

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**KERAKUJULISE RATTA MEHCHANISMI
KONTSEPTSIOONI VÄLJATÖÖTAMINE**

**DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF A SPHERICAL
WHEEL MECHANISM**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Daniil Dudenkov

Üliõpilaskood: 186026EAAB

Juhendaja: Viktor Rjabtšikov,
Doktorant-Nooremteadur

Anton Rassõlkin,
Professor

Tallinn 2021

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 /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (autori nimi)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

_____ ,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

_____ ,

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Daniil Dudenkov

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Kerakujulise ratta mehhanismi kontseptsiooni väljatöötamine

Kuupäev:
18.05.2021

62 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Doktorant-Nooremteadur Viktor Rjabtšikov, Professor Anton Rassõlkin

Sisu kirjeldus:

Uurimistöö keskendub kerakujulise ratta mehhanismile, mis võimaldab liikumist mitmes suunas. Kuigi liikumiseks on võimalik kasutada tavaratast, vajavad mõned kasutusala, näiteks laotöö, siiski suurt manööverdamisvõimalust. Töö peamine eesmärk on uurida erinevaid kasutusel olevaid mehhanisme mitmesuunalise liikumise jaoks ja teha kindlaks nende eelised ning puudused. Lisaks sellele projekteeriti prototüüp vastavalt teoreetilisele taustale ja arvutustele ning viidi läbi test, mis näitab antud mehhanismi rakendatavust praktikas.

Märksõnad: kerakujuline ratas, Omni ratas, prototüüp, mitmesuunaline liikumine, bakalaureusetöö

ABSTRACT

Author: Daniil Dudenkov

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Development of the concept of a spherical wheel mechanism

Date: 18.05.2021

62 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Early Stage Researcher Viktor Rjabtšikov, Professor Anton Rassõlkin

Abstract:

Research focuses on the spherical wheel mechanism, which allows movement in several directions. Although it is possible to use a common wheel to move, some applications require great maneuverability, such as warehousing. The main aim of the study is to examine the different mechanisms in use for multi-directional movements and to identify their advantages and disadvantages. In addition, the prototype has been designed according to theoretical background and calculations, and tests have been performed to demonstrate the applicability of this mechanism in practice.

Keywords: spherical wheel, Omni wheel, prototype, omni motion, bachelor thesis

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Kerakujulise ratta mehhanismi kontseptsiooni väljatöötamine**

Lõputöö teema inglise keeles: **Development of the concept of a spherical wheel mechanism**

Üliõpilane: **Daniil Dudenkov, 186026**

Eriala: **EAAB**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Viktor Rjabtšikov**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Anton Rassõlkin**
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **Kevad 2021**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2021**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektritranspordi valdkond areneb praegu väga kiiresti. Kasutusel on erinevad komponendid ja nende paigutamiskiisid. Üks arengusuund on kerakujuline ratas, mis annab uue võimaluse transpordi kontrollimiseks. See transpordivahend suudab manööverdada vähese ruumiga ja kiiremini, mis annab suure eelise näiteks laotöös või tavalise auto kasutamises. Teema aktuaalsust rõhutavad sellised kontseptsioonid nagu Audi RSQ ja The Goodyear Eagle-360, kus kasutatakse kerakujulist ratas.

2. Töö eesmärk

Eesmärk on välja selgitada kerakujulise ratta tööpõhimõte ning võrrelda tänapäeval kasutusel olevaid kerakujulise ratta mehhanisme, samuti uurida kerakujulise ratta eeliseid ja puudus. Selleks tuleb luua prototüüpi, kus kasutatakse kerakujulise ratta mehhanismi. Lõputöö sisaldab erinevate mehhanismide võrdlust mitmesuunalises liikumises, projekteeritud mehhanismi arvutusi ning testimistulemuste analüüsi. Töö tulemusena pakutakse välja kerakujulise ratta kontseptsioon, mida on võimalik kasutada erinevates keskkondades ja eesmärkidel kohtades, kus tavalise rattaga töötamine pole nii tõhus.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kuidas töötavad erinevad kerakujulise ratta mehhanismid?
2. Mis on kõige tõhusam mehhanism loodud kerakujulise ratta mehhanismidest?
3. Kuidas lahendada probleemi, kus kerakujulised rattad libisevad kontaktpinna üle?
4. Millised eelised ja puudused on pakutud kerakujulise ratta mehhanismil?
5. Millised võiksid olla pakutud mehhanismi kasutusala?

4. Lähteandmed

Andmed sarnastel teemadel koostatud raamatutest, teadusartiklitest ja uurimustöödest.

5. Uurimismeetodid

Probleemi uurimiseks kasutati erinevaid tänapäeval rakendatavaid kontseptsioone, teadusartikleid ja raamatuid, mis on seotud sõidukitega. Vajalikud arvutused teostati kasutatud matemaatilise tarkvara ja vajadusel koostati ka teoreetiline mudel. Pakutud kontseptsiooni eeliste ja puuduste väljaselgitamiseks kasutati prototüüpi.

6. Graafiline osa

1. Mehhanismi joonis
2. Elektriskeemi joonis
3. Programmi algoritmi plokk skeem

7. Töö struktuur

1. Teooria
2. Mehhanismide ja sfääride modelleerimine ja uurimine
3. Kataloogi komponentide võrdlus
4. 3D-modelleerimine
5. Füüsilise objekti koostamine (*Proof of concept*)
6. Elektroonika
7. Programmeerimine
8. Veaparandused

8. Kasutatud kirjanduse allikad

[1] P. S. Goohpattader, S. Mettu, and M. K. Chaudhury, "Rolling motion of a rigid sphere on a structured rubber substrate aided by a random noise and an external bias," 2011, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1108.0915>.

[2] C. W. Wu, K. S. Huang, and C. K. Hwang, "A novel spherical wheel driven by chains with guiding wheels," Proc. 2009 Int. Conf. Mach. Learn. Cybern., vol. 6, no. July, pp. 3242–3245, 2009, doi: 10.1109/ICMLC.2009.5212737.

[3] C. W. Wu, Z. W. Qiu, Y. H. Wang, P. H. Hsu, and C. K. Hwang, "Modeling of a spherical robot driven by Omni wheels," Proc. - Int. Conf. Mach. Learn. Cybern., vol. 3, pp. 1256–1260, 2011, doi: 10.1109/ICMLC.2011.6016887.

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

Kuupäev	Töö etapid
25.12.20	Teoreetilise osa kirjutamine
31.12.20	Teoreetilise osa saatmine juhendajale esimeseks lugemiseks
15.01.21	Prototüübi modelleerimine
12.02.21	Komponentide analüüs ja loetelu
26.02.21	3D-modelleerimine ja printimine
01.03.21	Teoreetilise osa saatmine juhendajale teiseks lugemiseks
19.03.21	Elektroonikat koostamine
01.04.21	Esimese mustandi saatmine juhendajale
16.04.21	Programmeerimine
30.04.21	Vigade parandamine
10.05.21	Viimase lõputöö mustandi esitamine juhendajale

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	12
Lühendite ja tähiste loetelu	13
SISSEJUHATUS	15
1. MEHHAANISMIDE UURIMINE MITMESUUNALISEKS LIIKUMISEKS	16
1.1 Probleemi kirjeldus	16
1.2 Alternatiivid probleemi lahendamiseks	17
1.2.1 Omni ratas	17
1.2.2 Kerakujuline ratas	18
1.3 Ülevaade kerakujulise ratta mehhanismist	19
1.3.1 Omni ratastega ülekandemehhanism kerakujulise ratta jaoks	19
1.3.2 Omni roomiku ülekandemehhanism kerakujulise ratta jaoks	21
1.3.3 Omni kera	22
1.4 Mitmesuunalise liikumise mehhanismide võrdlus	23
1.5 Kokkuvõte	25
2. PROTOTÜÜBI PROJEKTEERIMINE	26
2.1 Ülekandemehhanismi ülevaade	26
2.2 Ülekandemehhanismi arvutused	27
2.3 Komponentide valik	32
2.4 Mehhanismi detailide kirjeldus	33
2.5 Mehhanismi 3D-mudeli töökindluse simulatsioon	36
2.6 Elektrilise osa kirjeldus	38
2.7 Juhtimisalgoritmi kirjeldus	40
2.8 Prototüübi väljatöötamine	43
2.9 Kokkuvõte	47
3. PROTOTÜÜBI TESTIMINE	48
3.1 Tekkinud probleemide kirjeldus ja nende lahendamine	48
3.2 Testimismetoodika kirjeldus	49
3.3 Tulemuste analüüsimine	50
3.4 Kerakujulise ratta mehhanismi eelised ja puudused	52
3.5 Kokkuvõte	52
KOKKUVÕTE	54
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	55

LISAD	57
Lisa 1 Kasutatud tabelid	58
Lisa 2 Komponentide pildid	59
Lisa 3 Programmikood.....	61

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema pakkus autor ise välja, sest tahtis teha midagi uut ja põnevat. Autor valis just selle teema, sest kõnealust valdkonda on halvasti uuritud ning ta sai koostada nii teoreetilise kui ka praktilise osa, mis aitas omandada uusi oskusi. Lõputöö tegi autor ise ning kasutas selleks oma ressursse. Lõputöö tulemus on loodud prototüübina füüsiliselt nähtav.

Autor tänab oma juhendajat Viktor Rjabtšikovi konsulteerimise ja kulutatud aja eest ning loodab, et lõputöö aitab kedagi, kes arendab seda valdkonda.

