



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# MUUTVA KEHA GEOMEETRIAGA ROOMIKROBOTI MEHAANILISE JA ELEKTRILISE OSA PROJEKTEERIMINE JA E HITAMINE

DESIGN OF MECHANICAL AND ELECTRICAL PART FOR BODY SHAPE  
CHANGING TRACK ROBOT

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Diana Belolipetskaja

Üliõpilaskood: 179073EAAB

Juhendaja: Anton Rassõlkin, professor

Tallinn, 2020

(Tiitellehe pöördel)

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 202.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Diana Belolipetskaja

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Muutva keha geomeetriaga roomikroboti mehaanilise ja elektrilise osa projekteerimine ja ehitamine

*Kuupäev:* 20.05.2020

47 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Professor Anton Rassõlkin

*Töö konsultant (konsultandid):* Lektor Kristjan Pütsep

*Sisu kirjeldus:*

Töö eesmärgiks oli ehitada roomikroboti platvormi, mille peal saaks katsetada lukustusmehhanismi, mis annaks robotile muuta enda keha geomeetriat ja sellega anda võimaluse ronida üles, et ületada mingisuguseid takistusi. Selle eesmärgi alla kuulub ka lukustusmehhanismi projekteerimine.

Selline roomikrobot võib olla väga kasulik nendes valdkondades, kus sõiduk peab läbima maastikku, mille topoloogiat ei ole väga hästi uuritud ning sõiduk saab ületada takistusi, mis jäävad tee peale.

Käesoleva töö raames projekteeriti roboti elektriline osa, kuhu kuulub mootorite ja aku valik ning kogu elektriskeemi kokkupanek. Samuti ehitati plaadid mootorite hoidmiseks ja projekteeriti täielik lukustusmehhanism, mida lähitulevikkus hakatakse katsetama ehitatud roomikroboti platvormil.

Peamisteks kasutatud meetoditeks töö ajal olid uurimuslik, arvutuslik ja katsetuslik meetod. Töö käigus tekkis palju probleeme platvormi ehitamisega, kuid kõik need said lahendatud, töö eesmärgid said täidetud ja autor on rahul saadud tulemustega.

*Märksõnad:* roomik, muutuv kehakuju, mootor, aku, lukustusmehhanism, projekteerimine, 3D mudel.

## ABSTRACT

*Author:* Diana Belolipetskaja

*Type of the work:* Bachelor Thesis

*Title:* Design of mechanical and electrical part for body shape changing track robot

*Date:* 13.02.2015

*47 pages*

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor(s) of the thesis:* Professor Anton Rassõlkin

*Consultant(s):* Lecturer Kristjan Pütsep

*Abstract:*

The aim of the work was to build a platform of a continuous track robot, on which a locking mechanism could be tested. The mechanism would allow the robot to change the geometry of its body and thus give the opportunity to climb up and overcome any obstacles. The design of the locking mechanism also falls under this objective.

Such crawler robot can be very useful in those areas, where the vehicle must go through a terrain of which the topology has not been studied very well and the vehicle can overcome obstacles that remain on the road.

As a part of this work, the electrical part of the robot was designed, which required the selection of motors and batteries and the assembly of the entire electrical circuit. To hold the motors, special plates were built, and a complete locking mechanism was designed, which will be tested on the crawler robot platform soon.

The main methods used during the work were exploratory, computational and experimental. During the work, many problems arose with the construction of the platform, but all of them were solved, the goals of the work were met, and the author is satisfied with the results obtained.

*Keywords:* continuous track, changing shape, motor, battery, locking mechanism, design, 3D model.

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Muutva keha geomeetriaga roomikroboti mehaanilise ja elektrilise osa projekteerimine ja ehitamine</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Design of mechanical and electrical part for body shape changing track robot</b>
Üliõpilane:	<b>Diana Belolipetskaja, 179073EAAB</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika ja mehhatroonika</b>
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Anton Rassõlkin</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>Kevad 2020</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>20.05.2020</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Kiiresti arendatav robotitehnika ja elektromehaanika vajab uute elektriseadmete tootmis tehnoloogia uurimist. Antud töös on toodud erinevate roomikroboti lahendused, ning on kogutud teadmised prototüüpi.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on projekteerida roomikroboti platvorm, mille peal saaks katsetada lukustusmehhanismi, mis annaks robotile võimalust muuta enda keha geomeetriat.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Mis moodi ja millise nurga all on kõige mõistlikum blokeerida enda vahel roboti lülid, et see saaks ülesse ronida?

Milliseid komponente on vaja kasutada roboti ehitamiseks?

Millest peaks koosnema lukustusmehhanism?

## 4. Lähteandmed

Peamisteks lähteandmete allikateks on erinevad teadusartiklid, raamatud ja õpikud. Samuti plaanis on küsida nõu ülikooli õpejõudude käest. Antud lõputöö jaoks kindlasti läheb vaja teadmisi mehaanika ja elektrotehnika kohta.

## **5. Uurimismeetodid**

Lõputöö raames on vaja teha palju erinevaid arvutusi ja uuringuid, et valida komponendid õigete parameetritega. Peale algset lahenduse välja mõtlemist on vaja katsetada kas see vastab nõutud tingimustele ning kui on vaja teha muudatused

## **6. Graafiline osa**

Olulisemad joonised nagu näiteks roboti konstruktsioon, tööpõhimõte. Tabelid, mis sisaldavad roboti osade loetelu ja kaalu. Mootorite valikul põhi parameetrid. Kõik joonised ja tabelid lähevad töö põhiossa.

## **7. Lõputöö konsultandid**

Lektor Kristjan Pütsep – aitas mootori valikuga.

## **8. Töö etapid ja ajakava**

Taustauuring – 02.03.2020

Arvutused ja vajalike komponentide valimine – 09.03.2020

Projekteerimine/ 3D mudeli loomine – 30.03.2020

Lahenduse testimine – 06.04.2020

Vajalikke paranduste tegemine – 13.04.2020

Roboti ehitamine – 27.04.2020

Töö kirjaliku osa juhendajale saatmine – 04.05.2020

Paranduste sisseviimine – 08.05.2020

Teiseks läbilugemiseks töö kirjaliku osa juhendajale saatmine – 15.05.2020

Töö lõplik versioon valmis – 20.05.2020

## SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	3
ABSTRACT .....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	9
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	10
SISSEJUHATUS.....	11
1. TAUSTAURING .....	12
1.1 Roomiku eelised ja kasutusvaldkond .....	12
1.2 Olemasolevate lahenduste ülevaade .....	12
1.3 Roomikroboti prototüübi eesmärgid .....	14
2. KOMPONENTIDE VALIK .....	16
2.1 Mootori valik .....	16
2.1.1 Mootori tüüpide ülevaade .....	16
2.1.2 Mootori parameetrite arvutamine .....	17
2.1.3 Mootori mudel .....	21
2.2 Aku valik .....	23
2.2.1 Aku tüüpide ülevaade .....	23
2.2.2 Aku tüüpi ja mahtuvuse valik .....	24
3. PROTOTÜÜBI PROJEKTEERMINE JA EHITAMINE.....	27
3.1 Lukustusmehhanismi kontsept .....	27
3.1.1 Lukustusmehhanismi tööprintsip .....	27
3.1.2 Lukustusmehhanismi projekteerimine .....	29
3.2 Ees- ja tagaosade projekteerimine .....	35
3.3 Elektriskeem .....	36
4. LUKUSTUSMEHCHANISMI TESTIMINE.....	38

5. PROJEKTEERIMISE JÄRGMISED ETAPID JA TULEVIKKU PLAANID .....	41
KOKKUVÕTE.....	42
SUMMARY .....	43
KASUTATUD KIRJANDUS .....	<b>Tõrge! Järjehoidjat pole määratletud.</b>
Lisa 1 Elektriskeem .....	47



## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema kujunes välja peale teadusartikli lugemist, mida näitas lõputöö juhendaja, kus on kirjutatud roomikrobotist, mis on võimeline ületama takistusi muutes oma keha geomeetriat [1]. Peale selle artikli lugemist tekkis plaan projekteerida platvorm samade omadustega, et tulevikus arendada seda edasi ning lisada funktsionaalsust juurde. Töö peamiseks eesmärgiks on saada valmis roomikroboti platvorm, mille peal saaks testida lukustusmehhanismi disaini ja tööd.

Töö on koostatud koostöös Tallinna Tehnikaülikooli tootearenduse ja robotika tudengiga Daniil Valme, kelle lõputöös „Painduva roomikroboti mehaanika- ning juhtimissüsteemi konstrueerimine“ on kirjeldatud roomikroboti mehaanilise ja juhtimisosa projekteerimist. Töö on koostatud koostöös Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudiga, kes andis kõik vajalikud komponendid ja tööriistad ning ka koostöös mehaanika ja tööstustehnika instituudiga, kelle poolt olid pakutud lisavõimalused 3D printimiseks.

Lõputöö juhendamisega aitas elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi professor Anton Rassõlkin ning mehaanika ja tööstustehnika instituudi insener Heiko Pikner. Autor soovib ühtlasi tänada ka järgnevaid isikuid - Alvar Suun, Marko Kiisk, Mihkel Fridolin ja Daniil Valme - kes aitasid lõputöö koostamisega.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

3D	kolmemõõtmeline ( <i>3 Dimension</i> )
DC	alalisvool ( <i>Direct Current</i> )
Li-Ion	liitiumioonaku ( <i>Lithium-Ion</i> )
Li-Po	liitiumpolümeeraku ( <i>Lithium polymer</i> )
Ni-Cd	nikkel-kaadmiumaku ( <i>Nickel-Cadmium</i> )
Ni-Mh	nikkel-metallhüdriidaku ( <i>Nickel-metal hydride</i> )
Pb	pliiaku ( <i>Plumbum</i> )
PWM	pulsilaiusmodulatsioon ( <i>Pulse Width Modulation</i> )
rpm	pöörete arv minutis ( <i>revolutions per minut</i> )

## SISSEJUHATUS

Tänapäeval on sõidukite kasutamine levinud väga paljudes valdkondades. Mõned valdkonnad kasutavad sõidukitena roomiksõidukeid, mis sobivad väga hästi töötamiseks pehmetel ja hõredatel pindadel, kus on vaja vedada suurt massi. Sellised sõidukid oskavad ronida ainult teatud kõrgustele, mis võib põhjustada sõiduki kinni jäämist mingis keskkonnas.

Takistuste ületamise jaoks on olemas palju erinevaid variante, kuid tavaliselt üles ronimise kõrgus ja nurk on kindlalt fikseeritud, mis ei anna väga suurt vabadust liikumise kontrolliks. Käesoleva lõputöö eesmärk on ehitada roboti algplatvorm, mille peal saaks testida lukustusmehhanismi, mis annaks robotile võimaluse ronida üles ja ületada takistusi, kontrollides ronimise nurka ja kõrgust. Samuti antud töös projekteeritakse lukustusmehhanismi algvariant, mida tulevikus testitakse roboti peal.

Selline kontseptsioon, mis annab roomikule suurema liikumisvabaduse, oleks väga kasulik keskkondades, mille maastikku täpselt ei tea või ei ole võimalik täpsemalt uurida. Selline olukord võib juhtuda näiteks kuu maastiku uurimisel ning sellisel puhul on hea, kui robotil on võimalus sõita mitte ainult x- ja y- telgedel, vaid ka mööda z-telge.

Käesolev töö tehakse koostöös tootearenduse ja robotika eriala bakalaurese tudengiga Daniil Valme. Roboti projekteerimise etapid jagatakse kolmeks osaks: mehaaniline, elektriline ja juhtimise osa. Mehaaniline osa on tehtud kahe peale, antud töös on kirjeldatud elektrilise osa projekteerimise kohta ning juhtimise kohta on täpsemalt kirjutatud Daniil Valme lõputöös „Painduva roomikroboti mehaanika- ning juhtimissüsteemi konstrueerimine“.

Roboti projekteerimisel peamine kasutatud tarkvara on Solidworks, mis on mõeldud 3D modelleerimise jaoks. Lisaks sellele kasutati Fritzing tarkvara elektriskeemi loomise jaoks. Peamised uurimismeetodid, mida kasutatakse käesoleva töö raames on uurimuslik, arvutuslik ja katsetuslik meetod.

# 1. TAUSTAUURING

## 1.1 Roomiku eelised ja kasutusvaldkond

Esimest roomiku prototüüpi esitati rohkem kui 200 aastat tagasi kui „portatiivset raudteed“. Selle ülesehitus koosneb kolmest põhikomponendist: kaks ratast ja lint. Lindi otsad on omavahel kokku kinnitatud, mis tekitab kinnise keti. Kett on tõmmatud kahe ratta vahele ning nende pöörlemine paneb liikuma keti, mis omakorda liigutab tervet keha edasi. See on kõige lihtsama roomiku ülesehitus, kuigi on olemas ka erinevad variatsioonid, mis annavad roomikule lisaomadusi.

Kui maantee- ja raudteesõidukid töötavad ettevalmistatud maanteedel ja rööbastel, siis roomiksõidukid töötavad peamiselt looduslikel maastikel, kus ei ole nende jaoks teed ette rajatud. Roomiksõiduk on võimeline sõitma erinevatel pindadel, alates kõrbeliivast kuni värske lume ja pehme mudani. Sellise eelise teiste transpordivahendite ees annab roomiku ülesehitus. Tänu pikale ja laiale lindile, mis tavaliselt paikneb kogu sõiduki ulatuses, jaguneb sõiduki mass enam vähem ühtlaselt kogu lindi ja maa puutepinna ulatuses. Selline jõu jagunemine sobib ideaalselt raske massiga koormuse veoks pehmel pinnal, kus suure massi keskendumine ühes või mitmes punktis võib põhjustada sõiduki kinni jäämist.

Selline jõu jagamise viis ja võimalus sõita pehmetel pindadel, kus ei ole ette rajatud sõitmiseks teed, tegi roomikusõiduki väga populaarseks nendes valdkondades, kus on vaja teha tööd nimetatud tingimustes. Tehnoloogia arenguga roomiksõidukite kasutusvaldkond laienes ning leidis laialdasi rakendusi sellistes valdkondades nagu põllumajandus, sõjavägi, ehitus, kaevandamine, metsatööstus, maastikul vedamine ja taevakehade pindade uurimine [2].

