosphate and lithium-polymers batteries“, en, *Journal of Energy Storage*, köide 8, lk. 235–243, november 2016. DOI: 10.1016/j.est.2016.08.012.
- [18] *Ultra-Thin LiPo Battery*. aadress: <https://www.lipolbattery.com/Ultra-Thin-LiPo-Battery.html> (vaadatud 04.04.2023).
- [19] *LiPo vs Lithium Ion Batteries for Unmanned & Robotics Applications*, en-US. aadress: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/lipo-vs-lithium-ion-batteries-for-unmanned-robotics-applications/> (vaadatud 12.03.2023).
- [20] *Desirable Battery characteristics*. aadress: [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery\\_characteristics.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery_characteristics.php) (vaadatud 08.04.2023).
- [21] M. Shen ja Q. Gao, „A review on battery management system from the modeling efforts to its multiapplication and integration“, en, *International Journal of Energy Research*, köide 43, nr 10, lk. 5042–5075, 2019. DOI: 10.1002/er.4433. (vaadatud 09.04.2023).
- [22] *Linear vs. Switching Regulators* | Renesas. aadress: <https://www.renesas.com/us/en/products/power-power-management/linear-vs-switching-regulators> (vaadatud 15.03.2023).
- [23] *AN1663: Designing a Buck Converter*. aadress: <https://www.renesas.com/us/en/document/apn/an1663-designing-buck-converter?r=481351> (vaadatud 15.03.2023).
- [24] *ROS/Introduction - ROS Wiki*. aadress: <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction> (vaadatud 07.02.2023).
- [25] *4S LiPo aku Turnigy*. aadress: [https://cdn-global-hk.hobbyking.com/media/catalog/product/cache/1/image/660x415/17f82f742ffe127f42dca9de82fb58b1/1/7/176448\\_9067000280-0.jpg](https://cdn-global-hk.hobbyking.com/media/catalog/product/cache/1/image/660x415/17f82f742ffe127f42dca9de82fb58b1/1/7/176448_9067000280-0.jpg) (vaadatud 27.02.2023).