Võtmesõnad: kerakujuline ratas, Omni ratas, prototüüp, mitmesuunaline liikumine, bakalaureusetöö

Lühendite ja tähiste loetelu

ABS	Akrüülnitriilbutadieenstüreen (<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>)
C_{sf}	hõõrdetegur
d	ratta läbimõõt
ENA	luba mootorit A (<i>Enable motor A</i>)
ENB	luba mootorit B (<i>Enable motor B</i>)
F_a	kiirendusjõud
F_h	hõõrdejõud
F_{max}	lõpliku kiiruse saavutamiseks vajalik jõud
f	hõõrdetegur
GR	ronimiseks vajalik jõud (<i>Grade resistance</i>)
g	raskuskiirendus
L	liikumishälve
\bar{L}	aritmeetiline keskmine liikumishälve
L_{max}	maksimaalne liikumishälve
L_{min}	minimaalne liikumishälve
MTT	suurim veduki pöördemoment (<i>Maximum tractive torque</i>)
m	keha mass
N	normaalreaktsioon
\vec{N}	normaalreaktsiooni jõuvektor
n	katsete arv
n	pöörlemiskiirus
PC/ABS	Polükarbonaat / akrüülnitriilbutadieenstüreen (<i>Polycarbonate / Acrylonitrile butadiene styrene</i>)
RF	takistustegur (<i>Rresistance factor</i>)
RPM	pööret minutis (<i>Revolutions per minute</i>)
RR	veretakistuse ületamiseks vajalik jõud (<i>Rolling resistance</i>)
R_w	veoratta raadius
RX	vastuvõtja (<i>Receiver</i>)
t_a	maksimaalse kiiruse saavutamiseks aeg
TTE	kogu veojõud (<i>Total tractive effort</i>)
T_w	ratta pöördemoment
TX	saatja (<i>Transmitter</i>)
UART	Universaalne asünkroonne andmeedastus (<i>Universal asynchronous receiver-transmitter</i>)
$u(L)$	liikumishälbe keskmine hajuvus
ul	mõõtmeheta ühikud (<i>Unitless</i>)

V_{\max}	maksimaalne kiirus
W_{GV}	sõiduki täismass
W_w	rakendatud kaal veorattal
α	maksimaalne kaldenurk
θ	nurk Omni-ratta ja z-telje vahel
μ_s	staatiline hõõrdetegur ratta ja maa vahel
π	Archimedese konstant

SISSEJUHATUS

Maapinnal liikumiseks on loodud mitmeid mehhanisme, kus kasutatakse ratta vertikaaltelje pöörlemist külgliikumiseks. Kuid on olukordi, kus selline lahendus ei ole väga praktiline, kuna esiteks võib keskkond olla piiratud manööverdamisruumiga ja teiseks on aeg oluline ressurss.

Kerakujuline ratas on üldlahendus mitmesuunaliseks liikumiseks, sest kera võimaldab pöörata igas suunas. Aga sellise lahenduse jaoks tuleb selgeks teha, kuidas energiat tõhusalt kerakujulisele rattale üle kanda. Samuti tuleb uurida, kuidas vältida üleliigset hõõrdumist kerakujulise ratta mehhanismis ning libisemist kerakujulise ratta ja maapinna vahel.

Lõputöö on jagatud teoreetiliseks osaks ja praktiliseks osaks, kus uuriti ja projekteeriti kerakujulise ratta mehhanism.

Teoreetilises osas selgitati välja kerakujulise ratta mehhanismi tööpõhimõtte ning uuriti ja võrreldi tänapäeval kasutusel olevaid kerakujulise ratta mehhanisme teadusartiklite ja muude usaldusväärsete allikate abil.

Praktilises osas uuriti ja loodi tõhus mehhanism kerakujulise ratta jaoks. Leiti vastus küsimustele, kuidas vältida soovimatut hõõrdumist kerakujulise ratta mehhanismis ning kuidas ära hoida libisemist kerakujulise ratta ja maapinna vahel. Uurimuse jaoks projekteeriti prototüüp, mis aitas täiustada mehhanismi ning selgitada välja sellise kerakujulise mehhanismi eelised ja puudused. Tuginedes juba teadolevatele kerakujulise ratta mehhanismi eelistele ja puudustele, määrati selle mehhanismi kasutusala.

Lõputöö eesmärk on luua kerakujulise ratta mehhanismi kontseptsioon, mis võimaldab lisada sõidukile mitmes suunas liikumise võimet. Eesmärgi saavutamiseks tuleb projekteerida prototüüp, mis näitab selle mehhanismi võimalust, sh eeliseid ja puudusi.

Lõputöö tulemusena pakutakse välja kerakujulise ratta kontseptsioon, mida on võimalik kasutada erinevates valdkondades. Näidisenä esitatakse prototüüp koos loodud mehhanismiga, mis näitab selle mehhanismi kasutamise võimalusi, eeliseid ja puudusi.

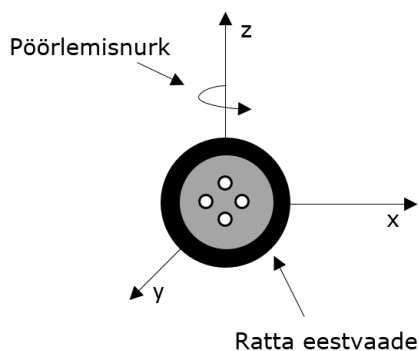
1. MEHCHANISMIDE UURIMINE

MITMESUUNALISEKS LIIKUMISEKS

Selles peatükis käsitletakse mitmesuunalise liikumise mehhanisme ja kirjeldatakse nende kasutusala. Lõpuks võrreldakse, milline on optimaalne variant, ja selle baasil töötatakse välja kontseptsioon.

1.1 Probleemi kirjeldus

Tänapäeval kasutatakse laialt tavapärast ratast maa peal liikumiseks. Ratas on selleks universaalne lahendus, sest tal on hea hinna ja tõhususe suhe. Aga tavarattal on üks puudus – ta ei suuda liikuda külgsuunas. Selle probleemi lahendamiseks kasutatakse ratta pööramist ümber Z-telje (vt joonis 1.1), mis võtab aega ning nõuab lisaruumi ja -energiat ehk tõhusus ja töökiirus langevad.

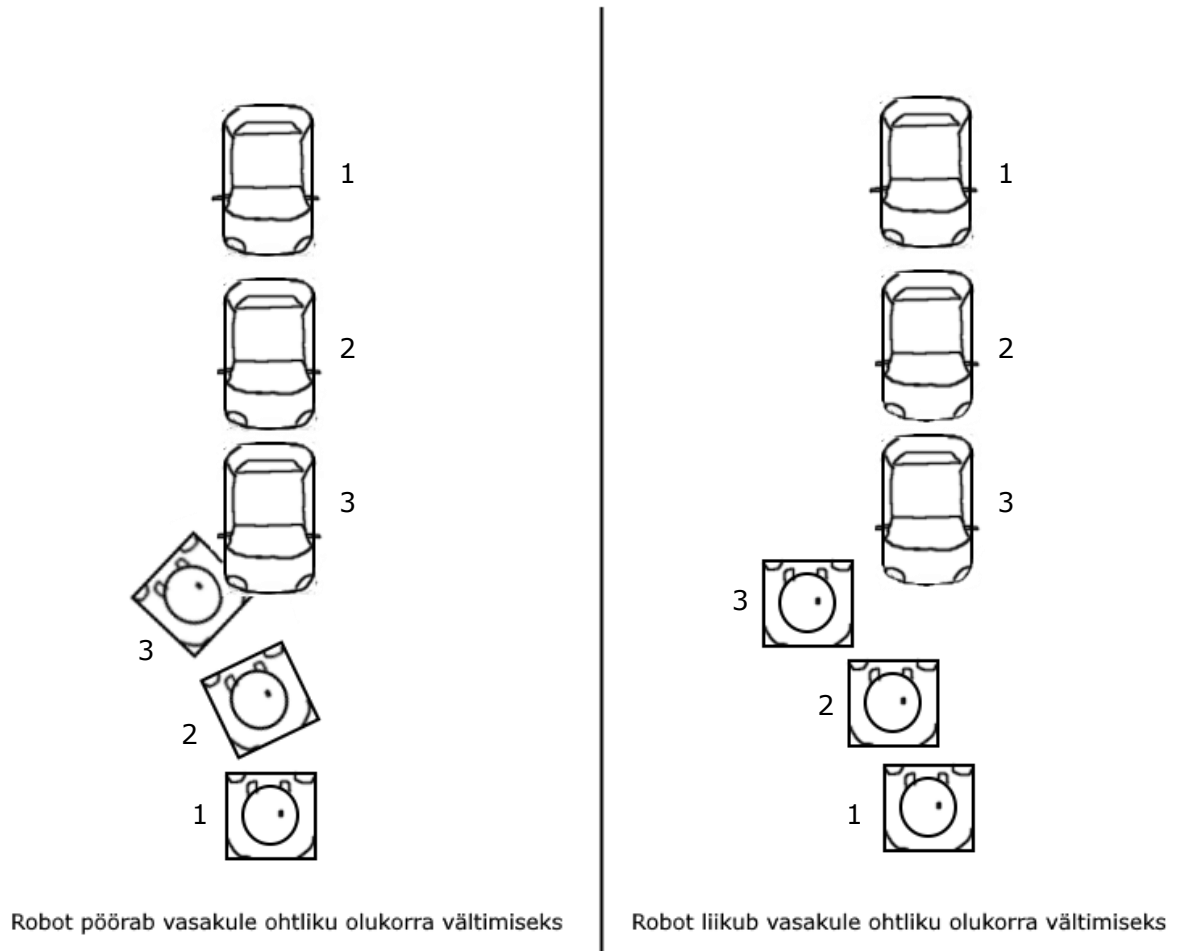


Joonis 1.1 Ratta pööramine ümber Z-telje

Väike ruumivajadus manööverdusel ja töö kiirus annavad suure eelise näiteks laotöös, kus ei ole palju ruumi sõiduki pööramiseks ja tegemist on palju, sest aeg on piiratud. Kuna sõiduk manööverdab ilma pöördeta, säästab see aega ega nõua nii palju ruumi.