## 1.2 Olemasolevate lahenduste ülevaade

On olemas palju näited sõidukitest, kus kasutatakse roomikuid. Samuti on olemas näited roomikutest, mis saavad ületada mingeid kõrgemaid takistusi nendele ronides. Näiteks joonisel 1.1 on näidatud roomik, mille külge on lisatud käpp, mis aitab ronida kõrgematele objektidele. Selline konstruktsioon on lihtsasti teostatav, kuid lubab ronida ainult teatud kõrgusele.



Joonis 1.1 Roomiksõiduk koos takistuste ületava käpaga [3]

On olemas ka teised robotid, mis oskavad ronida üle kõrgematest takistustest muutes enda kehakuju. Üks selline näide on kujutatud joonisel 1.2, kus on näidatud sõiduk, mille rattad muutuvad kolmeks konksu taoliseks detailiks, mis aitavad tal ronida takistuste peale. Kuid sellel mehhanismil on sama puudus mis eelmisel – ronimise kõrgus on piiratud konksude pikkusega.



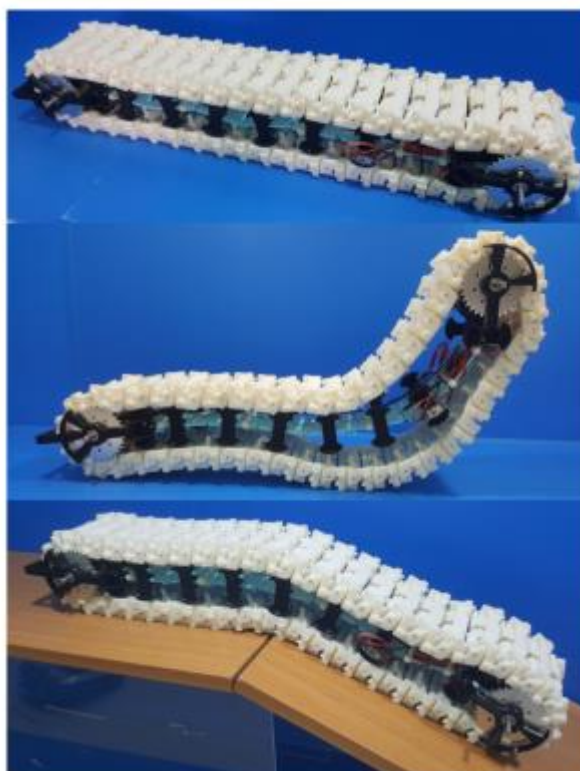
Joonis 1.2 Sõiduk muutuva rattaga [4]

Väga sarnase töö põhimõttega nagu selles töös projekteeriva robotiga on olemas muudetava geomeetriaga roomikrobot B2P2, mis on kujutatud joonisel 1.3. Selle roboti puhul juhitakse mitte ketti või linti, mis paikneb rataste vahel, vaid rattaid ja nende paigutust lindi sees, et robot saaks ületada takistusi. Selline meetod annab robotile hea juhitavuse, kuid see vajab mingit tuge takistusest üle ronimisel.



Joonis 1.3 Muutva geomeetriaga roomikrobot B2P2 [5]

Antud töö roomikroboti projekteerimise inspiratsiooniks kasutatakse Tai Kislassi ja David Zarrouki poolt kirjutatud artiklit roomikroboti kohta, mis on esitatud joonisel 1.4. Selline robot oskab muuta enda kehakuju ja ehitada endale õhus tee. Antud lahendus annab võimaluse üle ronida väiksematest takistustest ning mitte nendega kokku puutuda, või ronida mõnele kõrgemale objektidele. Artiklis on kirjeldatud selle töö põhimõtte ja näidatud mõned osad robotist.



Joonis 1.4 Muutva kehakujuga roomikrobot, mis suudab ehitada endale tee õhus [1]

### 1.3 Roomikroboti prototüübi eesmärgid

Antud töö raames roomikroboti prototüübi ehitamise peamine eesmärk on ehitada mehhanism, mille peal saaks katsetada lukustusmehhanismi ning tulevikus selle juurde lisada, et robotil oleks võimalus ronida mitte ainult mööda maapinda, vaid ka ehitada endale tee õhus, et ronida mingile kõrgemale takistusele. Esimese prototüübi ehitamisel põhiline rõhk pannakse roomiku liikumisele

ja lukustusmehhanismi kontseptsiooni loomisele ning selle katsetamisele, et saada teada kuidas täpselt selline mehhanism peaks töötama.

Enne prototüüpi projekteerimisega alustamist pannakse paika roboti liigikaudsed parameetrid, millest tuleks lähtuda komponentide valikul ja projekteerimisel.

Tabel 1.1 Roomikroboti vajalikke parameetrite mõõtmete vahemikud

<b>Roomikroboti parameeter</b>	<b>Mõõdu vahemik</b>
Pikkus	400 – 700 mm
Laius	70 – 100 mm
Keskmine kiirus	0,1 – 0,3 m/s
Ratta diameeter	50 -100 mm
Mass	1 – 1,5 kg
Kiirenduse aeg	1 – 2 s

## 2. KOMPONENTIDE VALIK

### 2.1 Mootori valik

#### 2.1.1 Mootori tüüpide ülevaade

Tavaline elektrimootor koosneb kahest põhikomponendist: paigal seisev staator ja pöörlev rootor, mis on eraldatud üksteisest õhupiluga. Energia ülekanne elektrimootorites toimub alati läbi õhus olevate magnetväljade. Õhupilus olevast magnetväljast saadav võimsus paneb elektrimootori võlli pöörlema. Elektrimootoreid jagatakse sõltuvalt toitepinge tüübist alalisvoolumootoriteks, vahelduvvoolumootoriteks ja impulsstoitega mootoriteks [6].

Mootori valikut roboti jaoks alustatakse tehes selgeks, mis toitepinge tüüpi hakatakse kasutama. Kuna roboti eesmärk on sõita väliskeskkonnas, kus ei ole alati toite võimalust, siis robot vajaks kaasaskantavat toiteallikat ehk akut, mis omakorda annab alalisvoolu. Peale seda valitakse ka mootor, mille kiirust saaks kergelt reguleerida. Alalisvoolumootorite kiiruse reguleerimine toimub mootori klemmidele antava voolu suuruse muutumisega, kuid vahelduvvoolumootorite puhul see toimub voolu sageduse muutmisega, mille teostus on palju keerulisem. Lähtudes nendest kahest faktorist valitakse mootor, mis töötab alalisvoolu peal [7].

On olemas kaks tüüpi alalisvoolumootoreid: harjastega alalisvoolumootor ja harjasteta alalisvoolumootor. Igal mootori tüübil on olemas omad eelised ja puudused ning neil on olemas kindlad ülesanded, mille jaoks need paremini sobivad. Õige valiku tegemiseks vaadeldakse erinevate mootoritüüpide ülesehitust, juhtimist ja võrreldakse neid omavahel.

Harjastega alalisvoolumootor on lihtsa ülesehitusega, millele on lisatud peale staatori ja rootori ka harjad ja kommutaator. Staator genereerib staatilise magnetvälja, mis ümbritseb rootori. Tavaliselt kasutatakse selleks püsिमagnetid. Kuna staatori magnetväli ei pöörle, siis on vaja, et rootori magnetväli hakkaks pöörlema, et tekitada rootori püsivat pöörlemist. Selleks on mootorisse lisatud harjad ja kommutaator, mis muudavad rootorist läbiva voolu suunda, mis omakorda põhjustab magnetpooluste vahetamist. Selline magnetpooluste vahetus toimub mehaaniliselt, mis teeb sellise mootori konstruktsiooni lihtsamaks ja odavamaks, kuna ei ole vaja elektroonilisi lisaseadmeid, mis muudaksid rootorit läbivat voolu suunda. Samuti harjastega alalisvoolumootori puhul on väga kerge muuta rootori pöörlemiskiirust muutes pinge väärtust. Mida väiksem on pinge, seda aeglasemalt liigub rootor. Kuid sellel mootoril on omad puudused ning peamine puudus on harjade ja kommutaatori ära kulumine, kuna need on koguaeg omavahel kontaktis ja kommutaator on pidevas liikumises [8].



Harjasteta alalisvoolumootor samuti koosneb staatorist ja rootorist, kuid sellel puuduvad kommutaator ja harjad, mis tähendab, et voolu suuna muutmine toimub mitte mehaaniliselt, vaid elektrooniliselt. Harjasteta alalisvoolumootori rootor koosneb püsिमagnetitest ja staator omakorda koosneb mähistest. Tööprintsip on sama nagu harjastega mootoril: staatori magnetpoolused tõmbavad rootori vastandpoolusi külge, kuid nüüd muudetakse voolu suunda staatori mähistest. Voolu suuna muutmine toimub elektrooniliselt tuginedes Halli tajuri signaalidele. Halli tajur asetseb rootori küljes ning saadab kas madala või kõrge signaali sõltuvalt sellest milline magnetpoolus on läbinud sensori. Teades kui tihti magnetpoolused läbivad Halli tajurit on võimalik arvutada, millal tuleb muuta voolu suunda staatori mähistest, et saada vajalik kiirus. Halli tajur saadab ainult signaali rootori positsiooni kohta ja selleks, et muuta staatori mähistes voolu suunda, on vaja kasutada kontrollereid. Selline juhtimisviis teeb kogu süsteemi palju kallimaks ja keerulisemaks, võrreldes harjadega DC mootoriga [9].

Tihti kasutatakse nii prototüüpide ehitamiseks kui ka tööstuses servo- ja samm-mootoreid, mis võivad töötada ka alalispingel, nii et tuleks vaadelda ka nende omadusi ja ülesehitust.

Servomootorite projekteerimise puhul on prioriteediks võetud kiire käivitus ja pidurdus selleks, et mootor jõuaks võimalikult kiiresti nõutud asendisse. Peale tavapärase mootorite komponentide staatori ja rootori, on servomootorisse lisatud ka asendiandur. Sellistel mootoritel on kas mingi kindel nurk, mille ulatuses rootor pöörata saab, või on olemas ka pidevpöörlemisega mootorid. Kokkuvõtvalt öeldes on tegu tagasisidestatud mootoriga, millele on lisatud juhtelektroonika mootori täpse asendi juhtimiseks [10].

Samm-mootor erineb teistest mootoritest selle poolest, et kasutab mehaanilise energia tekitamiseks pinge impulsse. Samm-mootori rootor liigub koos staatoris pöörleva magnetväljaga, mille kiirust ja pöördenurka reguleerivad staatormähisesse antud taktimpulsid. Sellest võib järeldada, et rootori positsiooni võib täpselt reguleerida mootorisse saadavate impulssidega, mis sobib väga hästi avatud juhtimisahelaga ehk tagasisideta süsteemidega [10].

### **2.1.2 Mootori parameetrite arvutamine**

Selleks, et valida sobivaim mootori tüüp, on vaja alguses panna paika, millistele kriteeriumitele see peaks vastama. Tuginedes roboti eesmärkidele olid pandud paika järgmised mootori kriteeriumid:

- mootor hakkab täitma roboti veojõu ülesannet;
- peab olema võimalikult kerge reguleerida pöörlemiskiirust;
- mootori pikkus ei tohi ületada roboti laiust (70 – 100 mm);

Peamiseks kriteeriumiks mootori tüübi valikus on pöörlemiskiiruse reguleerimine. Kuna selle töö raames on eesmärgiks võetud blokeeriva mehhanismi välja töötamine ja selle testimine, siis esimese prototüübi jaoks ei ole vaja teada mootori täpset positsiooni. Seega roboti jaoks kõige paremini sobiks harjadega alalisvoolumootor, mille pöörlemiskiirust saab juhtida klemmidele antava voolu väärtusega, mida saab väga kergelt teostada. Harjasteta alalisvoolumootori puhul on selleks vaja lisakontrollerit ja servomootor sobib paremini mootori täpseks positsioneerimiseks.

Teades mootori tüüpi on vaja valida mingi kindel mudel ja selleks on vaja arvutada peamised mootori parameetrid. Mootori üks kõige tähtsamatest parameetritest on pöördemoment, mis on jõu, jõuõla ja nende vahelise nurga korrutiseks [6].

$$M = F \cdot D \cdot \sin\alpha \quad (2.1)$$

kus  $M$  – mootori pöördemoment, ,

$F$  – jõud, N,

$D$  – jõuõlg, m,

$\alpha$  – jõu ja jõuõla vaheline nurk.

Pöördliikumise puhul jõu ja jõuõla vaheline nurk on 90°. Jõuõla pikkuseks on roboti ratta raadius. Vajaliku jõu arvutamiseks on vaja teada roboti massi, maksimaalset kiirust, millega robot hakkab liikuma, kiirendust ja ronimise maksimaalset nurka. Samuti on vaja arvestada ka hõõrdejõuga, mis mõjub roomiku liikumisel. Kuna roomikroboti kasutuskeskkond võib varieeruda, siis arvutamiseks võetakse hõõrdetegur betooni ja kummi vahel, sest selle puhul hõõrdetegur on kõige suurem ja saab arvestada ka kõikide teiste materjalidega. Hõõrdetegur betooni ja kummi vahel on 0,85 [11].

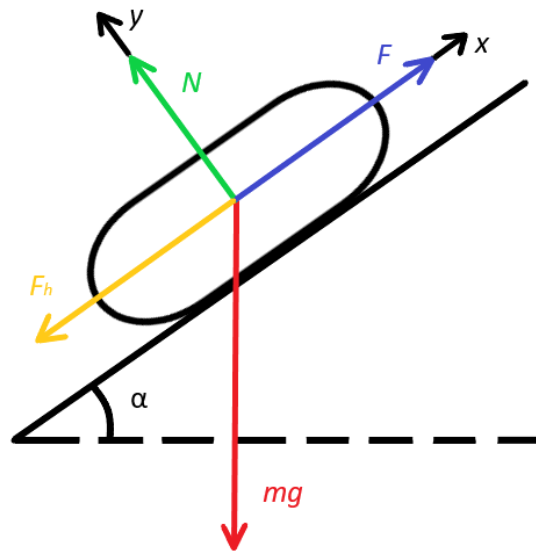
Liikumist andva jõu arvutamiseks arvestatakse kõikide jõududega, mis mõjuvad kehale liikumise ajal, mis on kujutatud joonisel 2.1. Kõikide jõudude vektorsumma võrdub keha massi ja kiirenduse korrutisega, tuginedes Newtoni teisele seadusele.

$$\vec{F}_k = m \cdot \vec{a} \quad (2.2)$$

kus  $\vec{F}_k$  – kehale mõjuvate jõudude vektorsumma, N,

$m$  – keha mass, kg,

$\vec{a}$  – keha kiirendus, m/s<sup>2</sup>.