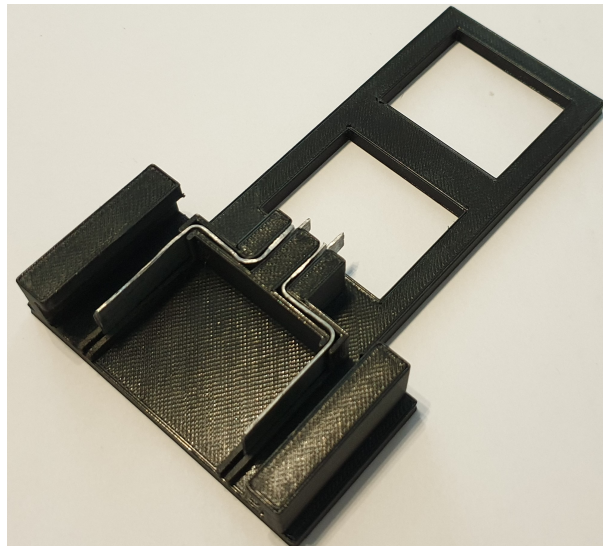
- [26] D. Workshop, *Safely Using LiPo Batteries - Charging, Balancing & Storing*, en-US, veebruar 2022. aadress: <https://dronebotworkshop.com/lipo-safety/> (vaadatud 01.03.2023).
- [27] V. N. Höpner ja V. E. Wilhelm, „Insulation Life Span of Low-Voltage Electric Motors—A Survey“, en, *Energies*, köide 14, nr 6, jaanuar 2021. DOI: 10.3390/en14061738.
- [28] J. K. Lancaster, „The influence of arcing on the wear of carbon brushes on copper“, en, *Wear*, köide 6, nr 5, lk. 341–352, DOI: 10.1016/0043-1648(63)90202-3.
- [29] *BL1850B - Aku LXT® 5,0 Ah*, et. aadress: <https://www.makita.ee/product/bl1850b.html> (vaadatud 11.03.2023).
- [30] *LiHD | Akud | Metabo elektrilised käsitööriistad*. aadress: <https://www.metabo.com/ee/et/seadmed/akusuesteemid/akuga-masinate-tarvikud/akud/lihd/> (vaadatud 11.03.2023).
- [31] *Battery Technology*, en-US. aadress: <https://www.powerforall-alliance.com/en/battery-technology/> (vaadatud 11.03.2023).
- [32] *M18™ REDLITHIUM™ XC5.0 Battery | Milwaukee Tool*, en. aadress: <https://www.milwaukee.com/Products/Batteries-and-Chargers/M18-Batteries-and-Chargers/48-11-1850> (vaadatud 11.03.2023).
- [33] Hilti, *Nuron aku B 22-110 - Juhtmevabade tööriistade akud - Hilti Eesti*, et-EE. aadress: [https://www.hilti.ee/c/CLS\\_CORDLESS\\_TOOLS\\_7123/CLS\\_CORDLESS\\_BATT\\_CHARGE\\_7123/CLS\\_CORDLESS\\_BATTERIES\\_7123/r13250359](https://www.hilti.ee/c/CLS_CORDLESS_TOOLS_7123/CLS_CORDLESS_BATT_CHARGE_7123/CLS_CORDLESS_BATTERIES_7123/r13250359) (vaadatud 11.03.2023).
- [34] *20V MAX\* DEWALT POWERSTACK™ 5.0 Ah Battery | DEWALT*, en. aadress: <https://www.dewalt.com/product/dcbp520/20v-max-dewalt-powerstacktm-50-ah-battery> (vaadatud 11.03.2023).
- [35] *LXT Technology*, et. aadress: <https://www.makita.ee/lxt-technology.html> (vaadatud 11.03.2023).
- [36] *The Bosch 18V POWER FOR ALL battery system. | Bosch DIY*, en-SA. aadress: <https://www.bosch-diy.com/sa/en/landing/power-for-all/power-for-all> (vaadatud 11.03.2023).
- [37] *XQT Q&A*. aadress: <https://www.makita.ee/xgt-qa.html> (vaadatud 11.03.2023).
- [38] *Makita BL1850B 18V LXT® Lithium-Ion 5.0Ah Battery*. aadress: [https://m.media-amazon.com/images/I/71Msqks+X0L.\\_AC\\_SY300\\_SX300\\_.jpg](https://m.media-amazon.com/images/I/71Msqks+X0L._AC_SY300_SX300_.jpg) (vaadatud 02.03.2023).
- [39] *Metabo battery pack LIHD 18 V*. aadress: [https://www.metabo.com/ee/out/pictures/generated/product/1/464\\_309\\_70/2536800s\\_51.jpg](https://www.metabo.com/ee/out/pictures/generated/product/1/464_309_70/2536800s_51.jpg) (vaadatud 02.03.2023).
- [40] *Bosch battery pack PBA 18V 6,0Ah*. aadress: [https://www.powerforall-alliance.com/wp-content/uploads/Battery\\_6.0Ah-380x380.png](https://www.powerforall-alliance.com/wp-content/uploads/Battery_6.0Ah-380x380.png) (vaadatud 11.03.2023).