Teine näide on erinevad maapinnal manööverdavad liikumisrobotid. Kui mingi takistus (näiteks auto) liigub roboti suunas, siis mõnikord robot ei jõua vältida ohtlikku olukorda, kuna mõlemad objektid liiguvad teineteise poole. Kui robot saab liikuda külgsuunas ilma

pöördeta, annab see võimaluse kokkupõrke vältimiseks. Näide sellisest olukorrast on toodud joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Erinevad viisid kokkupõrget vältida, kus objekti asukoht muutub sammude 1–3 jooksul

1.2 Alternatiivid probleemi lahendamiseks

1.2.1 Omni ratas

Tänapäeval kasutatakse sellist lahendust nagu Omni ratas. Omni ratta näidis on toodud joonisel 1.3.



Joonis 1.3 Omni ratta näidis [1]

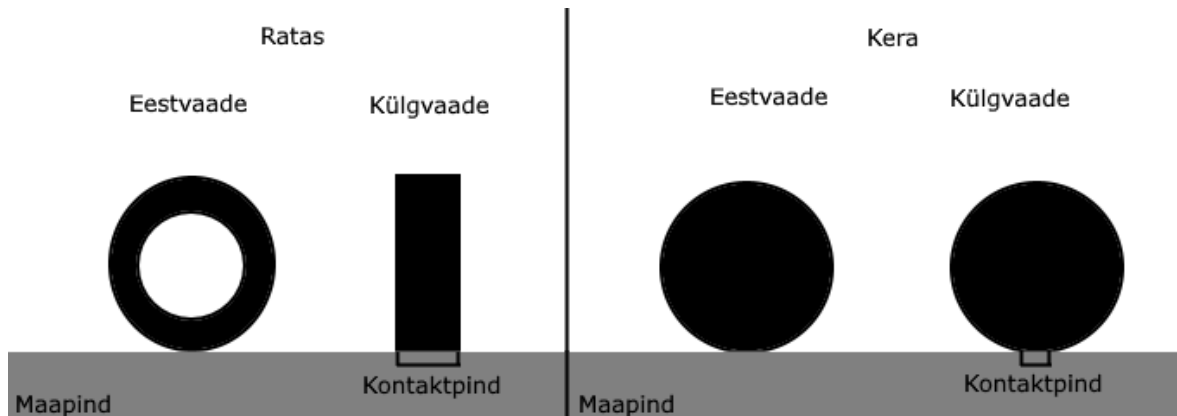
Omni ratas on ratas, mille übermõõdul on väikesed kettad risti pöörlemissuunaga. Eelis on selles, et Omni ratas libiseb külgsuunas väga lihtsalt.

Tavaliselt on mitme Omni rattaga robotil üks suur puudus – liikuma paneva jõu madal kasutegur. Kui robot kasutab kolme Omni ratast, mis moodustavad kolmnurga, siis saab ta kasutada ainult poolt liikuma panevast jõust. Sel juhul on efektiivsus madal, kuna liikuma panev jõud tühistatakse rataste paigutamise tõttu. Nelja Omni rattaga roboti puhul võivad tekkida talitlushäired, kuna üks neist neljast rattast hakkab libisema kontaktpinna ebatasasuse tõttu [1].

Omni rattal on keeruline ülesehitus, kuna see koosneb mitmest detailist. Nende detailide materjalide valikule on kõrged nõudmised, kuna detailidele rakendatakse suurt koormust. Näiteks väike plastmassist ketas ei talu suurt koormust, kuna detailid lähevad katki (rääkimata sellest, kui peaks toimuma kokkupõrge).

1.2.2 Kerakujuline ratas

Teine lahendus on kerakujuline ratas, mis suudab liikuda mitmes suunas ning millel on väiksem kontaktpind ratta ja maapinna vahel tavapärase rattaga võrreldes ehk väiksem vastujõud tänu hõõrdejõu vähenemisele. Ratta ja kera kontaktpindade võrdluse tulemus on toodud joonisel 1.4.



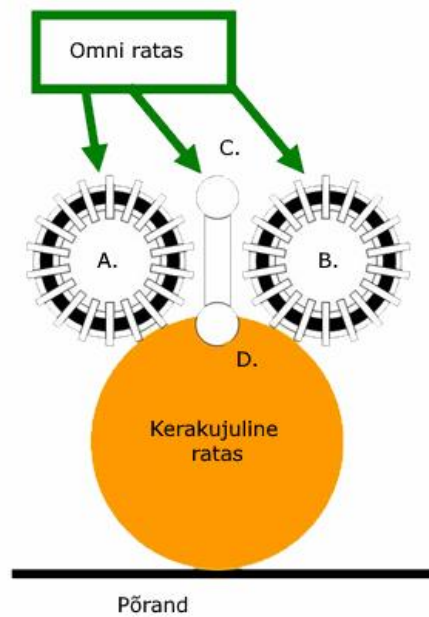
Joonis 1.4 Ratta ja kera kontaktpindade võrdlus

Kerakujulisel rattal on lihtsam ülesehitus võrreldes Omni rattaga, sest detailide hulk on väiksem ning on lihtsam hoida. Järelikult on kerakujulisel rattal suurem töökindlus, väiksem tootmishind ning seda on lihtsam korras hoida, sest detailid on suuremad ning detailide arv väiksem. See on oluline, sest need tegurid mõjutavad kõige rohkem toodete valikut.

1.3 Ülevaade kerakujulise ratta mehhanismist

1.3.1 Omni ratastega ülekandemehhanism kerakujulise ratta jaoks

Kerakujulise ratta jaoks kasutatakse erilist mehhanismi, mis erineb tavapärase ratta mehhanismist. See mehhanism on Omni ratta ja kerakujulise ratta kombinatsioon. Omni rattad juhitavad kerakujulist ratast nii, et on võimalik osa saada mõlemat tüüpi ratta eelistest. Omni rattaid on kaks paari (A ja B, C ja D) ning igal Omni rataste paaril on kasutusel mootorid mehhanismi käivitamiseks. Need kaks Omni ratta paari panevad kerakujulise ratta liikuma. Nad on paigutatud üksteise suhtes risti. On oluline panna Omni rataste paar omavahel ainult risti, sest selles asendis pöörlevad väikesed kettad Omni ratastes ilma liigse hõõrdejõuta. Joonisel 1.5 on toodud ajamimehhanism. [1]



Joonis 1.5 Ajamimehhanism Omni ratastega [1]

Selle mehhanismi suur eelis on see, et kontaktjõud Omni ratta ja kerakujulise ratta vahel on reguleeritav. Normaalse reaktsiooni reguleerimiseks saab Omni rataste vahelist kaugust reguleerida, mis mõjub kontaktjõule kerakujulistel ratastel, kuna roboti kaal jaotub Omni ratastele. Valemid 1.1 ja 1.2 näitavad, et on võimalik hõõrdejõudu Omni ratta ja kera vahel reguleerida nurga θ muutumisel, mis aitab vältida soovimatut libisemist mehhanismis [2].

$$F_h = f \cdot N \quad (1.1)$$

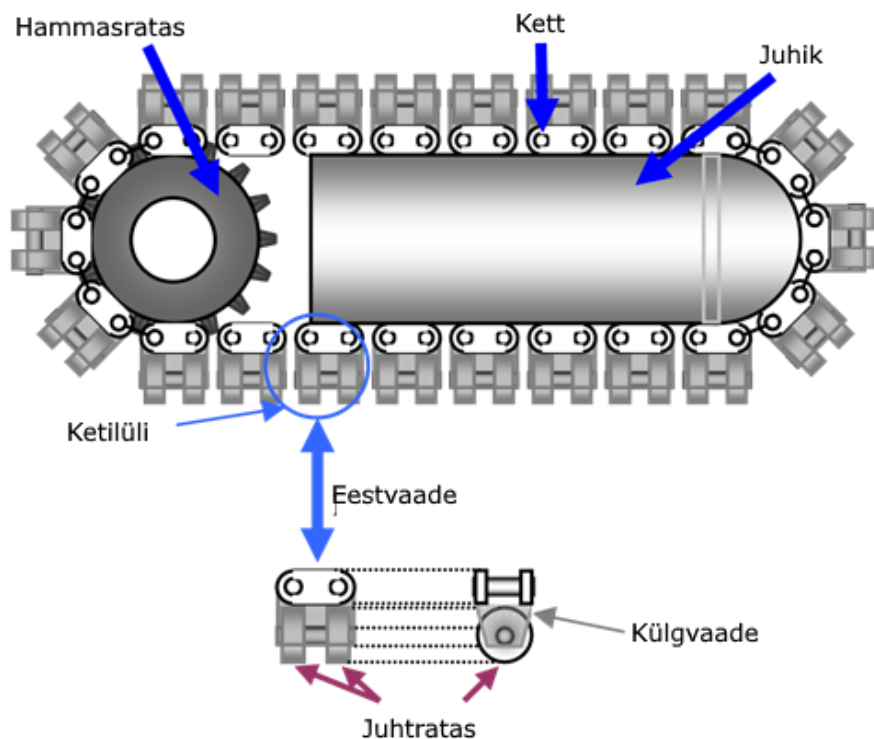
kus f – hõõrdetegur,
 N – normaalreaktsioon.

$$\vec{N} = mg \cos\theta \quad (1.2)$$

kus \vec{N} – normaalreaktsiooni jõuvektor,
 m – keha mass,
 g – raskuskiirendus,
 θ - nurk Omni-ratta ja z-telje vahel.