Joonis 2.1 Kaldepinnast üles ronimisel roomikule mõjuvate jõudude diagramm, kus  $mg$  (punane) on gravitatsioonijõud ( $g$  – raskuskiirendus, mis võrdub  $9,81 \text{ m/s}^2$ ), mis mõjub vertikaalselt alla;  $N$  (roheline) on normaaljõud, mis mõjub risti ronimispinnaga;  $F$  (sinine) on liikumist andev jõud, mis mõjub paralleelselt pinnaga;  $F_h$  (kollane) on hõõrdejõud, mis mõjub liikumist andva jõuga vastassuunas. Y-koordinaati telg on võetud paralleelselt normaaljõuga ja x-koordinaati telg – paralleelselt ronimis pinnaga ning  $\alpha$  on nurk maapinna ja kaldepinna vahel

Lähtudes sellest seadusest liidetakse kõik jõud, mis mõjuvad x-telje suhtes ja nende summa peaks võrduma keha massiga korda kiirendus. Samuti liidetakse ka kõik jõud, mis mõjuvad y-telje suhtes ja kuna sellel teljel liikumist ei toimu, siis nende jõudude summa võrdub nulliga. Arvestatakse ka sellega, et hõõrdejõud on hõõrdeteguri ja keha kokkupuutva pinnaga risti mõjuva jõu ehk normaaljõu korrutis.

$$F_h = \mu \cdot F_N \quad (2.3)$$

kus  $F_h$  – hõõrdejõud, N,

$\mu$  - hõõrdetegur,

$N$  – normaaljõud, N.

Teades kõike seda koostatakse võrrandid x- ja y- telje suhtes ning kogu süsteemile mõjuvate jõudude võrrand.

Võrrand x-telje suhtes:

$$F - F_h - m \cdot g \cdot \sin\alpha = m \cdot a \quad (2.4)$$

Võrrand y-telje suhtes:

$$N = m \cdot g \cdot \cos\alpha. \quad (2.5)$$

Asendades  $x$ -telje võrrandis hõõrdejõu valemiga 2.3 ja asendades selles normaaljõu valemiga 2.5 saadakse kogu süsteemi võrrand:

$$F = m \cdot (a + \mu \cdot g \cdot \cos\alpha + g \cdot \sin\alpha) \quad (2.6)$$

Ainukene teadmata suurus on kiirendus, mida arvutatakse valemi 2.7 järgi

$$a = \Delta v / \Delta t \quad (2.7)$$

kus  $a$  – kiirendus,  $m/s^2$ ,

$\Delta v$  – kiiruse muut, lõppkiirusest lahutatakse algkiirust,  $m/s$ ,

$\Delta t$  – ajavahemik,  $s$ .

Kõik arvutamiseks vajalikud parameetrid peale kaldenurga võetakse tabelist 1.3.1 ning võetakse nende maksimaalsed väärtused, et mootori võimsust roboti vedamiseks jätkuks kindlasti. Kaldenurgka võetakse  $0^\circ$  kuni  $75^\circ$  sammuga  $15^\circ$ , et näha kuidas muutub jõud erinevatel kandepindadel. Arvutamise tulemused on esitatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Minimaalse vajaliku jõu väärtus sõltuvalt kaldenurgast

Kaldenurk	Liikumiseks vajalik minimaalne jõud, N
$0^\circ$	12,73
$15^\circ$	16,12
$30^\circ$	18,41
$45^\circ$	19,47
$60^\circ$	19,22
$75^\circ$	17,68

Kõige suurem jõu väärtus on kaldenurgaga  $45^\circ$ . Seda jõu väärtust kasutatakse edasistel arvutustel. Kasutades valemit 2.1 saab teada mootori pöördemomendi. Jõuõla väärtuseks on võetud ratta maksimaalne raadius. Saadud pöördemoment võrdub  $0,97 \text{ Nm}$ .

$$M = F \cdot D = 19,47 \text{ N} \cdot 0,05 \text{ m} = 0,97 \text{ Nm} \quad (2.8)$$

Peale pöördemomenti arvutatakse ka mootori võimsus.

$$P = M \cdot \omega \quad (2.9)$$

kus  $P$  – mootori võimsus,  $W$ ,

$M$  – mootori pöördemoment,  $Nm$ ,

$\omega$  – mootori nurkkiirus,  $rad/s$ .

Nurkkiiruse arvutamiseks kasutatakse valemit 2.10.

$$\omega = v/r \quad (2.10)$$

kus  $v$  – roboti joonkiirus, m/s,

$r$  – ratta raadius.

Roboti joonkiiruseks oli võetud 0,3 m/s ja ratta raadiuseks 0,05 m. Nurkkiirus sellisel juhul võrdub 6 rad/s ja mootori võimsus on 5,82 W. Paljud tootjad kasutavad mootori nurkkiiruse kirjeldamisel mitte rad/s, vaid pöörete arvu minutis (rpm), nii et mugavama otsingu jaoks on mõistlik muuta nurkkiirus pöörete arvuks kasutades rad/s ja rpm suhet, mis on kirjeldatud valemis 2.11. Tuleb välja, et mootori pöörete arv minutis peaks olema 57,3.

$$1 \text{ rad/s} = \frac{60}{2\pi} \text{ rpm} \quad (2.11)$$

Roboti parema juhtivuse tagamiseks ja tasakaalu säilitamiseks otsustatakse kasutada kahte mootorit, mis pannakse roboti ees- ja tagaosadesse. See tähendab, et pöördemoment ja võimsus tuleks jagada pooleks. Kuna roboti kontrollimiseks hakatakse kasutama Arduino Uno kontrollit, mille toitepinge on 7 – 12 V, siis selleks, et mitte kasutada mitut pingeastmet roboti toiteks, mootori toitepinge peaks jääma samasse vahemikku. Tabelis 2.2 on esitatud ühe mootori vajalikud parameetrid.

Tabel 2.2 Ühe mootori vajalike parameetrite väärtused

Mootori parameeter	Ühe mootori vajalik väärtus
Pöördemoment, Nm	0,485
Võimsus, W	2,91
Miimum pöörete arv minutis, rpm	57,3
Toitepinge, V	7 – 12

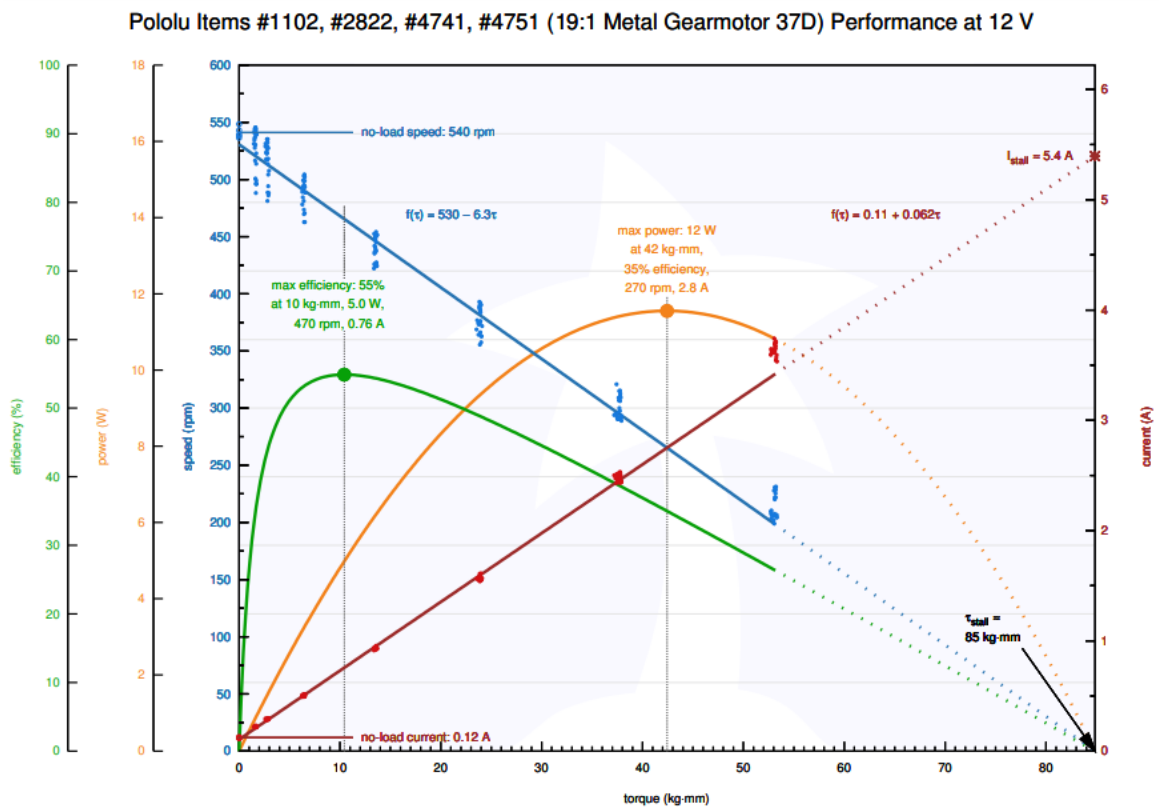
### 2.1.3 Mootori mudel

Kasutades tabelis 2.2 esitatud väärtusi ja teades, et mootori pikkus ei tohi ületada roboti laiust leitakse sobivamad harjastega alalisvoolumootori mudelid. Valituks osutus Pololu firma poolt valmistatav harjastega alalisvoolumootor 37D reduktorülekandega 19:1, mida saab näha joonisel 2.2.



Joonis 2.2 Pololu firma harjastega alalisvoolumootor 37D [12]

Mootori pikkus koos võlliga on kokku 79,2 mm, mis jääb nõutud piiridesse. Mootori kõige laiema osa diameeter on 38,8 mm ja võlli diameeter on 7,8 mm.



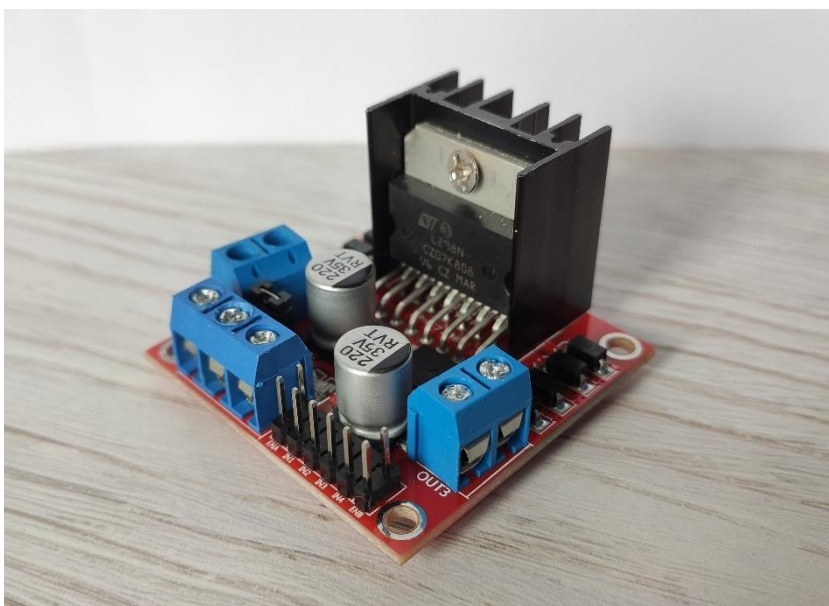
Joonis 2.3 Pololu harjastega alalisvoolumootori 37D reduktorülekanega 19:1 võimsuse, efektiivsuse, voolu ja kiiruse sõltuvus pöördemomendist

Mootori peamiste parameetrite graafik on esitatud joonisel 2.3. Graafikul pöördemomendi teljel kasutatakse ühikuna kg-mm, tabelis 2.2 on pöördemoment Nm ühikutes. Üks Nm on võrdne

101,97 kg·mm ning kasutades seda suhet saadakse vajalik pöördemoment, milleks on 49,46 kg·mm [13].

$$M = 0,485 \text{ Nm} \cdot 101,97 = 49,46 \text{ kg} \cdot \text{mm} \quad (2.12)$$

Vaadates joonisel 2.3 kujutatud graafikut on näha, et pöördemomendil 49,46 kg·mm on mootori kiirus umbes 225 rpm, efektiivsus 30%, vool 3,3 A ja võimsus 11 W. Mootori kiirus ja võimsus on suuremad arvutuslikest väärtustest, kuid neid on võimalik reguleerida mootoris antava pingega. Pinge juhtimiseks lisatakse elektriskeemi kahe alalisvoolumootori draiver L298N, mis on kujutatud joonisel 2.4. Draiver kasutab mootorite kiiruse kontrolliks PWM-i, mida saab kergesti kontrollida läbi Arduino kontrolleri.



Joonis 2.4 L298N kahe alalisvoolumootori draiver

## 2.2 Aku valik

### 2.2.1 Aku tüüpide ülevaade

Akumulaator on seade, mis on mõeldud energia salvestamiseks ning mida saab hiljem kasutada. Energia salvestatakse keemilisel kujul. Kaks metalli asuvad happelises lahuses, mis põhjustab keemilise reaktsiooni, mille tulemusel saadetakse elektrilist energiat. Akusid liigitatakse sõltuvalt sellest, milliseid metalle kasutatakse keemilisel reaktsioonil. On olemas palju erinevaid variante, kuid selle töö puhul vaadeldakse järgmisi populaarsemaid tüüpe: pliiaku (Pb), nikkel-kaadmiumaku (Ni-Cd), nikkel-metallhüdriidaku (Ni-Mh), liitiumioonaku (Li-Ion) ja liitiumpolümeeraku (Li-Po).