- [41] *REDLITHIUM™ XC5.0 Extended Capacity Battery Pack*. address: [https://www.milwaukeeetool.com/-/media/Products/48-11-1850/48-11-1850\\_2.png?mh=520&mw=520&hash=EA432539DCFAF66325CF98432BB6FA88](https://www.milwaukeeetool.com/-/media/Products/48-11-1850/48-11-1850_2.png?mh=520&mw=520&hash=EA432539DCFAF66325CF98432BB6FA88) (vaadatud 11.03.2023).
- [42] *NURON AKU B 22-110*. address: [https://www.hilti.ee/medias/sys\\_master/images/h9f/h64/9718524706846.jpg](https://www.hilti.ee/medias/sys_master/images/h9f/h64/9718524706846.jpg) (vaadatud 11.03.2023).
- [43] *DEWALT POWERSTACK™ 5.0 AH BATTERY*. address: [https://www.dewalt.com/NAG/PRODUCT/IMAGES/HIRES/DCBP520/DCBP520\\_4.jpg?resize=530x530](https://www.dewalt.com/NAG/PRODUCT/IMAGES/HIRES/DCBP520/DCBP520_4.jpg?resize=530x530) (vaadatud 11.03.2023).
- [44] *Pololu 12V, 15A Step-Down Voltage Regulator D24V150F12*, en. address: <https://www.pololu.com/product/2885> (vaadatud 02.03.2023).
- [45] *LM3150 product information and support | TI.com*. address: <https://www.ti.com/product/LM3150> (vaadatud 15.03.2023).
- [46] *Improved COT controller with emulated ESR and dc correction*, en-US, august 2014. address: <https://www.electronicproducts.com/improved-cot-controller-with-emulated-esr-and-dc-correction/> (vaadatud 16.03.2023).
- [47] *LM3150 Wide-VIN Synchronous Buck Controller datasheet (Rev. G)*. address: <https://www.ti.com/lit/gpn/lm3150> (vaadatud 15.03.2023).
- [48] *Conventional COT dc-dc buck converter circuit diagram*. address: <https://www.researchgate.net/profile/Qurat-Ul-Ain-6/publication/348532786/figure/fig11/AS:1025699724926977@1621557279352/Conventional-COT-dc-dc-buck-converter-circuit-diagram.png> (vaadatud 16.03.2023).
- [49] J. Arrigo, „Input and Output Capacitor Selection“, tehniline raport SLTA055, veebruar 2006. address: <https://www.ti.com/lit/pdf/slta055> (vaadatud 16.03.2023).
- [50] *Typical ESR and ESL values of multilayer ceramic capacitors? | Capacitors FAQ*, en-US. address: <https://www.murata.com/en-us/support/faqs/capacitor/ceramiccapacitor/char/0016> (vaadatud 05.04.2023).
- [51] *SIMPLE SWITCHER® Design Guide*. address: <https://www.ti.com/lit/pdf/snva556> (vaadatud 15.03.2023).
- [52] *20MHz 20mF Manual Ranging Digital Multimeter Victor Vc9804a+*. address: <https://www.victormultimeter.com/sale-13775304-20mhz-20mf-manual-ranging-digital-multimeter-victor-vc9804a.html> (vaadatud 18.03.2023).
- [53] *US18650VTC6 Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information*. address: [https://www.kronium.cz/uploads/SONY\\_US18650VTC6.pdf](https://www.kronium.cz/uploads/SONY_US18650VTC6.pdf) (vaadatud 18.03.2023).

## Lisad



*Joonis 14: Lukustusmehhanismide prototüübid kronoloogilises järjestuses: versioon 1 (a) ilma liugfiksaatoriteta, versioon 2 (b) liugfiksaatoritega, kuid ilma andmeklemmideta, versioon 3 (c) liugfiksaatorite ning pin-header'ist andmeklemmidega*



*Joonis 15: Lukustusmehhanismi versioon 1, millel on painutatud klemmid*

Töö raames välja töötatud aku lukustusmehhanismi failid ning pingeregulaatori disainifailid asuvad lõputöö repositooriumis aadressil:

<https://github.com/ut-ims-robotics/muro-thesis-2023-robotont-battery-assembly>

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Marko Muro

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

## **"Robotondi akulahenduse ning 12 V pingeregulaatori prototüüpimine"**

mille juhendajad on Veiko Vunder ja Renno Raudmäe

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teose üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Marko Muro

**20.05.2023**