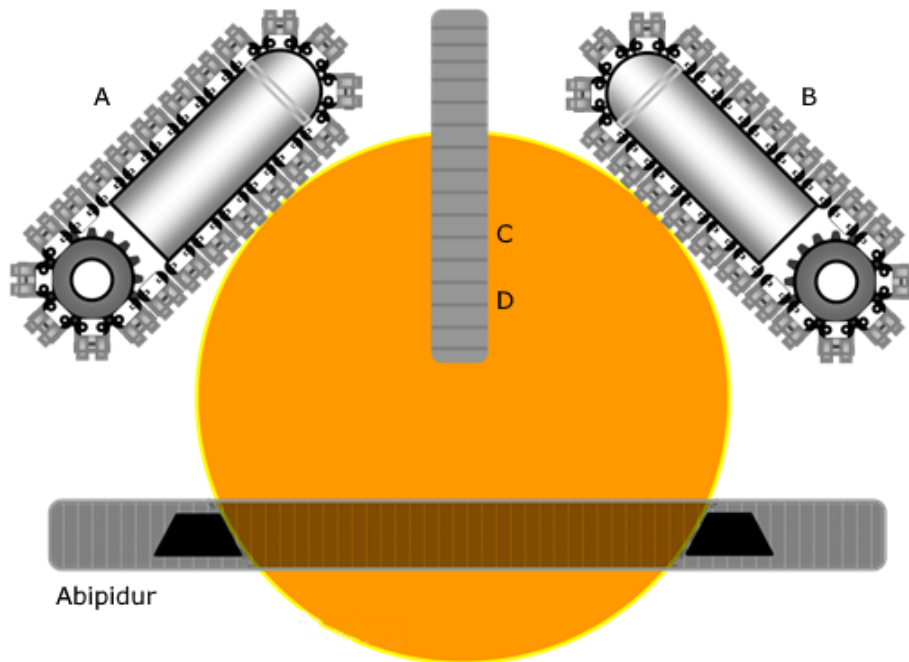
1.3.2 Omni roomiku ülekanemehhanism kerakujulise ratta jaoks

See mehhanism on Omni roomiku ja kerakujulise ratta kombinatsioon. Omni roomik juhib kerakujulist ratast nii, et esile tulevad mõlema mehhanismi eelised. Omni roomik koosneb väikestest lülidest, mis on omavahel ühendatud. Üks lüli kujutab endast ratast. Kõik rattad on omavahel ühendatud keti abil, nii et moodustub roomik. Joonisel 1.6 on toodud Omni roomiku skeem. [3]



Joonis 1.6 Omni roomik skeem [3]

Antud mehhanism on sarnane eelmise mehhanismiga. Omni roomikuid on kaks paari (A ja B, C ja D) ning iga roomikupaari juhib ajam (näiteks suure pöördemomendiga alalisvoolumootor või samm-mootor enkooderiga), kasutades hammasratast. Need kaks roomikupaari on paigutatud teineteise suhtes risti ning need käivitavad kerakujulise ratta. Mehhanismi paremaks juhtimiseks on võimalik kasutada abipidurit. Joonisel 1.7 on toodud ajamimehhanism.



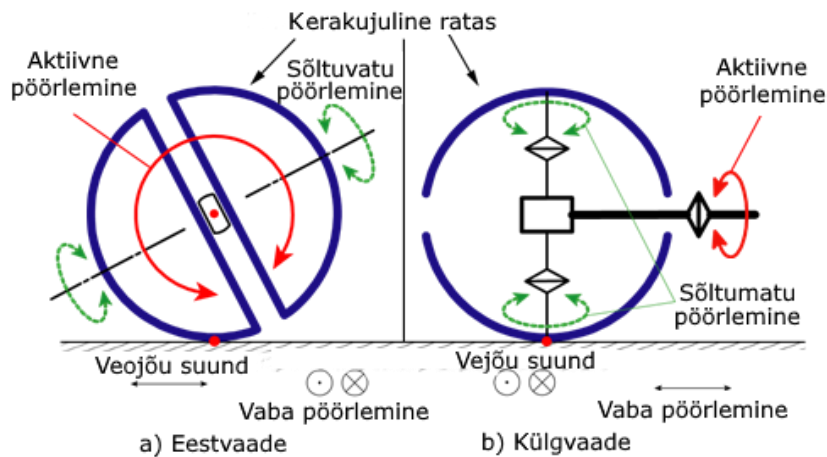
Joonis 1.7 Ajamimehhanism Omni roomikutega [3]

Roboti kaal jaotub Omni roomikutele. Normaalse reaktsiooni reguleerimiseks saab Omni rataste vahel kaugust reguleerida, mis mõjub kontaktjõule kerakujulistel ratastel, kuna roboti kaal jaotub Omni ratastele. Valemid 1.1 ja 1.2 näitavad, et hõõrdejõudu saab reguleerida nurga θ muutumisel, mis aitab vältida soovimatut libisemist mehhanismis.

Võrreldes eelmise mehhanismiga, kus kasutatakse Omni rattaid, on siin suurem kontaktpind, mis aitab kerakujulist ratast sujuvamalt käivitada. Mehhanismi mõõtmed on väiksemad, kuna ratta asemel kasutatakse roomikut. Ülesehitus on keerulisem võrreldes ülekandega, kus kasutatakse Omni ratas, kuna detailide arv on suurem.

1.3.3 Omni kera

Mehhanismi nimetatakse Omni keraks ning seal kasutatakse kera, et saada võimalus liikuda mitmes suunas. Omni kera keskel on aktiivne pöörlemistelg, mis pöörab mõlemat poolkera. Kera on jagatud kaheks poolkeraks, mis pööravad teineteisest sõltumatult. Omni kera struktuur on toodud joonisel 1.8. [4]



Joonis 1.8 Omni kera struktuuri skeem, kus aktiivset pöörlemist näitavad punased ja sõltumatut pöörlemist rohelised nooled [4]

Kui aktiivtelg pöörleb, siis Omni kera hakkab liikuma, mis on näidatud joonisel 1.8. Kui Omni kera liigub, siis tema poolkerad saavad sõltumatult pöörata ümber aktiivtelje. Sõltumatu pöörlemine sõltub liikumissuunast.

Omni kera struktuur on lihtsam, võrreldes teiste mitmesuunalise liikumise mehhanismidega. Aga mehhanismil on üks puudus: kui aktiivtelg on risti kontaktpinnaga ning ta ei pöörle, siis mehhanism hakkab pidurdama.

Selle probleemi lahendamiseks kasutatakse mehhanismis rulli, mis on paigutatud võlli otsa. See aitab vältida maksimaalset hõõrdejõudu, kui kõik passiivsed teljed on maapinnaga risti. Omni kera struktuuris kasutatakse laagrit, rulli, võlli.

1.4 Mitmesuunalise liikumise mehhanismide võrdlus

Kokku on selles töös välja toodud neli mehhanismi mitmesuunaliseks liikumiseks: Omni ratas, kera Omni ratastega, kera Omni roomikuga ja Omni kera. Neid võrreldi nelja parameetri järgi: ülesehituse lihtsus, ülekandetegur, suurus ja hind. Need parameetrid on olulised. Ülesehituse lihtsus määrab tootmise ja hoolduse kulu. Ülekandetegur mõjutab kasutegurit. Suurus on seotud kasutamise paindlikkusega, sest kui mehhanism on kompaktne, annab see rohkem võimalusi erinevateks mehhaanilisteks lahendusteks. Võrdlemisel arvestati, et ratta ja kera suurus on ühesugune, vabapöörlemise mehhanismis kasutati laagrit ning mehhanismi osad on tehtud samast materjalist.

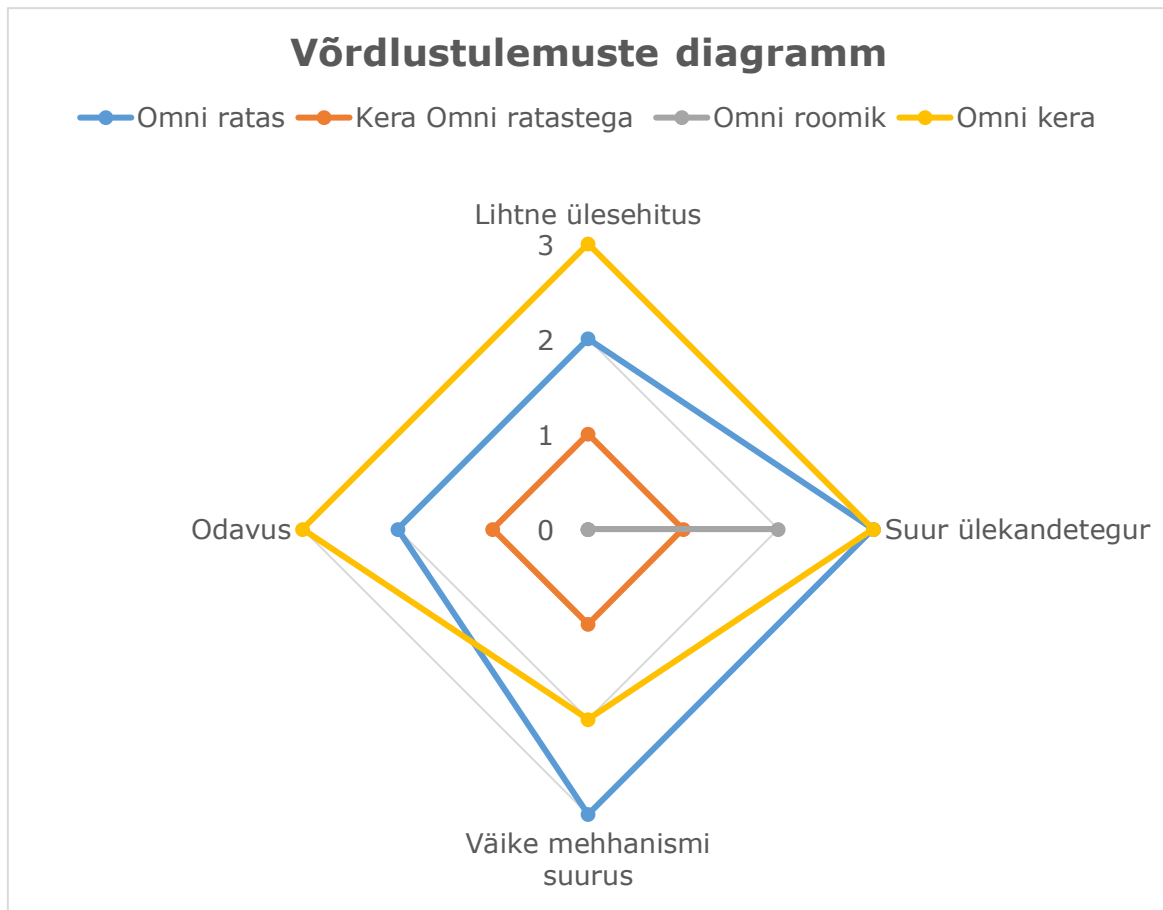
Kõige lihtsama ülesehitusega on Omni kera, kuna tal ei ole nii palju detaile, võrreldes Omni rattaga. Teine on Omni ratas, kuna tal on väiksem detailide hulk võrreldes Omni ratastega keraga ja Omni roomikuga. Kolmas on Omni ratastega kera. Kõige keerulisema ülesehitusega on Omni roomik, sest tal on kõige rohkem detaile.