Pliiaku oli esimene taaslaetav aku. Nende akude üks peamine eelis on suhteliselt väike hind ühe W kohta võrreldes teiste aku tüüpidega, suur erivõimsus ning hea töötamine suurtel ja väikestel

temperatuuridel. Kuid sellel tüübil on olemas ka palju puudusi. Nendeks on halb kaalu ja energia suhe, aeglane laadimine, piiratud tsükli iga jt. [14].

Nikkel-kaadmiumaku, nagu on nimest aru saada, koosneb nikkelist ja kaadmiumist. Selliste akude peamine omadus on see, et need töötavad erinevatel ilmastikutingimustel. Selliseid akusid võib laadida isegi negatiivsetel temperatuuridel, mis tähendab, et need ideaalselt sobivad töötamiseks põhjapoolsetes piirkondades. Veel üks eelis on kiire laadimine ja suurem väljaantava voolu väärtus võrreldes teiste akutüüpidega. Kuid nikkel-kaadmiumakudel on olemas ka puudused. Akul on suhteliselt väike energiatihedus (aku mahtuvus võrreldes selle massiga) võrreldes teiste akutüüpidega. Sellistel akudel toimub ka isetühjenemine suhteliselt kiiresti [15].

Nikkel-metallhüdriidakud olid algselt välja mõeldud, et asendada nikkel-kaadmiumakusid. Võrreldes nendega on nikkel-metallhüdriidakudel 40% suurem energiatihedus, mis annab võimalust vähendada aku suurust ja massi, kuid saada sama palju energiat. Kuna nende valmistamisel ei kasutata kaadmiumi, mis on looduse jaoks mürgine, siis need akud on loodussõbralikumad. Nende akude puudusteks on väiksem kasutusiga, kiirem isetühjenemine võrreldes nikkel-kaadmiumakuga ning kallim hind [15].

1991. aastal turule ilmus liitiumioonaku, millele oli sisseehitatud süsteem pinge ja voolu kontrollimiseks töötamise ajal, mis tegi selliste akude kasutamise palju turvalisemaks. Nende akude eelisteks on suur energiatihedus (kaks korda suurem kui nikkel-kaadmiumakudel), aeglane isetühjenemine (5-10 % kuus), suur kasutusiga ja võimekus töötada ka külma ilmaga. Vaatamata kõikidele plussidele on nendel akudel üks peamine puudus – ajaga hakkavad nad kaotama mahtuvust ja seda sõltumata sellest, kas aku on pidevas kasutuses või riiuli peal seistes. Sellepärast ei sobi neid akusid kasutada kui lisaakusid või lihtsaks energia salvestamiseks hilisemaks ajaks. Samuti need akud on võrreldes teiste tüüpidega kallimad [15].

Liitiumpolümeerakud oma omadustega sarnanevad liitiumioonakudega, kuid on olemas mõned erinevused. Liitiumpolümeerakude optimaalne töö toimub plusstemperatuuridel. Teised omadused on samad: suur kasutusiga ja energiatihedus, aeglane isetühjenemine. Need aku tüübid on suhteliselt kallid ja nende ostmine on õigustatud siis, kui on vaja akut mingi kindla vormiga. Liitiumpolümeerakude valmistamise tehnoloogia lubab muuta nende vormi sõltuvalt etteantud mõõtmetest aku ruumi jaoks [15].

## **2.2.2 Aku tüüpi ja mahtuvuse valik**

Roboti jaoks aku tüübi valikul on vaja panna paika kriteeriumid, millele aku peaks vastama:

- aku peab toitma roboti tervet elektrisüsteemi;



- energiat peaks jätkuma vähemalt 10-20 minutiks roboti tööks;
- aku mõõtmed peaksid olema sellised, et see mahuks roboti sees asuvale ühele keskmisele plaadile;
- aku kaal peaks olema võimalikult väike, et mitte üle koormata mootorit;
- pinge peaks vastama mootori nimipingele või erineda sellest 1-2 V võrra;

Teades neid kriteeriume, on mõistlik valida liitium tüüpi aku, mis võimaldab saada rohkem energiat väiksema aku massiga. Kuna aku jaoks mõeldud ruumi mõõtmed võivad varieeruda ja standartsete mõõtmetega liitiumioonakud võivad mitte mahtuda, siis tuleks valida liitiumpolümeeraku, mida on olemas paljude erinevate mõõtmetega ning on suurem tõenäosus leida sobivaim mudel.

Mahtuvuse arvutamiseks on vaja teada kõikide elektrit vajavate komponentide tarbitava voolu väärtused.

Tabel 2.3 Roomikroboti elektriliste komponentide tarbitavad voolu keskmised ja maksimaal väärtused

Komponent	Keskmise tarbitava voolu väärtus	Maksimaalse tarbitava voolu väärtus
Alalisvoolumootor Pololu 19:1 Metal Gearmotor 37D, mA [12]	2800	5400
Mootorite draiver L289N, mA [16]	-	70
Kontroller Arduino Uno (ühe kanali kohta), mA [17]	-	40
Bluetooth moodul HC-06, mA [18]	8	40
Servomootor Micro Servo SG90, mA [19]	100	360

Kontrolleri kohta on teada voolu väärtus ainult ühe kanali kohta. Selleks, et saada teada kogu skeemi voolu tarbimist, on vaja korrutada need väärtused kasutatavate kanalite arvuga. Kontrolleris kasutatakse väljundina viit kanalit. Teades seda, on võimalik arvutada kogu skeemi tarbitava voolu maksimaalne väärtus.

$$I_k = 2 \cdot 5400 + 70 + 5 \cdot 40 + 40 + 360 = 11470 \text{ mA} \quad (2.13)$$

kus  $I_k$  – kogu süsteemitarbitav maksimaalne vool, mA.

Roboti mingi kindla aja töötamiseks vajaliku aku mahtuvuse arvutamiseks kasutatakse valemit 2.14.

$$C = I_k \cdot t \quad (2.14)$$

kus  $C$  – aku mahtuvus, mAh,

$t$  – roboti vajalik töötamise aeg, h.

Tuleb panna tähele, et kogu süsteemi tarbitav vool on maksimaalne väärtus, mida süsteem ei hakka kogu aeg tarbima. Seega on mõistlik mahtuvuse arvutamisel võtta kõige väiksem aeg, mille jooksul robot peab järjest töötama. Võttes ajaks 10 minutit ehk 1/6 tunnist saadakse aku mahtuvuseks 1911 mAh. See on aku mahtuvuse maksimaalne vajalik väärtus, kuid otsimisel on võimalik vaadata ka väiksemate mahtuvustega akusid. Peamine, et aku mahuks robotisse ja pinge oleks 12 V lähedal.

Akuna otsustati kasutada Turnigy nano-tech 1,3 akut, mille mahtuvus on 1300 mAh ja väljundpinge 11,1 V. Aku mõõtmed on piisavalt väiksed, et mahtuda robotisse. Akut illustreeriv pilt on toodud joonisel 2.5.



Joonis 2.5 Turnigy nano-tech 1,3 aku

### 3. PROTOTÜÜBI PROJEKTEERMINE JA EHTAMINE

Roboti detailide valmistamisel lähtutakse põhimõttest, et neid oleks võimalikult kiiresti valmistada ja kätte saada, et saaks kohe testida ja teha vajalikke muudatusi. Sellepärast valitakse 3D printimine, kuna sellega saab kiiresti nõutud mõõtmetega detailid valmis ning need on kohe kasutuskõlblikud.

Projekteerimist alustatakse roomikroboti 3D mudeli loomisega. Projekteerimiseks kasutatakse Solidworks 3D modelleerimise tarkvara. 3D mudel jagatakse viieks osaks, et seda oleks mugavam teha ja vaadelda. Need viis osa on:

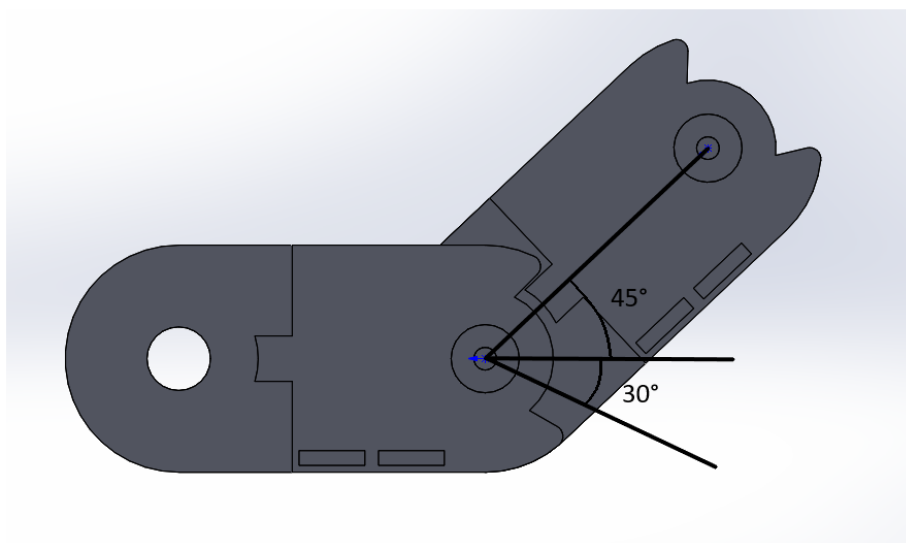
- keskosa – plaadid ja keti toed;
- esi- ja tagaosad – mootori ja lukustusmehhanismi täituri kinnitusplaadid;
- ülekandemehhanism – hammasrattad;
- kett;
- lukustusmehhanism – keti lülide lukud.

Antud töös vaadeldakse ainult lukustusmehhanismi ning ees- ja tagaosade projekteerimist.

#### 3.1 Lukustusmehhanismi kontseptsioon

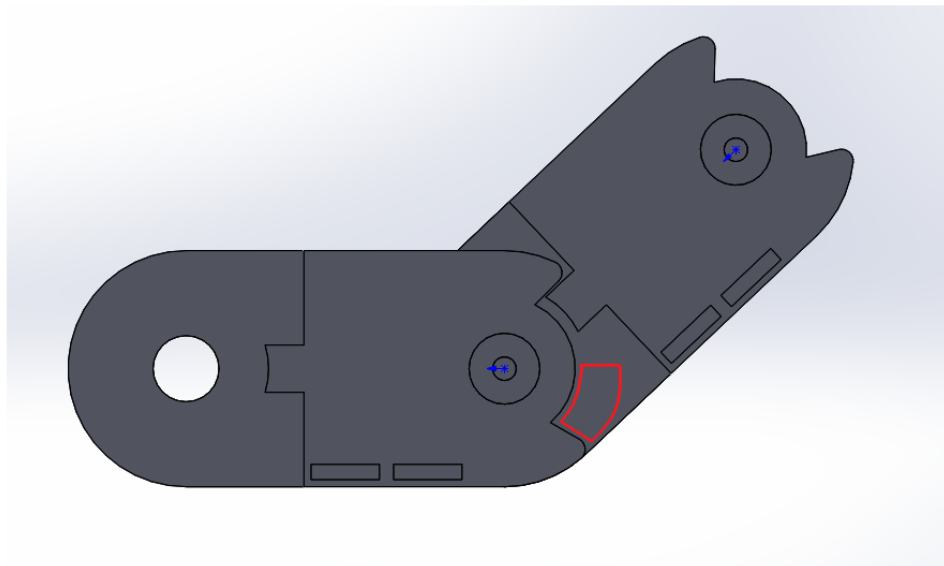
##### 3.1.1 Lukustusmehhanismi tööprintsip

Lukustusmehhanismi projekteerimisel lähtutakse keti lülide mõõtmetest ja ülesehitusest, mis on täpsemalt kirjeldatud Daniil Valme lõputöös „Painduva roomikroboti mehaanika- ning juhtimissüsteemi konstrueerimine“. Roomiku kett koosneb lülidest, mille külje osad saab näha joonisel 3.1. Lülid liiguvad kindlate nurkade vahel: 45° üles ja 30° alla.



Joonis 3.1 Keti kahe lüli 3D mudelite koost ja lülide vahelised liikumisnurgad

Sellise liikumise jaoks tehakse lüli ühte otsa nukk, mis hakkab peatama lüli liikumist ning teise otsa tehakse kindlate mõõtudega väljalõige, mille ulatuses järgmise lüli nukk saab liikuda. Selleks, et lülid hakkaksid peatuma teise nurga alt, on vaja vähendada väljalõike ala. Kõige lihtsaim meetod on panna väljalõikesse mingi takistus, mis ei lubaks nukil liikuda alla poole. Takistuse liigikaudne paigutusviis on kujutatud joonisel 3.2.



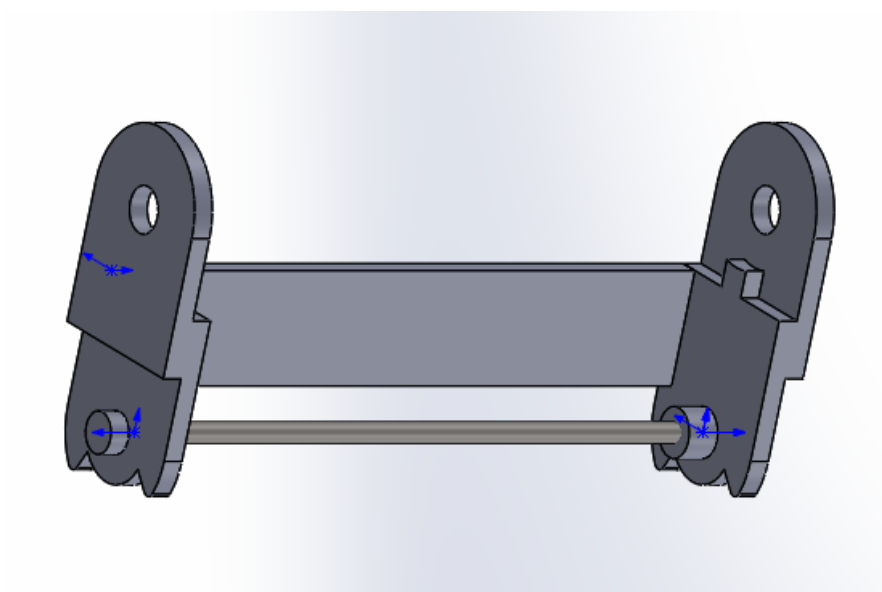
Joonis 3.2 Punasega on märgitud ala kuhu pannakse takistus, et vähendada lülide liikumise nurka. Roboti üles ronimiseks on vaja, et keti lülid oleksid omavahel blokeeritud mingi positiivse nurga alt maapinna suhtes. Kui on saavutatud vajalik nurk, peab robot sõitma otse. Et see ei hakkaks alla ronima, on vaja, et lülid lukustuksid omavahel nullise nurga alt. Seega tuleb välja, et minimaalne arv vajaminevaid lukkusi on kaks – positiivse ja nullise nurgaga.

Kuna keti üks lüli koosneb kahest samasugusest detailist, mis vastutavad lülide liikumisnurkade eest, siis kõige lihtsam viis on panna ühele poole lukk positiivse nurgaga ja teisele poole nullise nurgaga. Lukkude projekteerimiseks on vaja teada keti lülide mõõtmeid.

Lukustusmehhanismi jaoks on vaja peale lukkude projekteerida mingi seade, mis paneks lukud õigesse asendisse lülide vahele ja veel mingi mehhanism, mis vabastaks need. Kõige lihtsam viis on mehaaniliselt lükata ja vabastada, kuid samas on vaja, et seda protsessi saaks kuidagi kontrollida, et robot roniks õige nurga alt õigele kõrgusele. Sellise positsioneerimise jaoks on kõige mõistlikum kasutada mingit täiturit, milleks kõige paremini sobib servomootor, mis suudab kiiresti jõuda õigesse positsiooni.

### 3.1.2 Lukustusmehhanismi projekteerimine

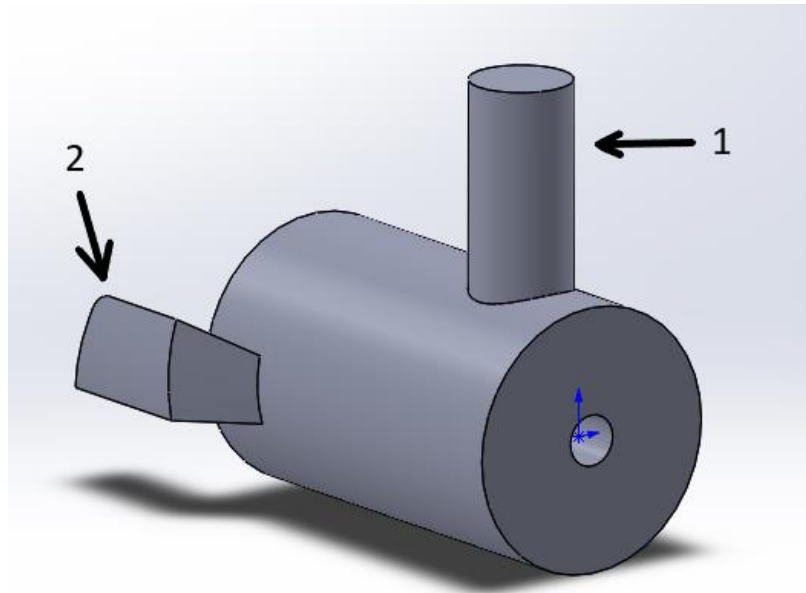
Kogu lukustusmehhanism koosneb viiest põhikomponendist: positiivse nurga lukk, nullise nurga lukk, lukkude blokeerija, servotäitur blokeerija juhtimiseks ja lukkude vabastav mehhanism. Lukkude projekteerimiseks on kasutatud keti lülide mõõtmed, mis on täpsemalt kirjeldatud Daniil Valme lõputöös „Painduva roomikroboti mehaanika- ning juhtimissüsteemi konstrueerimine“. Keti üks lüli koosneb neljast osast: lüli vasak pool, lüli parem pool, vaheplaat ja metallvarras. Ühe lüli koostu saab näha joonisel 3.3.



Joonis 3.3 Roomiku keti ühe lüli koost

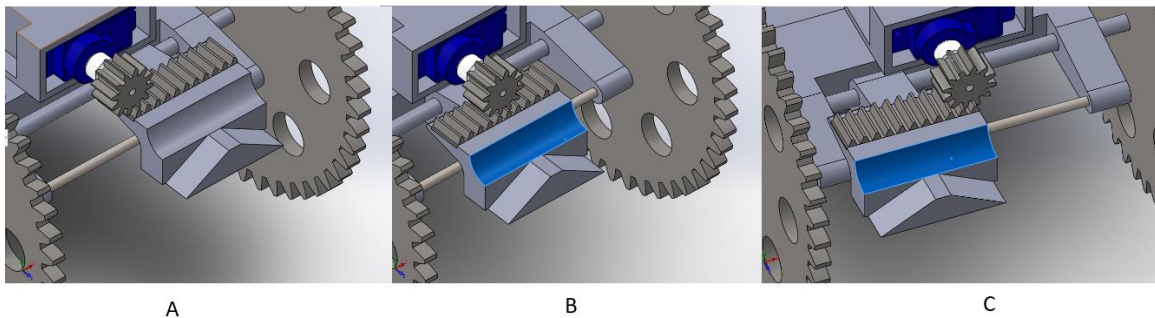
Keti lülide lukud hakkavad liikuma kahemillimeetrilisel metallvardal. See tähendab, et peaks toimuma lineaarne liikumine mööda metallvarda telge, et lukk saaks lukustada ja vabastada lülisid. Kuid kasutades ainult lineaarset liikumist mööda varda telge on vaja, et täitur, mis lukustab lukkusid, peab iga lüli jaoks liikuma alguses küljele, et lükata lukk õigesse asendisse ja jõudma algasendisse ehk metall varda keskkoha ja jõuda teha seda enne, kui järgmine lüli jõuab täituri kohale. Selline viis nõuab väga kiiret ja täpset täituri töötamist, mida on suhteliselt raske teostada, kuid see tähendaks lihtsat lukkude ülesehitust.

Lugesdes Tai Kiclassi ja David Zarrouki poolt kirjutatud artiklit roomikroboti kohta otsustati projekteerida sarnane mehhanism lukkude liikumise jaoks [1]. Lisaks lineaarsele liikumisele lisatakse ka pöördliikumine mööda varda telge. Kuna eesosas keti liikumine toimub ülevalt alla, siis seda liikumist on võimalik kasutada lukkude liigutamiseks. Selleks lisatakse lukule joonisel 3.4 kujutatud ora number ühe all. Ora on suunatud roboti sisse ja kui see sõidab millegi vastu, toimub pöördliikumine ümber metallvarda telje.

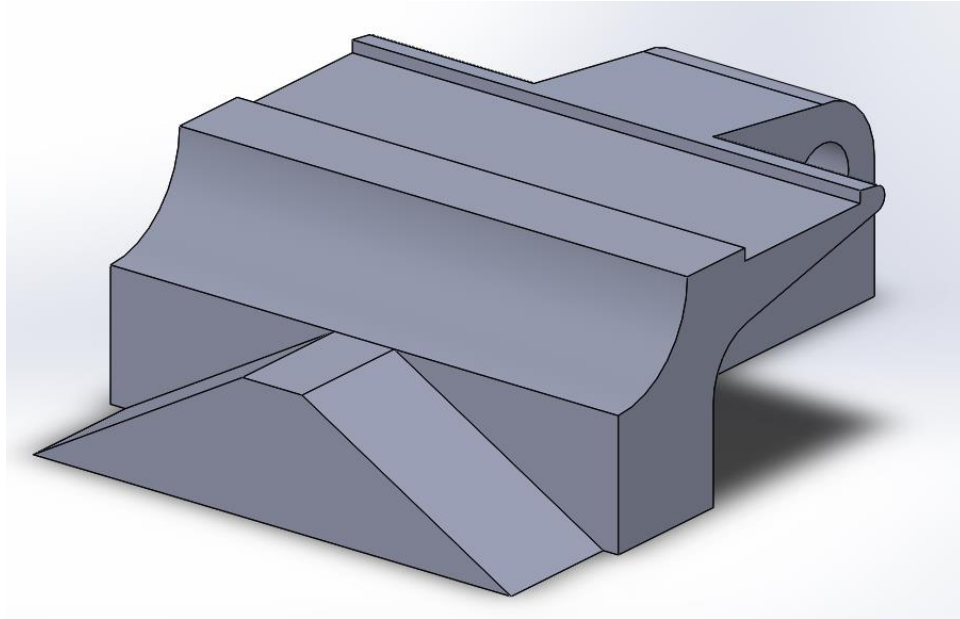


Joonis 3.4 15° positiivse nurgaga lülide lukkustav lukk, kus on kujutatud 1 - pöörlemiseks tehtud ora, 2 - takisti, mis piirab lülide liikumis nurga 45° kraadi võrra

Lukkude blokeerija on pind mille vastu lukkude orad hakkavad vastu sõitma. See paikneb kahel vardal (hammasrattade varras ja blokeerija stabiliseerimiseks lisa varras), mille telgede mööda blokeerija saab liikuda lülide ühest otsast teise. Joonisel 3.5 on kujutatud blokeerija kolmes asendis. Liikumine ühest asendist teise toimub läbi servotäituri ja hammasrattade ülekannet, mis muudab pöörd liikumist lineaarseks.



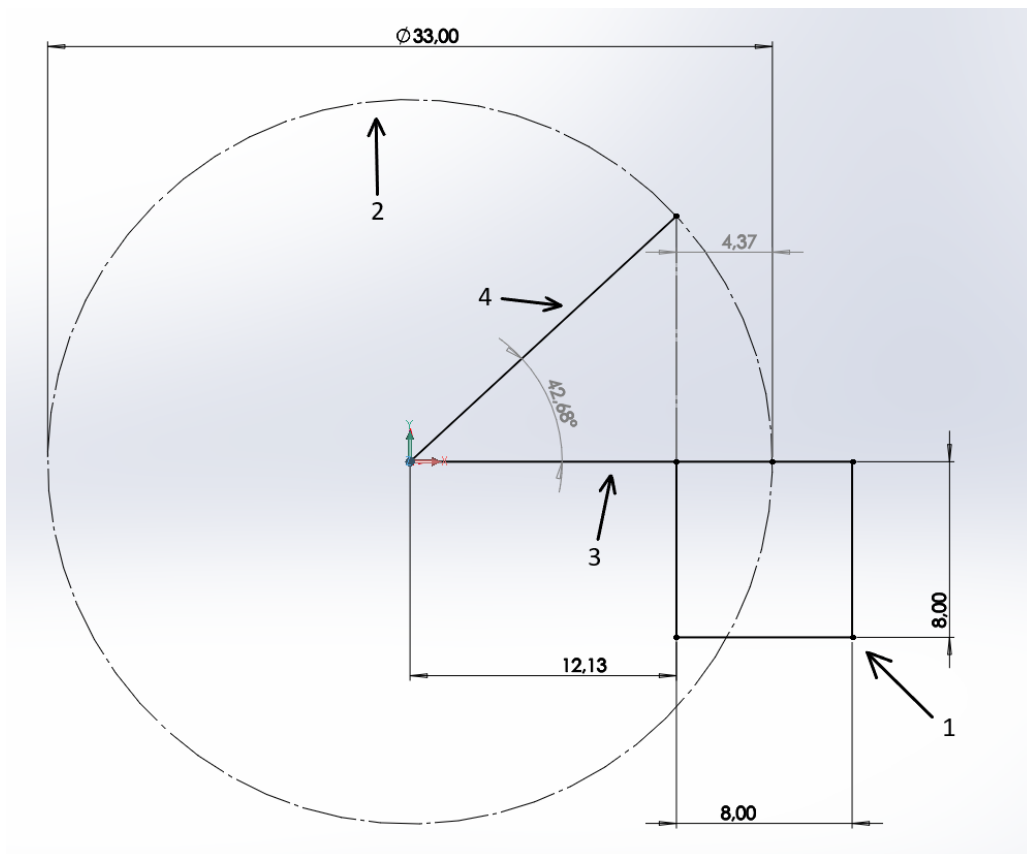
Joonis 3.5 Lukkude blokeerija kolmes asendis: A - blokeeritakse lülid 15° nurkaga; B - vaba asend; C - blokeeritakse lülid 0° nurkaga



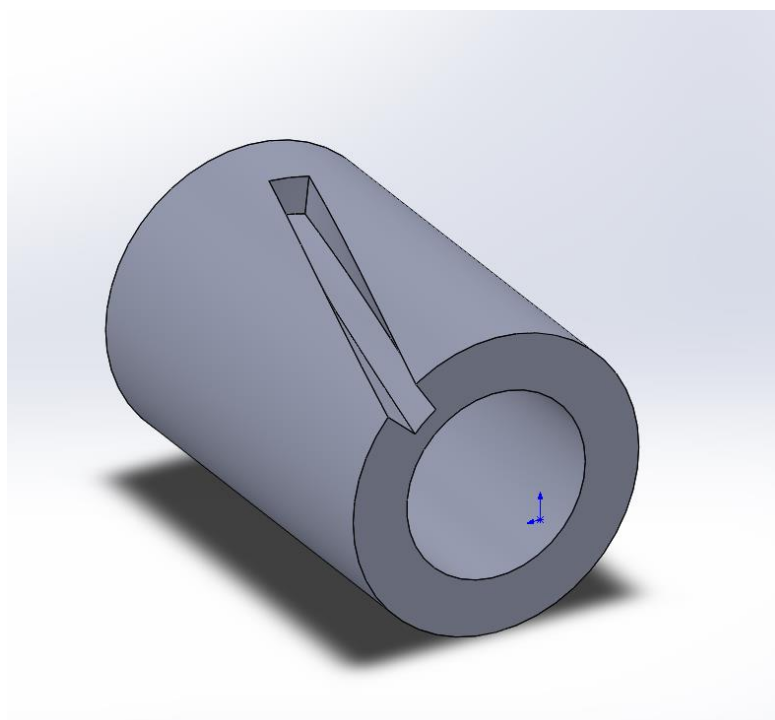
Joonis 3.6 Lukkude blokeerija 3D mudel

Luku ora sõidab vastu blokeerija trapetsikujulist osa, mis on tehtud selliselt, et lukkude lineaarliikumine mööda metallvarast toimuks mitte järsult, vaid sujuvalt. Samas kui kasutada ainult lukku ja blokeerijat, lineaarset liikumist ei toimu. Lukk hakkab pöörlema ainult ümber oma telje. Selleks, et lisada ka lineaarne liikumine, tehakse juurde nuut, mille mööda lukk hakkab liikuma. Nuudi projekteerimiseks on vaja teada, kui palju lukk peab liikuma küljele ja millise nurga võrra see pöörleb, kui läheb vastu blokeerijat.