Kõige suurem ülekandetegur on Omni keral ja Omni rattal, sest mootor edastab nendele energiat võlli abil ilma libisemiseta. Teine on Omni roomik. Kuna Omni roomik ei kinnitu kera külge, saab kera libiseda suurel kiirusel, mis ei ole sobiv. Kõige väiksem ülekandetegur on Omni ratastega keral, sest Omni ratas ei kinnitu kera külge ning kontaktpind on väiksem, võrreldes Omni roomikuga.

Kõige väiksem mehhanism on Omni rattal. Teisena tuleb Omni kera. Kolmas on Omni ratastega kera, sest võrreldes Omni roomikuga võtab Omni ratas vähem ruumi. Kõige suurem on Omni roomik.

Kõige odavam on Omni kera, sest selle juures ei kasutata nii palju detailide, võrreldes Omni rattaga, kus materjalile on kõrged nõudmised ning kus on palju kette koos laagritega. Teine on Omni ratas, sest võrreldes Omni ratastega keraga ei kasutata seal kera. Kolmas on Omni ratastega kera. Kõige kallim on Omni roomik, sest seal kasutatakse rohkem kette koos laagritega.

Võrdlustulemused on toodud joonisel 1.8, kus skaala ulatus on 0–3 (3 – kõige parem, 0 – kõige halvem). Tulemus näitab, et kõige parem lahendus on Omni kera, teine on Omni ratas, kolmas on Omni ratastega kera ja viimane Omni roomik.



Joonis 1.8 Võrdlustulemuste diagramm

1.5 Kokkuvõte

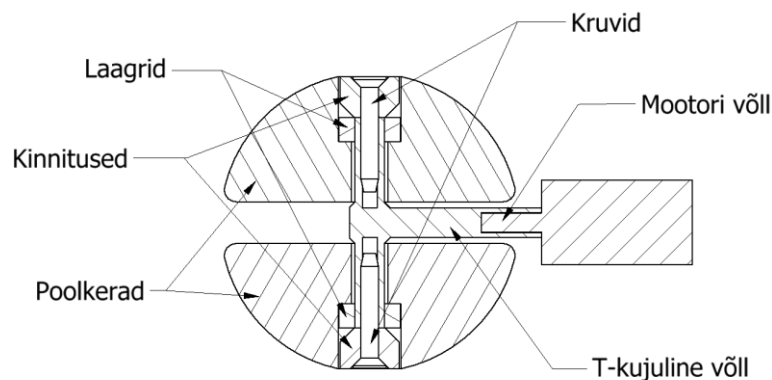
Selles peatükis selgitatakse, miks mitmes suunas liikuvat mehhanismi on üldse vaja. Uurimisel leiti, et parim variant mitmesuunaliseks liikumiseks võrreldes teiste mehhanismidega on Omni kera, mis võeti kontseptsiooni väljatöötamisel aluseks. Autor arvab, et Omni kera mehhanism sobib hästi kasutamiseks, sest seda on lihtne populariseerida, kuna tal on suur ülekandetegur, lihtne ülesehitus ja odav hind võrreldes teiste mehhanismidega mitmesuunalise liikumiseks.

2. PROTOTÜÜBI PROJEKTEERIMINE

Prototüüp on projekteeritud kasutamiseks siseruumides, kus on sile kuiv puitpind, et prototüüpi oleks lihtsam valmistada ja testida, kuid kerakujulise ratta mehhanismi kontseptsioon on mõeldud laiemaks kasutamiseks. Et mehhanismis kasutatakse mitmeid spetsiifiliste detaile, mida ei saa osta, on paljud detailid prinditud 3D-printeril. Prototüübi väljatöötamiseks on tehtud ülekandemehhanismi arvutused ja valitud komponendid. Detailid projekteeriti ning valmistati 3D-mudeli simulatsioonis loodud mehhanismi töökindluse väljaselgitamise tarkvaras Autodesk Inventor. Prototüübi jaoks koostati elektriskeem ja kirjutati programmikood.

2.1 Ülekandemehhanismi ülevaade

Ülekandemehhanism koosneb kerakujulisest rattast, T-kujulisest võllist ja mootorist. T-kujuline võll ühendab mootorit ja kerakujulist ratast. Sellel variandil on rohkem eelised teiste viisidega võrreldes, sest esimeses peatükis, kus uuriti erinevaid mehhanisme mitmesuunaliseks liikumiseks, on näidatud, et parem variant teiste mehhanismidega võrreldes on selline, kus võll on otse ühendatud kerakujulise ratta ja mootoriga. Ülekandemehhanismi eskiis on toodud joonisel 2.1.



Joonis 2.1 Ülekandemehhanismi eskiis

Rattad kujutavad endast kera, mis jagati kaheks võrdseks poolkeraks. Iga poolkera lõigati niimoodi, et ühendamisel moodustavad nad kera. Igasse poolkerasse on tehtud avad, mille kaudu ühendatakse võll ja poolkera. Hõõrdumise vähendamiseks kasutatakse poolkera sisse pandud laagrit. Plastmassist poolkerad on välja prinditud 3D-printeriga.

T-kujulise võlli pikim osa on ühendatud mootoriga ning kaks lühemat osa on kinnitatud poolkeradega poolkera kinnitusdetailide abil. Võlli kahte väiksemasse osasse on tehtud avad, mille kaudu ühendatakse poolkera kinnitusdetailiga kruvi kaudu.

Kokku on rattaid neli ja need on paigaldatud prototüübi kõigile neljale küljele. Kahte nendest kasutatakse edasi-tagasi liikumiseks, ülejäänud kahte vasakule ja paremale liikumiseks.

2.2 Ülekandemehhanismi arvutused

Mootor on peamine osa ülekandemehhanismis, sest mootori valikust sõltub rataste suurus, liikumiskiirus ja mootori juhtimise meetodid. Mootori valikul olid olulised järgmised parameetrid: mootori tüüp, mootori kiirus, mootori pöördemoment.

Mootori tüübi puhul on valikus harjadega ja harjadeta alalisvoolumootor. Harjadeta mootoril on suurem kasutegur ja kulumiskindlus, kiire start ning lihtsam pöördemomendi reguleerimine, aga ka kõrgem hind, võrreldes harjadega mootoriga. Harjadega mootor on väiksem ja odavam. Aga suur kiirus suurendab harjade hõõrdumist ning tal on väiksem võimsus ja kasutegur, võrreldes harjadeta mootoriga.

Prototüüpi jaoks ei ole mõistlik kasutada kallist suure kasuteguriga mootorit, sest prototüübi eesmärk on demonstreerida kerakujulise ratta mehhanismi tööd. Mehhanismi jaoks sai valitud harjadega alalisvoolumootor, sest harjadega mootor on odavam.

Mehhanism projekteeriti kasutamiseks siseruumides, kus suurt liikumiskiirust ei ole vaja, seega ei pea pöörlemiskiirus olema suur. Prototüübi testimiseks oli oluline kiiruse reguleerimise võime, sest siis on lihtne uurida mehhanismi käitumist erinevatel kiirustel. Otsustati kasutada mootorit pöörlemiskiirusega 200 RPM (*Revolutions per minute*), sest see on optimaalne kiirus siseruumis kasutamiseks.

Mootor on rattaga ühendatud otse võlli kaudu. Ratta pöördemoment sõltub kogu veojõust, ratta läbimõõdust ja takistustegurist. Selle parameetri arvutamiseks kasutati valemit 2.1 [5].

$$T_w = TTE \cdot R_w \cdot RF \quad (2.1)$$

kus T_w – ratta pöördemoment,
 TTE – kogu veojõud (*Total tractive effort*),
 R_w – veoratta raadius,
 RF – takistustegur (*Resistance factor*).

Takistustegur arvestab rataste ja nende telgede vahelisi hõõrdekadusid ning mootori laagrite takistust. Takistustegur on vahemikus 1,1 kuni 1,15 [5]. Kuna mootorid olid uued, siis takistustegur oli 1,1.