Luku pöörlemisnurga arvutamiseks on vaja teada ora kaugust luku teljest blokeerijani. Ora ja blokeerija kokku puutuva pinna pikkus määrab, millise nurga võrra liigub lukk ümber telje. Joonisel 3.7 on kujutatud ora telje positsioonid enne ja pärast pöördliikumist ja pöördenurk, milleks on  $42,68^\circ$ . Teades pöördenurka ja valides lineaarse liikumise pikkuseks 10 mm, on võimalik projekteerida nuut, mille mööda lukk hakkab liikuma. Nuudi 3D mudel on kujutatud joonisel 3.8. Lisaks sellele on luku sisse tehtud väike ora, mis on kujutatud joonisel 3.9, mis läheb nuudi sisse ja hakkab juhtima luku liikumist.

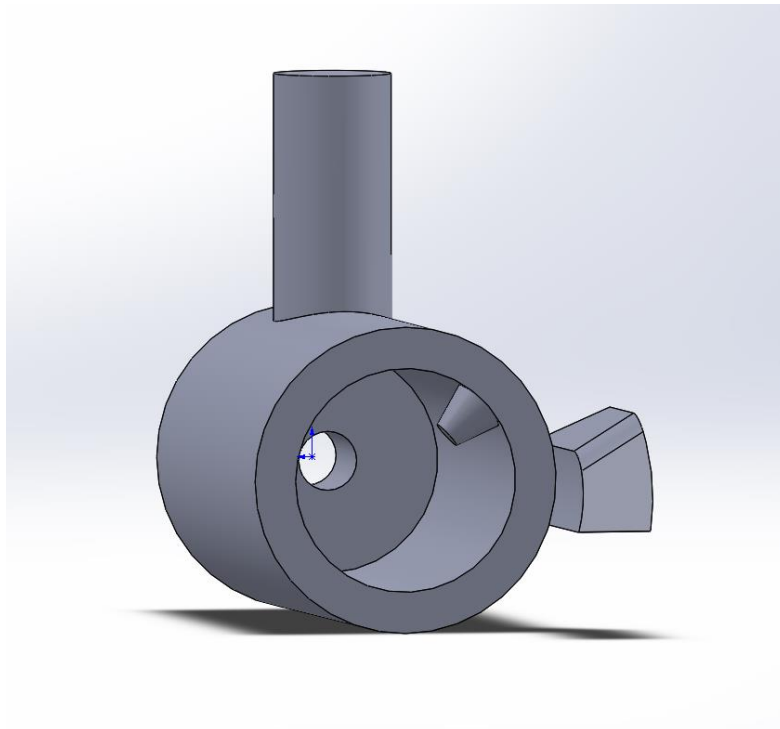


Joonis 3.7 Luku pöörlemisnurga arvutamiseks kasutatud skeem, kus 1 - on blokeerija trapetsikujulise osa külgsaade; 2 - luku ora pöörlemistelg; 3 - luku ora telje positsioon enne pöördliikumist; 4 - luku ora telje positsioon peale pöördliikumist



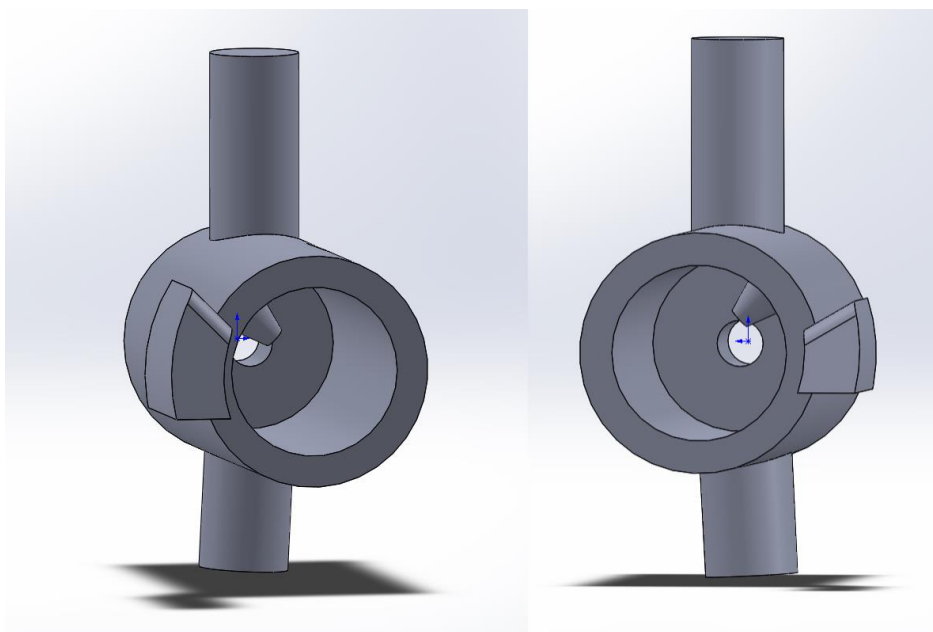
Joonis 3.8 Nuudi 3D mudel, mis juhhib luku liikumist





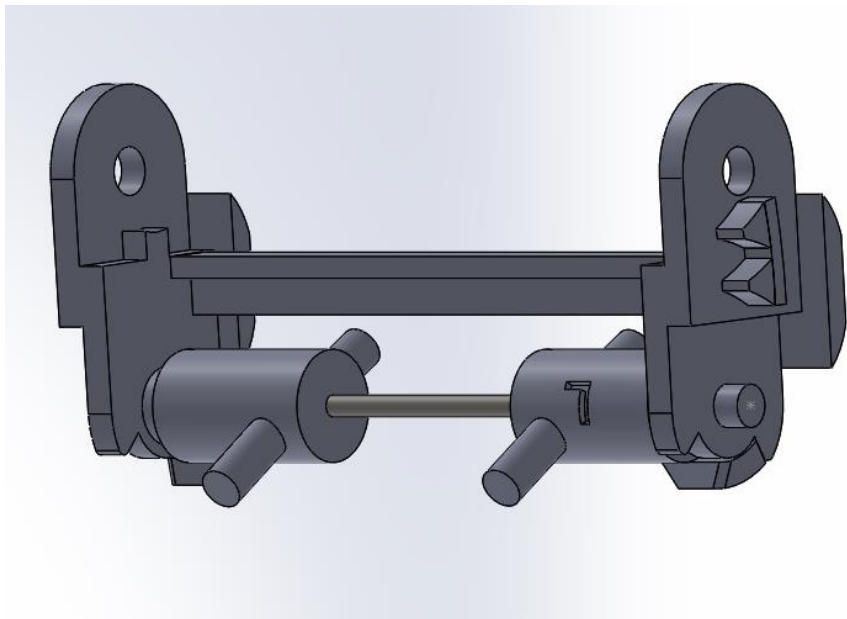
Joonis 3.9 Ketilülilukk, mille sisse on liikumise juhtimiseks mööda nuuti lisatud ora

Vabastusmehhanismi jaoks lisatakse lukule lisaora, mille kaudu toimub blokeerimisel tehtav liikumine, kuid vastassuunas. Kuna vabastada tuleb kõik blokeeritud lülid, siis ei ole mõtet lisada mingisugust täiturvabastusmehhanismi. Piisab sellest, kui roboti tagaossa paigutatakse takistus, mille vastu sõites lukk liiguks roboti keskele ja vabastaks lülid. Luku lõplik 3D mudel koos vabastusoraga on kujutatud joonisel 3.10.



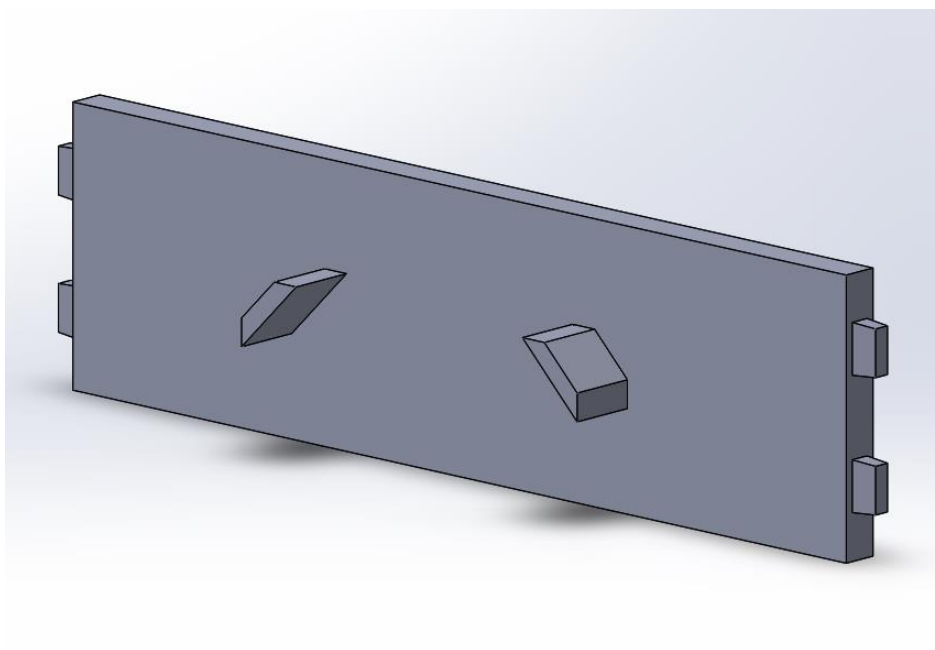
Joonis 3.10 Lukkude 3D mudel, vasakul - 15° nurga alt blokeeriv lukk, mis paikneb keti vasakul pool; paremal - 0° nurga alt blokeeriv lukk, mis asub keti paremal pool

Vabastusora projekteerimisel muudetakse ka lülide disaini, et orad ei puudutaks maapinda. Lõplik lülide disain koos lukkudega on kujutatud joonisel 3.11.



Joonis 3.11 Ketti lüli koost koos lülide lukkudega

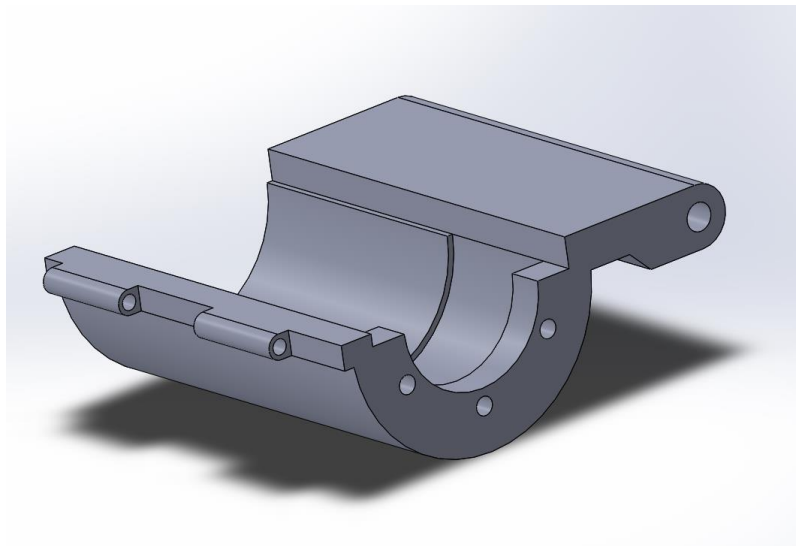
Vabastamise jaoks tehakse plaat, mis kinnitub roboti taha ja millele projekteeritakse kaks nukki, mis hakkavad lükkama blokeeritud lukke keskele, vabastades sellega keti lülid. Vabastamise plaadi 3D mudel on kujutatud joonisel 3.12.



Joonis 3.12 Lukkude vabastamise plaat

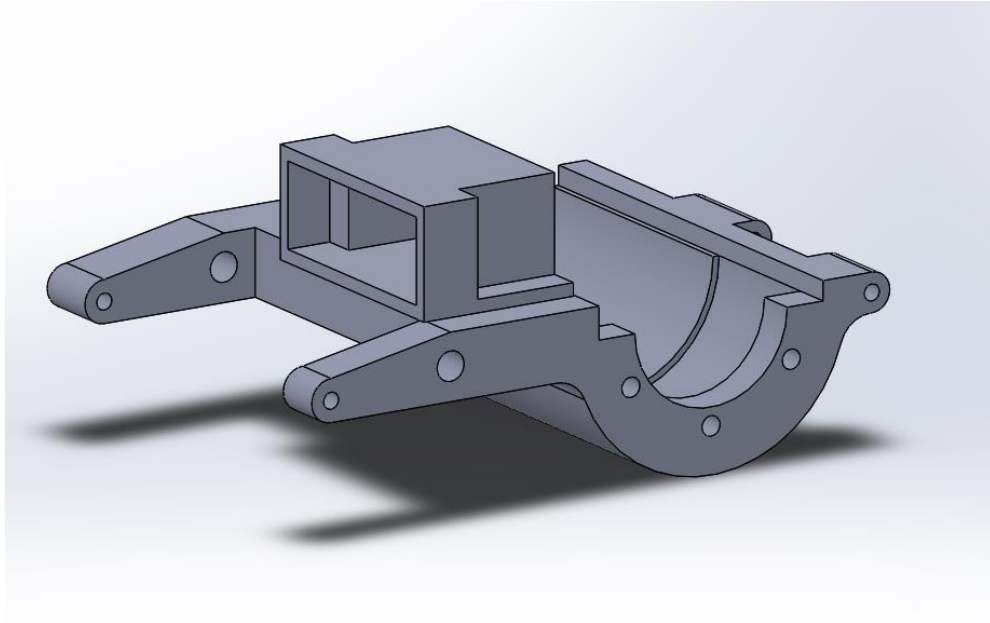
## 3.2 Ees- ja tagaosa projekteerimine

Ees- ja tagaosa on detailid, mis hakkavad hoidma hammasrattaid õigetel positsioonidel ning nendele paigutatakse mootorid ja täitur lukustusmehhanismi jaoks. Nende projekteerimiseks võetakse mootori 3D mudel [20]. Kasutades seda ja ülekandemehhanismi mõõtmeid, mille täpsed mõõtmed on kirjeldatud Daniil Valme lõputöös „Painduva roomikroboti mehaanika- ning juhtimissüsteemi konstrueerimine“, tehakse valmis plaat, kuhu on võimalik paigutada nii mootor kui ka hammasratasest võll. Tagumise osa 3D mudel on kujutatud joonisel 3.2.1.



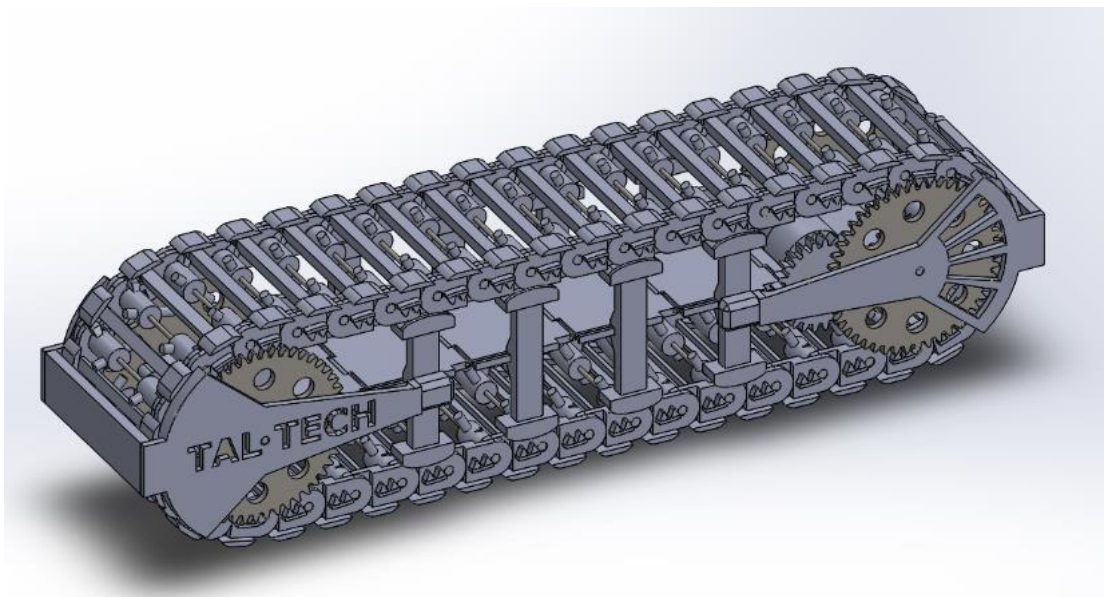
Joonis 3.13 Tagumise mootori ja hammasratta hoidev plaat

Esiosa plaat on samasuguse ülesehitusega, kuid sellele on lisatud augud servotäituri korpuse kinnitamiseks. Servo korpuse projekteerimiseks võetakse 3D mudel, mille järgi on lihtne teha vajalikke mõõtmetega detail [21]. Servo korpuse paigutamise üks peamine kriteerium on, et servotäituri hammasratas asuks roboti keskel, sest see mõjutab lukustusmehhanismi tööd. Joonisel 3.14 on kujutatud esiosa plaat koos servotäituri korpusega.



Joonis 3.14 Esimootori, hammasrataste ja servotäituri hoidev plaat

Kõik 3D mudelid lisatakse ühte peamisse roboti koostu, mis on kujutatud joonisel 3.15.



Joonis 3.15 Kogu roboti 3D mudel

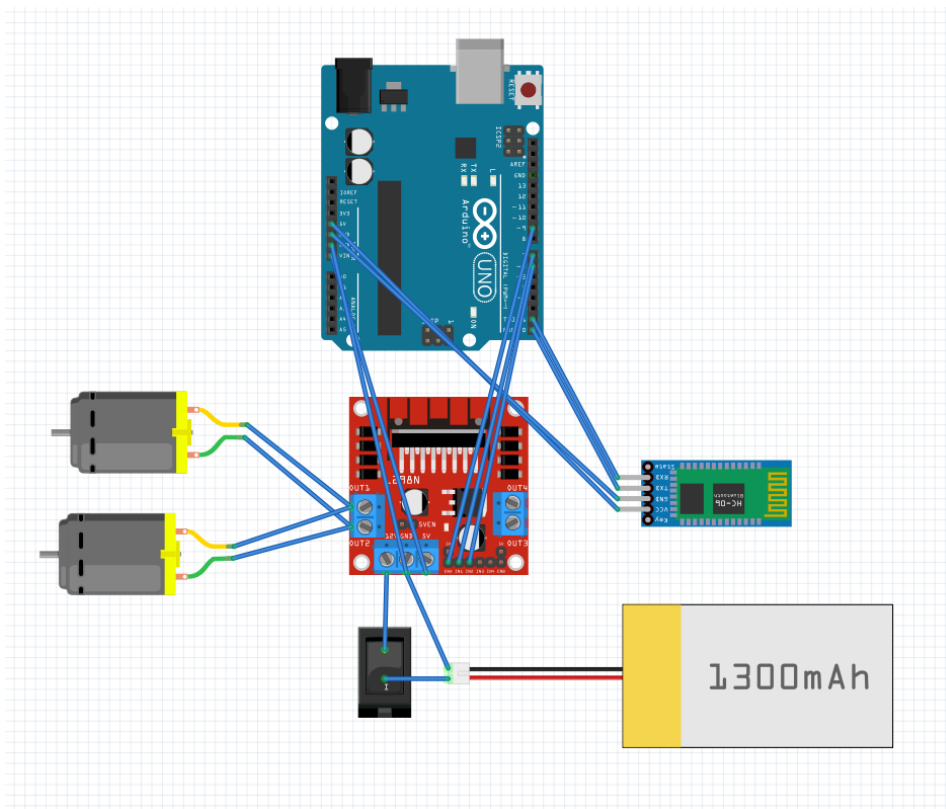
### 3.3 Elektriskeem

Daniil Valme lõputöös „Painduva roomikroboti mehaanika- ning juhtimissüsteemi konstrueerimine“ on kirjeldatud roboti kontrolleri ja juhtimismooduli valiku kohta. Nendeks osutuksid Arduino Uno kontrollerkaks ja Bluetooth moodul HC-06 juhtimiseks. Täielik elektriskeem koosneb järgmistest komponentidest:

- Arduino Uno;

- kaks harjastega Pololu alalisvoolumootori;
- kahe alalisvoolumootori L298N draiver;
- Li-Po aku 1300 mAh;
- lüliti;
- Bluetooth moodul.

Mootorite esimesel ühendamisel L298N draiveriga erinevatele väljunditele tekkis mootorite asünkroonne pöörlemine, mis omakorda häiris roboti normaalset liikumist. Kuna peamised mootorid peavad alati töötama sünkroonis ja ei tohi tekkida sellist olukorda, kus üks mootor pöörleb ühes suunas ja teine teises, otsustati ühendada mootorite juhtmed ühete klemmide külge, et vältida lisaandurite lisamist mootorite sünkroonse töö jälgimiseks. Kuid antud lahendus ei ole kõige parem, kuna vähendab ühte mootorisse antava voolu maksimaalset väärtust ning tulevikus tuleks leida parem lahendus. Kogu elektriskeemi ühendusi illustreeriv pilt on kujutatud joonisel 3.16 ja elektriskeem on toodud Lisas 1. Elektriskeemi loomise jaoks kasutati tarkvara Fritzing.

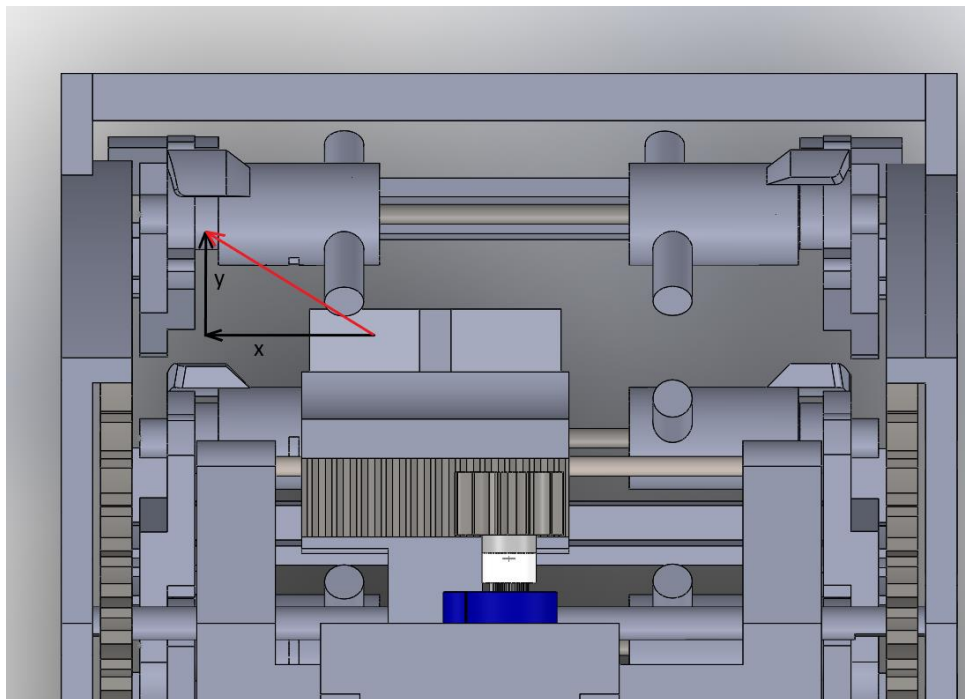


Joonis 3.16 Elektriskeemi ühendused kontrolleri, draiveri, kahe mootori, juhtimismooduli, aku ja lüliti vahel

## 4. LUKUSTUSMEHHANISMI TESTIMINE

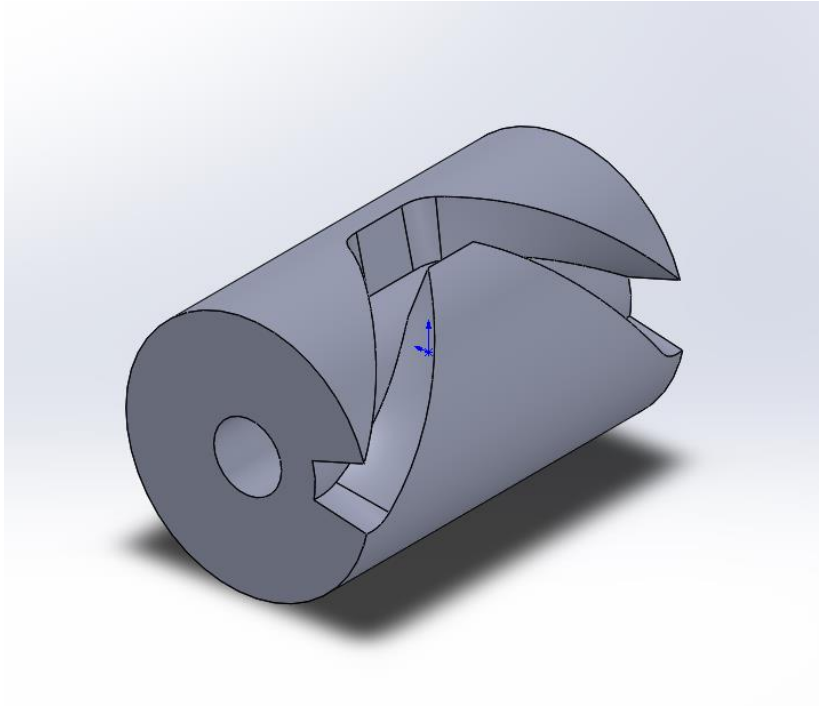
Peale detailide projekteerimist alustatakse lahenduste testimisega. Testimiseks prinditakse osa detailidest välja ja vaadeldakse, kuidas nad liiguvad omavahel ning mida tuleks parandada. Lukustusmehhanismi katsetamise ajal oli peamiseks suureks tekkinud probleemiks nuudi vale projekteerimine. Selle tõttu lukk ei liikunud küljele, vaid jäi seisma.

Nuudi trajektoori on määratud sirgjoonelise liikumisega mööda x- ja y-telge. Kuna liikumist põhjustav jõud on suunatud ainult y-telje suhtes, siis selleks, et lukk hakkaks liikuma ka x-telje suhtes, on vaja, et liikumise pikkus mööda x- telge oleks sama pikk või väiksem kui liikumise pikkus mööda y-telje. X- ja y-telgede paiknemine luku suhtes on näidatud joonisel 4.1.