Rataste suurus sõltub peamiselt ületatava takistuse kõrgusest ja sobivast kiirusest. Kuna siledal pinnal ei olnud takistusi ning kaal oli väike, siis valik tehti kiiruse põhjal. Prototüübi keskmine kiirus võeti selline, millega prototüüp läbib oma pikkuse ühe sekundiga. Sellisel kiirusel oli lihtne jälgida mehhanismi tööd. Kuna mootori pöörlemiskiirus on 200 RPM, siis 2.2 valemi abil leiti ratta läbimõõt [6]. Kuna prototüüpi projekteeriti kompaktsena ja väiksenä, otsustati võtta maksimaalse võimaliku prototüübi pikkuseks 0,5 m.

$$v = n \cdot d \cdot \pi \quad (2.2)$$

$$d = \frac{v}{\pi \cdot n} = \frac{0,5}{3,14 \cdot \frac{200}{60}} = 0,048m = 48mm$$

kus v – ratta liikumiskiirus,
 n – pöörlemiskiirus,
 d – ratta läbimõõt,
 π – Archimedese konstant,
 60 – sekundide arv minutus.

Kogu veojõud on võrdne veeretakistuse ületamiseks vajaliku jõu, kaldenurga ületamiseks vajaliku jõu ja löpliku kiiruse saavutamiseks vajaliku jõu summaga, mis on toodud valemis 2.3 [5].

$$TTE = RR + GR + F_{max} \quad (2.3)$$

kus TTE – kogu veojõud (*Total tractive effort*),
 RR – veretakistuse ületamiseks vajalik jõud (*Rolling resistance*),
 GR – kaldenurga ületamiseks vajalik jõud (*Grade resistance*),
 F_{max} – lõpliku kiiruse saavutamiseks vajalik jõud.

Veeretakistuse ületamiseks vajalik jõud sõltub sõiduki täismassist ja hõõrdetegurist, mis on toodud valemis 2.4 [5].

$$RR = W_{GV} \cdot C_{sf} \quad (2.4)$$

kus RR – veretakistuse ületamiseks vajalik jõud (*Rolling resistance*),
 W_{GV} – sõiduki täiskaal,
 C_{sf} – hõõrdetegur.

Hõõrdetegur sõltub materjali kombinatsioonist. Rattad on tehtud plastmassist ning pinnatüüp on kuiv puitpind. Tabelist L1.1 on võetud C_{sf} hõõrdetegur, mis on 0,01.

Prototüübi mass ei pea ületama 1 kg, raskuskiirendus on $9,81 \text{ m/s}^2$ ja hõõrdetegur on 0,01, siis, kasutades valemit 2.4, leiti veeretakistuse ületamiseks vajalik jõud:

$$RR = 1 \cdot 9,81 \cdot 0,01 = 0,098 \text{ N}$$

Ronimiseks vajalik jõud sõltub sõiduki täiskaalust ja maksimaalsest kaldenurgast. Kui prototüübi massiks võeti 1 kg ja raskuskiirendus on $9,81 \text{ m/s}^2$, maksimaalne kaldenurk ei ületa 2° , siis, kasutades valemit 2.5 [5], leiti ronimiseks vajaliku jõud:

$$GR = W_{GV} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

$$GR = 1 \cdot 9,81 \cdot \sin(2^\circ) = 0,342 \text{ N}$$

kus GR – ronimiseks vajalik jõud (*Grade resistance*),
 W_{GV} – sõiduki täiskaal,
 α – maksimaalne kaldenurk.

Kiirendusjõud sõltub sõiduki täiskaalust, maksimaalsest kiirusest ning maksimaalse kiiruse saavutamise ajast. Prototüübi massiks võeti 1 kg ning raskuskiirendus on

9,81 m/s². Maksimaalseks kiiruseks võeti 1 m/s, mis on 2 korda suurem kui keskmine kiirus. Maksimaalse kiiruse saavutamise ajaks võeti 1 s. Kiirendusjõu arvutamiseks kasutati valemit 2.6 [5].

$$F_a = \frac{W_{GV} \cdot V_{\max}}{32ft \cdot s^{-2} \cdot t_a} \quad (2.6)$$

$$F_a = \frac{1 \cdot 9,81 \cdot 1}{9,75 \cdot 2} = 1,006 \text{ N}$$

kus F_a – kiirendusjõud,

W_{GV} – sõiduki täiskaal,

V_{\max} – maksimaalne kiirus,

$32ft \cdot s^{-2}$ – tegur kiirendusjõu arvutamiseks, mis võrdub $9,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,

t_a – maksimaalse kiiruse saavutamise aeg.

Kogu veojõu arvutamiseks kasutati valemit 2.3, kus veeretakistuse ületamiseks vajalik jõud on 0,098 N, ronimiseks vajaliku jõud 0,342 N ja kiirendusjõud 1,006 N.

$$TTE = 0,098 + 0,342 + 1,006 = 1,446 \text{ N}$$

Kogu veojõu põhjal arvutati ratta nõutav pöördemoment T_w , kasutades valemit 2.1 [5], kus kogu veojõud on 1,446 N, veoratta raadius on pool läbimõõdust ehk $48/2 = 24 \text{ mm} = 0,024 \text{ m}$ ja takistustegur on 1,1.

$$T_w = 1,446 \cdot 0,024 \cdot 1,1 = 0,038 \text{ N} \cdot \text{m} = 0,0039 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Soovimatu libisemise vältimiseks arvutati ratta maksimaalne pöördemoment, mida ratas suudab edastada ilma libisemiseta. Kuna ühesuunaliseks liikumiseks kasutati kahte ratast, veorattale rakendatud kaal on võrdne poole sõiduki täiskaaluga. Maksimaalse veojõu pöördemomendi arvutamiseks kasutati valemit 2.8 [5], kus rakendatud kaal korrutati staatilise hõõrdeteguriga ratta ja maa vahel ning veoratta raadiusega.

$$MTT = W_w \cdot \mu_s \cdot R_w \quad (2.8)$$

kus MTT – suurim ratta pöördemoment (*Maximum tractive torque*),

W_w – rakendatud kaal veorattal,

μ_s – staatiline hõõrdetegur ratta ja maa vahel,

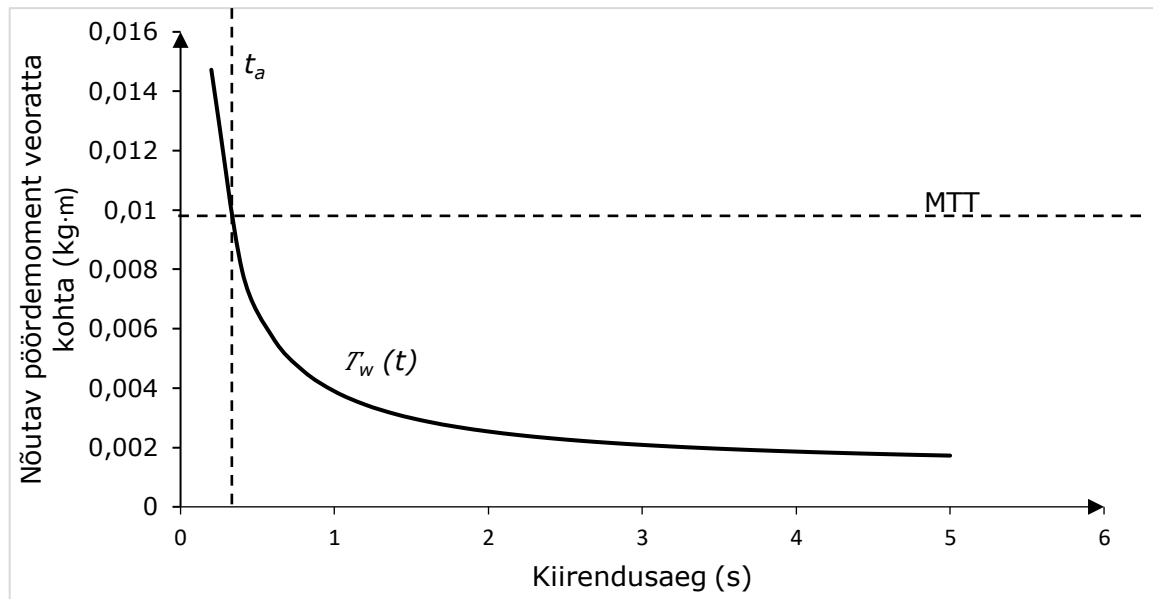
R_w – veoratta raadius.

Staatiline hõõrdetegur sõltub materjali kombinatsioonist, mis on võetud tabelist L1.2. Materjali kombinatsioon on kõva plastmass kuival puidul ja staatiline hõõrdetegur on 0,4. Veduki suurima pöördemomendi arvutamiseks kasutati valemit 2.8, kus rakendatud kaal veorattal on pool sõiduki täiskaalust korrutatud raskuskiirendusega ehk $0,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$, staatiline hõõrdetegur on 0,4, veoratta raadius on 0,024 m.

$$MTT = 0,5 \cdot 9,81 \cdot 0,4 \cdot 0,024 = 0,0471 \text{ N} \cdot \text{m} = 0,0048 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Soovimatu libisemise vältimiseks peab olema täidetud järgmine tingimus: $T_w < MTT \cdot \text{veorataste arv}$ [5]. Kuna ühesuunaliseks liikumiseks kasutati kahte ratast, siis $0,0039 < 0,0048 \cdot 2 \Leftrightarrow 0,0039 < 0,0096$. Tingimus oli täidetud.

Mehhanismi võimaluse teadmiseks leiti maksimaalse kiiruse väikseim saavutamisaeg, mis võimaldab kiirendada maksimaalse kiiruseni ilma soovimatu libisemata. Maksimaalse kiiruse saavutamise aeg on leitud graafilise viisil. Selleks koostati skeem, mis näitab veoratta pöördemomendi sõltuvust kiirendusajast. Seos on toodud joonisel 2.2.