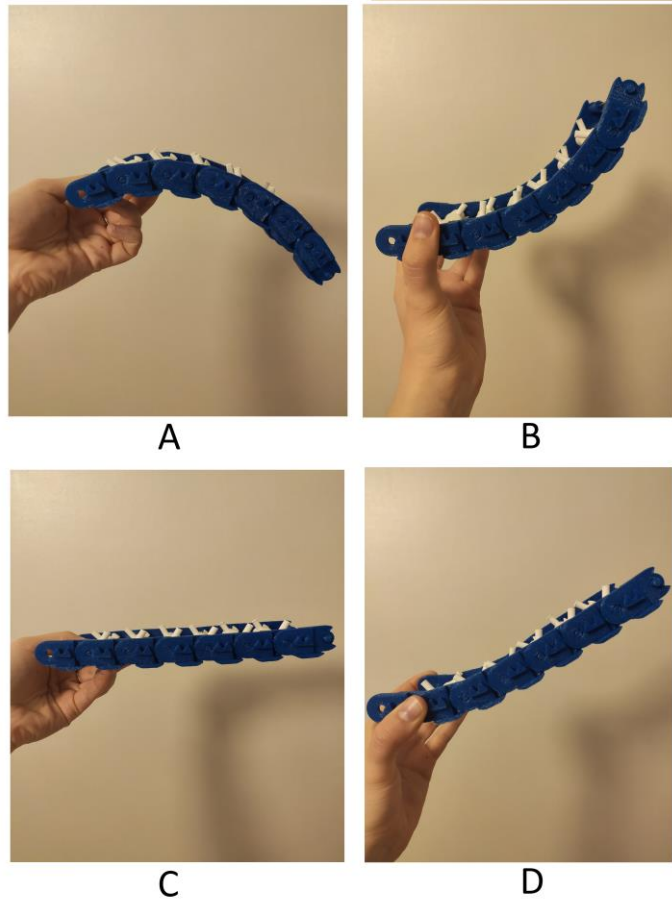
Joonis 4.1 Roomikrobotti esiosa ülaltvaade koos luku liikumise telgedega

Muutes nuudi trajektoori ja printides selle välja uueks testimiseks saadakse valmis nuut, mis paigutab luku nõutud asendisse. Samuti lisatakse lisanuut, et lukk jääks paigale ja ei liiguks valesse kohta. Nuudi lõplik 3D mudel on kujutatud joonisel 4.2.



Joonis 4.2 Nuut luku liikumise juhtimiseks

Peale kõikide detailide kontrollimist prinditakse kuueks keti lüliks vajalikud lukud, et kontrollida nende tööd päris keti peal ja vaadata, kui hästi need hoiavad vajalikku nurka. Testimise tulemused on kujutatud joonisel 4.3.



Joonis 4.3 Keti lülid erinevates blokeeritud asendites: A - kõik lülid on vabas asendis; B - kõik kuus lüli on blokeeritud 15° nurga alt; C - kõik kuues lüli on blokeeritud 0° nurga alt; D - esimesed kolm lüli on blokeeritud 15° nurga alt ja järgmised kolm - 0° nurga alt



## 5. PROJEKTEERIMISE JÄRGMISED ETAPID JA TULEVIKU PLAANID

Järgmise etapina hakatakse testima lukustusmehhanismi roomikroboti peal, et saada aru, kuidas selline süsteem peaks toimima koostöös roomiku liikumisega ning kuidas oleks võimalik juhtida roomiku ronimise nurka. Peamised probleemid, mis võivad juhtuda lukustusmehhanismi testimisel, on lukustusnurga täpne kontroll. Selle lahendamiseks tuleb võib-olla lisada andurid keti täpse positsiooni jälgimiseks.

Samuti hakatakse uurima roomiku liikumise dünaamikat ja jõudude jaotamist liikumise erinevatel variantidel, et saada teada, millised detailid on kõige rohkem koormatud. Selline analüüs annab hea ülevaate, milliseid detaile on vaja muuta ja teha tugevamaks ja milliseid võib teha natukene väiksemateks, et vähendada kogu konstruktsiooni massi ja säästa materjali.

Kindlasti tuleks arendada ka elektriskeemi, kuna praegu selle tööd ei ole võimalik kuidagi jälgida ja juhtida, peale mootorite kiiruse ja suuna reguleerimise. Võib-olla järgmiste mudelite jaoks, kus mootorite positsioon on väga tähtis, oleks mõistlikum kasutada samm-mootoreid, kuid enne sellist valikut on vaja teha laiem uuring.

Tulevikus plaanitakse antud süsteemi edasi arendada. Peamiseks arenguplaaniks on lisada roomikrobotile pööramise võimalus. Samuti planeeritakse lisada andurid, et robot saaks aru, mis tema ees toimub ja saaks ise otsustada kas ronida üles või mööda maapinda. Kuna roomik on mõeldud ronimiseks väliskeskkonnas, siis oleks tarvis teha see ka vee- ja tolmukindlaks. Kuid kõik need plaanid saab teostada, kui platvormi peamised eesmärgid on täidetud ja kontrollitud.

Kokkuvõttes võib öelda, et arengupotentsiaal on antud platvormil suur ja on lai valik, millele võiks keskenduda.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaaurusetöö käigus projekteeriti üks osa roomikroboti platvormist ning lülide lukustusmehhanism, mis annaks roomikule võime ronida üles ja ületada takistusi. Antud töö puhul peamisteks ülesanneteks olid sobivaima mootori ja aku valik ning elektrilise skeemi kokku panek roboti juhtimiseks. Samuti üks peamine eesmärk oli projekteerida lukustusmehhanismi kontseptsioon ning testida selle tööd reaalses maailmas.

Enne roboti projekteerimise alustamist tehti taustauuring, et saada teada millised lahendused on juba olemas ning mis on iga lahenduse eelised ja puudused. Lähtudes sellest pandi paika prototüübi ehituse kontseptsioon ja optimaalsed mõõtmed, millesse robot peaks jääma.

Järgmise etapina arvutati mootori ja aku vajalikud parameetrid ning nendest lähtudes valiti kaks harjastega alalisvoolumootorit roboti veojõuks ja 1300 mAh Li-Po aku roboti toiteks. Lisaks kahele mootorile valiti ka L298N kahe alalisvoolumootori draiver mootori kiiruste kontrolliks. Peale esmast elektriskeemi kokkupanemist tekkis probleem sellega, et mootorid pöörlesid asünkroonselt. Selle probleemi lahendamiseks otsustati ühendada mõlemad mootorid draiveri samadele klemmidele.

Peale komponentide valikut hakati projekteerima roomikroboti 3D mudelit. Ees- ja tagaosa projekteeriti nii, et nendele oleks võimalik kinnitada mootorid ning esiosale tuli paigutada lisaks servotäitur lukustusmehhanismi jaoks. Projekteerimise kõige keerulisem osa on lukustusmehhanism, mille liikumise trajektoori arvutamine tekitas kõige rohkem probleeme. Selle projekteerimisel tehti palju katsetusi, mille käigus prinditi mitu erinevat mudelit ja vaadati mehhanismi tööd ning mida tuleks teistmoodi teha.

Kokkuvõttes lukustusmehhanism koosneb kuuest erinevast osast: lukk 15° nurga blokeerimiseks, lukk 0° nurga blokeerimiseks, lukkude blokeerija, lukkude vabastaja, nuut lukkude täpseks liigutamiseks, servotäitur blokeerija täpseks positsioneerimiseks. Printides kõik detailid välja ja katsetades manuaalselt nende liikumist, liikusid kõik osad õigestesse positsioonidesse. Lukustusmehhanismi automaatset tööd plaanitakse katsetada tulevikus kuna see võib nõuda lisa-aega ja -ressursse (näiteks lisaandureid keti täpseks positsioneerimiseks).

Töö käigus tekkis palju erinevaid probleeme projekteerimise etapil. Kõige suurema mõjuga probleemid olid mootorite asünkroonne töö, mis võis põhjustada roboti liikumise häirimist ning lukustusmehhanismi lukkude valedesse positsioonidesse liikumine. Kuid kõik probleemid said lahendatud ja töö eesmärgid said saavutatud.

## SUMMARY

In the course of this bachelor's thesis, a crawler robot platform and a link locking mechanism were designed, which would allow the crawler to climb up and overcome obstacles. The main tasks in this work were to select the most suitable motor and battery and to assemble the electrical circuit for controlling the robot. Also, one of the main goals was to design the concept of the locking mechanism and test its operation in the real world.

Before starting to design the robot, a background study was conducted to find out what solutions already exist and what are the advantages and disadvantages of each solution, and based on this, was designed concept of prototype construction and the optimal dimensions into which the robot should remain.

As a next step, the required motor and battery parameters were calculated, and based on these, two bristle DC motors were selected for the robot's traction and 1300 mAh Li-Po for the battery of the robot. In addition to the two motors, a driver for the L298N's two DC motors was also selected to control the motors speeds. After the initial assembly of the circuit, the problem was that the motors rotated asynchronously. To solve this problem, it was decided to connect both motors to the same pins of the driver.

In addition to component selections, a 3D model of a crawler robot was designed. The front and rear parts were designed so that motors could be attached to them, and in addition to the front part, a servo actuator had to be placed for the locking mechanism. The most complex part of the design is the locking mechanism, especially the calculation of the locker trajectory, which caused the most problems. It was designed with many experiments, in which several different models were printed, and the operation of the mechanism was reviewed and changed.

In summary, the locking mechanism consists of six different parts: a locker for blocking a  $15^\circ$  angle, a locker for blocking a  $0^\circ$  angle, a locker blocker, a locker release, a nut for precise movement of the locks, a servo actuator for precise positioning of the blocker. By printing out all the details and manually testing their movement, all the parts moved to the right positions. It is planned to test the automatic operation of the locking mechanism in the future as it may require additional time and resources (for example, additional sensors for precise positioning of the chain).

During the work, many different problems arose during the design phase. The most influential problems were the asynchronous operation of the motors, which could cause the robot to interfere with movement and the locks of the locking mechanism to move to the wrong positions. However, all problems were solved, and the goals of the work were achieved.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] T. Kislassi ja D. Zarrouk, „A Minimally Actuated Reconfigurable Continuous Track Robot,“ 02 04 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8930917>. [Kasutatud 27 04 2020].
- [2] J. Y. Wong, „Dynamics of Tracked Vehicles,“ 27 07 2007. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00423119708969354>. [Kasutatud 15 05 2020].
- [3] Robotpark Academy, „Tracked robots,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.robotpark.com/academy/all-types-of-robots/wheeled-robots/tracked-robots/>. [Kasutatud 15 05 2020].
- [4] G.-P. J. H. K. K.-J. C. C.-N. C. Yoo-Seok Kim, „Wheel Transformer: A Wheel-Leg Hybrid Robot,“ 6 12 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6963486&tag=1>. [Kasutatud 15 05 2020].
- [5] P. L. L. H. Jean-Luc Paillat, „Variable Geometry Tracked Vehicle (VGTV),“ 01 2008. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.researchgate.net/publication/228895920\\_Variable\\_Geometry\\_Tracked\\_Vehicle\\_VGTV\\_prototype\\_conception\\_capability\\_and\\_problems](https://www.researchgate.net/publication/228895920_Variable_Geometry_Tracked_Vehicle_VGTV_prototype_conception_capability_and_problems). [Kasutatud 15 05 2020].
- [6] A. K. Kuno Janson, „Elektrimasinate alused,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digar.ee/arhiiv/nlib-digar:326260>. [Kasutatud 25 04 2020].
- [7] S. B. Niku, „Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications,“ 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://books.google.ee/books?id=2V4aGvIGt7IC&pg=PR6-IA1&hl=ru&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=3#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ee/books?id=2V4aGvIGt7IC&pg=PR6-IA1&hl=ru&source=gbs_selected_pages&cad=3#v=onepage&q&f=false). [Kasutatud 25 04 2020].
- [8] Microchip Technology Inc., „Brushed DC motor fundamentals,“ 2004. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://fritzing.org/media/fritzing-repo/projects/c/cmn-fan-control/other\\_files/Brushed%20DC%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://fritzing.org/media/fritzing-repo/projects/c/cmn-fan-control/other_files/Brushed%20DC%20Motor%20Fundamentals.pdf). [Kasutatud 06 05 2020].

- [9] Microchip Technology Inc., „Brushless DC (BLDC) motor fundamentals,“ 2003. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC\)%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf). [Kasutatud 06 05 2020].
- [10] E. P. H. H. V. B. Eduard Brindfeldt, Täiturid tööstusautomaatikas, Tallinn, 2011.
- [11] Füüsika õpik, „Erinevate materjalide hõõrdetegureid: tabel,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/1302>. [Kasutatud 28 04 2020].
- [12] Pololu Corporation, „37D Metal Gearmotors,“ 09 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.pololu.com/file/0J1706/pololu-37d-metal-garmotors.pdf>. [Kasutatud 06 05 2020].
- [13] ConvertUnits, „Unit converter,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.convertunits.com/from/N-m/to/kg-m>. [Kasutatud 07 05 2020].
- [14] Battery University, „How does the Lead Acid Battery Work?,“ 30 05 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://batteryuniversity.com/learn/article/lead\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries). [Kasutatud 04 05 2020].
- [15] A. П. Кашкаров, „Аккумуляторы. Справочник,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://books.google.ee/books/about/%D0%90%D0%BA%D0%BA%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B\\_%D0%A1%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D1%87.html?id=d3TDDgAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ee/books/about/%D0%90%D0%BA%D0%BA%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B_%D0%A1%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D1%87.html?id=d3TDDgAAQBAJ&redir_esc=y). [Kasutatud 04 05 2020].
- [16] STMicroelectronics, „L298 Datasheet,“ 01 2000. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298\\_H\\_Bridge.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf). [Kasutatud 07 05 2020].
- [17] Components 101, „Arduino Uno,“ 28 02 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://components101.com/microcontrollers/arduino-uno>. [Kasutatud 07 05 2020].
- [18] Techtutorialsx, „Arduino Bluetooth with HC-06,“ 02 01 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://techtutorialsx.com/2016/01/02/arduino-bluetooth-with-hc-06/>. [Kasutatud 08 05 2020].
- [19] Protosupplies, „Servo Motor Micro SG90,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://protosupplies.com/product/servo-motor-micro-sg90/>. [Kasutatud 14 05 2020].

- [20] P. Kallas, „Pololu 37Dx52L mm with 64 CPR Encoder,“ 03 06 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://grabcad.com/library/pololu-37dx52l-mm-with-64-cpr-encoder>. [Kasutatud 27 04 2020].
- [21] M. Frasson, „SG90 - Micro Servo 9g - Tower Pro,“ 11 11 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://grabcad.com/library/sg90-micro-servo-9g-tower-pro-1>. [Kasutatud 27 04 2020].