Joonis 2.2 Nõutava pöördemomendi veoratta kohta kiirendusajast sõltuvus:

MTT - suurim veduki pöördemoment, t_a - nõutav maksimaalse kiiruse saavutamise aeg

Tulemusena on leitud maksimaalse kiiruse väikseim saavutamise aeg t_a , mis on umbes 0,3 s.

2.3 Komponentide valik

Prototüübi ehitamiseks oli vaja selliseid komponente:

1. alalisvoolu mootorid 4 tk
2. mikrokontroller
3. mootori kontroller
4. kaugjuhtimismoodul
5. toiteallikas

Alalisvoolumootor peab olema harjadega ning pöörlemiskiirusega 200 RPM ja pöördemomendiga vähemalt 0,0039 kg·m ehk 0,038 N·m. Kasutegur ei ole oluline, tähtsam on hind. Valiti mootor GA12-N20 6V, sest ta oli levinud ja odav. Tal on sellised parameetrid: tüüp – harjadega alalisvoolumootor, pöördemoment 0,02 kg·m ehk 0,19 N·m, pöörlemiskiirus 200 RPN. Kõik kriteeriumid on täidetud. Mootor on toodud tabelis L2.1 [7].

Mikrokontrolleril ei ole määratud valikkriteeriumeid, sellepärast on mõistlik valida levinud ja odav variant. Selleks sobib hästi mikrokontroller Atmel ATmega328.

Kontrolleriplaadiks valiti Arduino Nano mikrokontrolleriga Atmel ATmega328, mis on toodud tabelis L2.1 [8].

Kuna prototüübis on kasutatud nelja mootorit, peab kontroller toetama nelja harjadega alalisvoolumootorit. Pole oluline võime kontrollida iga mootorit eraldi, sest prototüüp sai liikuda vasakule või paremale ilma pööramata. Selleks valiti mootori kontroller L298N, sest see on levinud ja odav. Kuna maksimaalne vool mootori juhtimiseks kontrolleris on 2 A ja üks mootor tarbib 0,67 A [7], sobib see kontroller hästi. Mootori kontroller L298N on toodud tabelis L2.1 [9].

Kaugjuhtimismoodulil ei ole määratud valikkriteeriumeid. Kuna mugav on juhtida mobiiltelefoni abil, valiti Bluetoothi moodul HC-06. Võrreldes Wi-Fi mooduliga on see odavam ja lihtsam kasutada. Bluetoothi moodul HC-06 on toodud tabelis L2.1 [10].

Toiteallikaks valiti liitiumioonakud NCR18650B, sest neil on suur energiatihedus ja pinge ning need on odavad. Nominaalpinge on 3,7 V ja mahtuvus on 3400 mAh. Liitiumioonakud NCR18650B on toodud tabelis L2.1 [11].

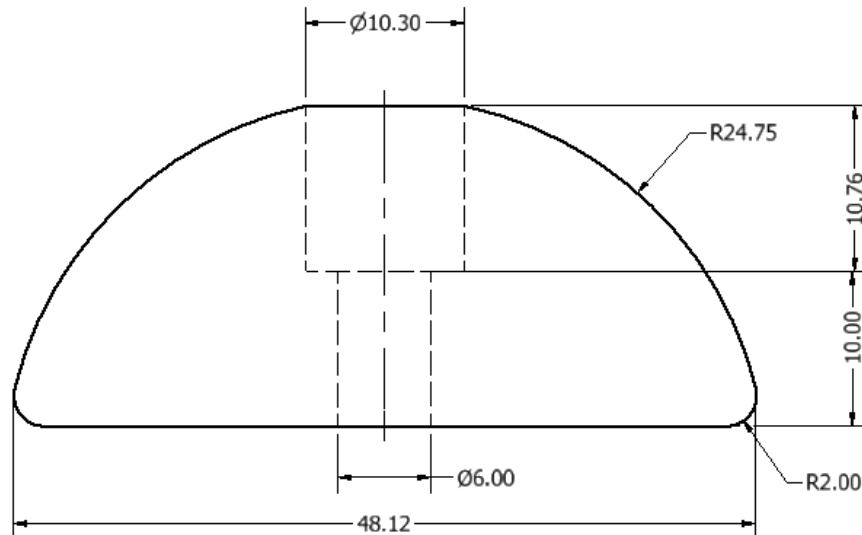
Akul on järgmine puudus: kui aku on tühjenenud rohkem kui 2,75 V [11], siis ta rikneb. Riknemise vältimiseks kasutati ekraaniga voltmeetrit, mis jälgib akude pinget. Voltmeeter on toodud tabelis L2.1 [12].

Toite sisse- ja väljalülitamiseks kasutati lülitit, mis on toodud tabelis L2.1 [13].

2.4 Mehhanismi detailide kirjeldus

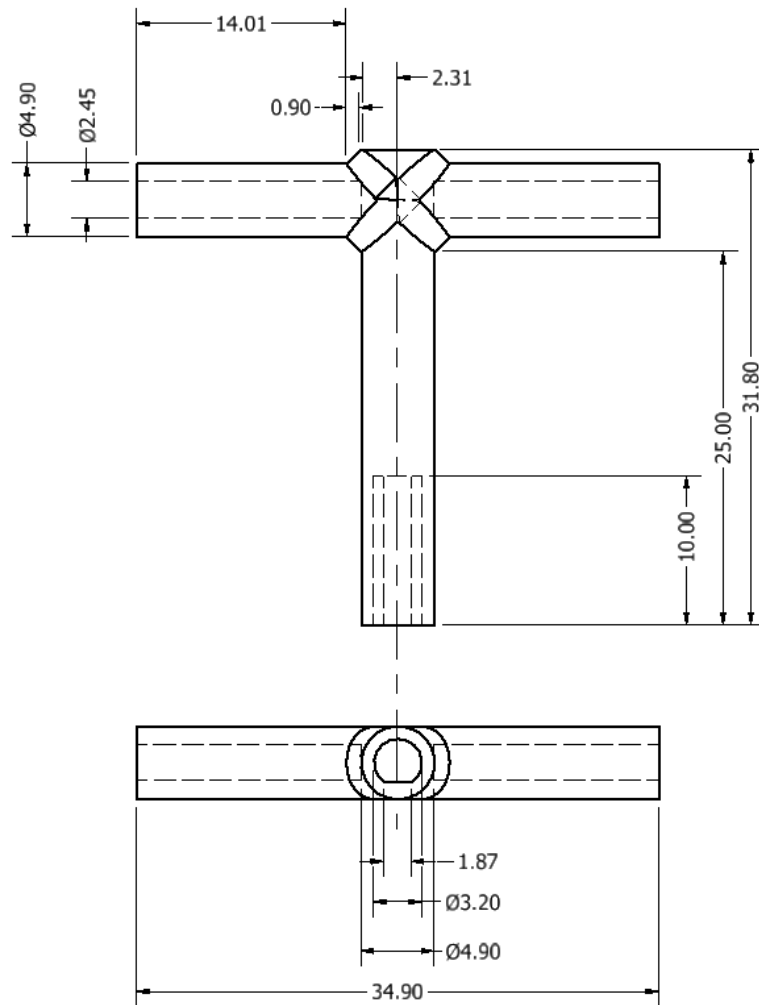
Ratas kujutab endast kera läbimõõduga umbes 48 mm, mis koosneb kahest poolkerast. Selleks et ratas oleks täiesti kerakujuline, eemaldati aluse küljelt poolkera osa, mis võrdus poolega poolkeradevahelisest kaugusest. Teravate nurkade eemaldamiseks freesiti poolkera serva raadiusega 2 mm. Pärast silumist on poolkera suurim läbimõõt 48,12 mm. Poolkera sisse tulevad MR105ZZ laager mõõtudega 5X10X4 mm ja völli läbimõõduga 4,9 mm. Poolkeral on kaks auku. Esimene auk on tehtud läbi poolkera (alumine läbimõõt 6 mm ning sügavus 10 mm). Kuna völli läbimõõt on 4,9 mm, peab auk olema vähemalt 1 mm suurem, vältimaks hõõrdumist völli ja poolkera vahel. Teine auk on tehtud poolkera ülemiselt poolelt esimese auguni ehk sügavusega 10,76 mm. Kuna augu 3D-printimisel oli viga +0,1 mm ning laagri vabaks sisestamiseks ja

eemaldamiseks võeti vahemik 0,2 mm, on augu läbimõõt 10,3 mm. Et kerakujulise ratta mehhanism on projekteeritud mitmesuunaliseks liikumiseks, sisestati laager poolkera keskele, et vähendada koormust võllile. Poolkera joonis on toodud joonisel 2.3.



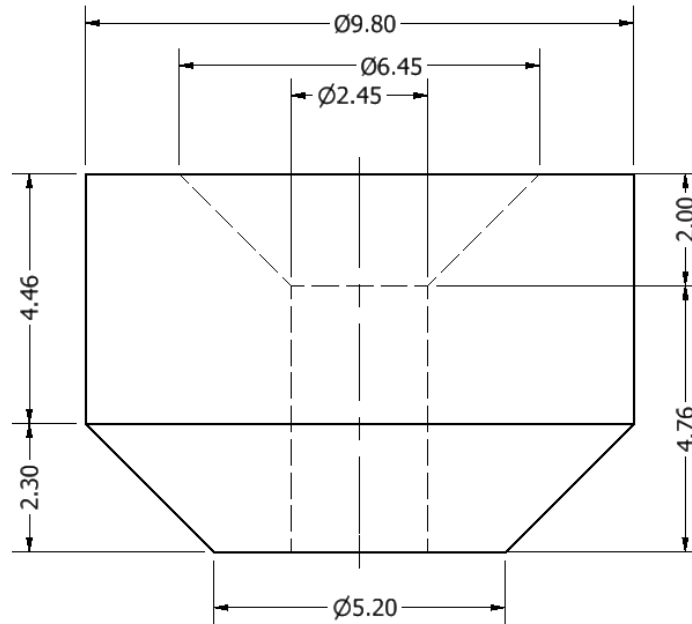
Joonis 2.3 Poolkera joonis

Võll on T-kujuline, kus kogu detaili pikkus on 31,8 mm, laius 34,9 mm ja paksus 4,9 mm. Võlli pikim osa on 25 mm ning tal on auk sügavusega 10 mm mootori ühendamiseks. Selline auk projekteeriti mootori võlli ja T-kujulise võlli ühendamiseks, sest sel viisil on lihtne detaili nii ühendada kui ka eemaldada. Kahe lühima osa pikkus on 14,1 mm ning nende augud on läbimõõduga 2,45 mm ja sügavusega 15 mm. Võlli ja poolkera kinnitusdetaili kinnitamiseks kasutati kruvi läbimõõduga 2,45 mm. Selles kohas, kus kõik kolm osad kokku puutuvad, on moodustatud ristühendus konstruktsiooni tugevuse suurendamiseks. T-kujulise võlli joonis on toodud joonisel 2.4.



Joonis 2.4 T-kujulise võlli joonis

Poolkera kinnitusdetail projekteeriti võlli ja poolkera ühendamiseks, laagri poolkera kinnitamiseks ning augu sulgemiseks. Detaili ülemise osa läbimõõt on 10 mm, selleks et sulgeda poolkera ülemine auk. Kinniti alumise osa läbimõõt on 5,4 mm sellepärast, et vähendada hõõrdumist kinnituse ja laagri vahel. Kinnitusdetail on paigutatud augu ülemisele osale ja võlli ühendamiseks kasutatakse kruvi 2,4X16 mm. Kinnituse joonis on toodud joonisel 2.5.



Joonis 2.5 Kinnitusdetaili joonis

2.5 Mehhanismi 3D-mudeli töökindluse simulatsioon

Mehhanismi kindluse kontrollimiseks tehti mehhanismi 3D-mudeli töökindluse simulatsioon, kasutades tarkvara Autodesk Inventor. Simulatsioon annab teada mehhanismi hapra koha nihkest koormusel ning ohutustegurist, mis näitab mehhanismi töökindlust koormusel. Tarkvara kasutab tulemuse arvutamisel füüsikavalemeid ning näitab tulemust graafiliselt. Simulatsiooni teostamiseks on vaja 3D-mudelit, samuti on tarvis defineerida mõjuvad jõud ja pöördemomendid ning toed mehhanismile.

Simulatsiooni jaoks kasutati järgmist 3D-mudelit: mootori võll koos kerega, T-kujuline võll, kaks laagrit. Komponentide materjalid koos nende tihedusega on võetud tarkvarast Autodesk Inventor ja toodud tabelis 2.1.

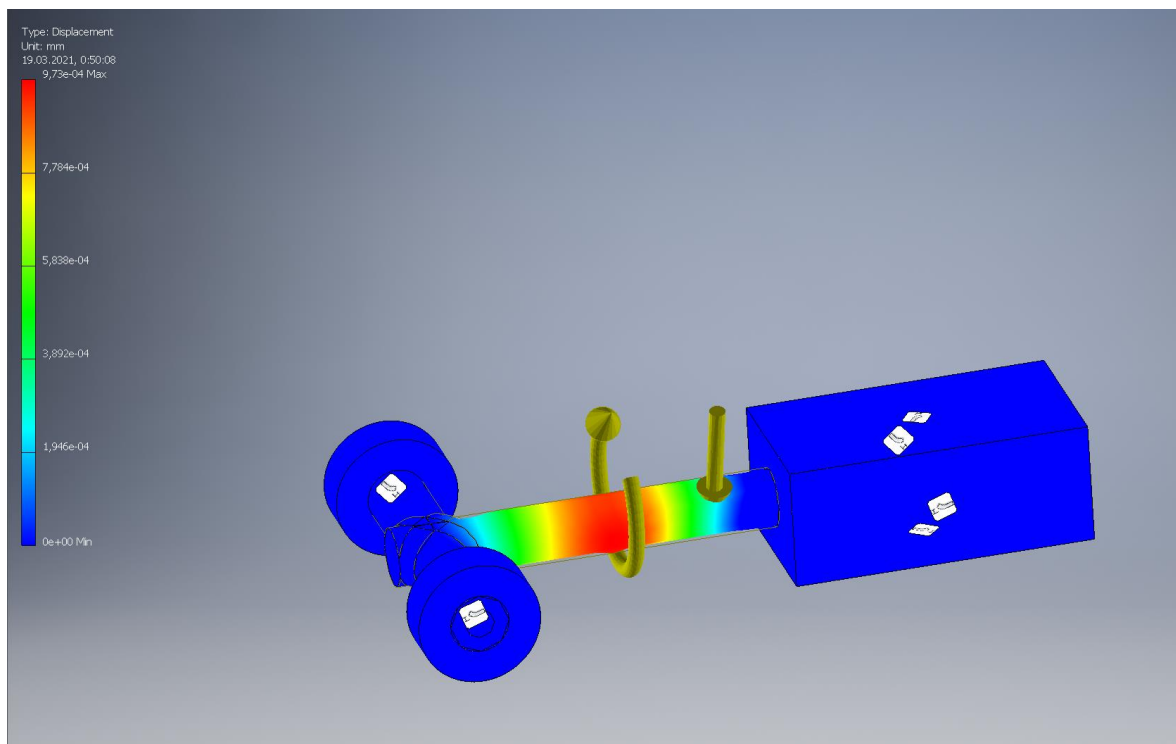
Tabel 2.1 Kasutatud komponentide loetelu simulatsioonis

Nr	Komponendi nimetus	Materjali nimetus	Materjali tihendus
1	Mootori võll	Alumiinium	2700 kg/m ³
2	T-kujuline võll	PC/ABS plastmass	357,27 kg/m ³
3	Laager	Teras	7850 kg/m ³

Mõjutav jõud on keha kaal rattal, mis võrdub 5 N ja mõjutab kontaktpinda mootori võlli ja T-kujulise võlli vahel. Mõjutav pöördemoment on ratta veojõu pöördemoment, mis

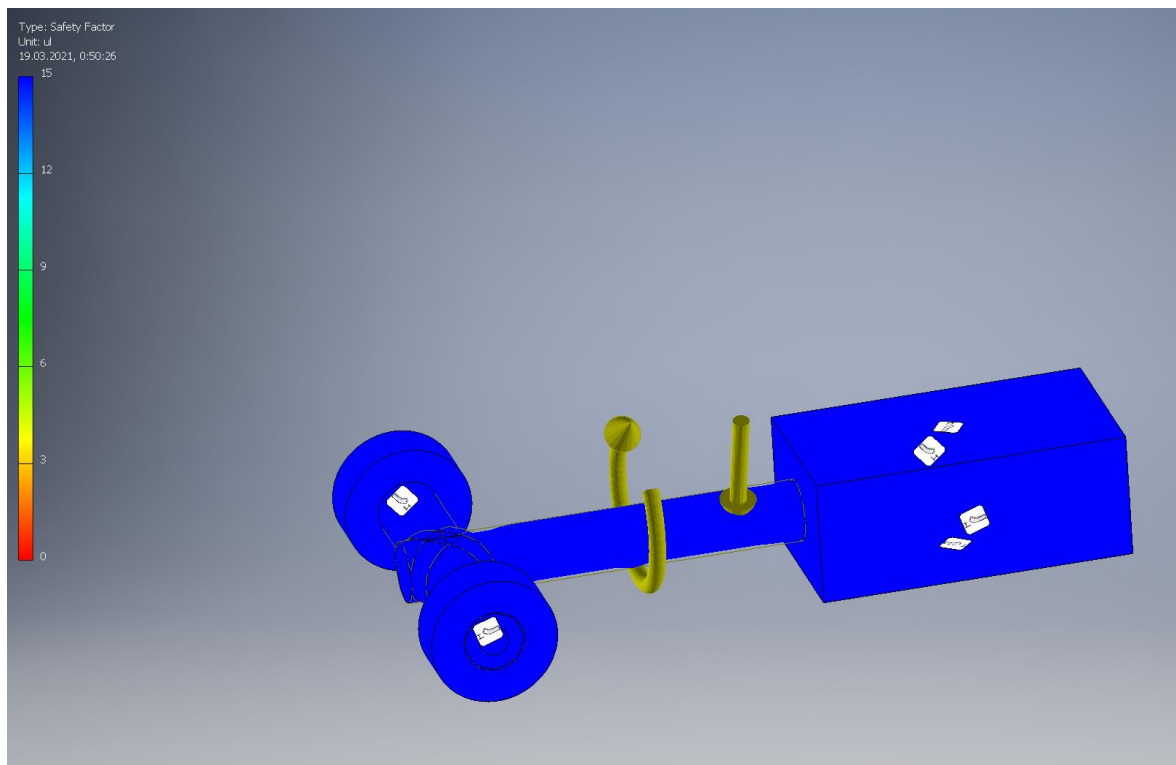
võrdub $0,004 \text{ N} \cdot \text{m}$ ja mõjutab T-kujulise võlli pikimale vardale. Toed on järgmised: kaks laagrit, mootori keha.

Mehhanismi hapra koha nihke analüüsi tulemus on toodud joonisel 2.6, kus mõjutav jõud on märgitud nooltega ja nihe on märgitud värviga. Nihkeskaala ühik on mm ja skaala ulatus on 0 kuni $9,73 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$. Maksimaalne nihe on T-kujulise võlli pikima varda keskel ja nihke suurus on $9,73 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$, mis on väga väike ega suuda võlli murda.



Joonis 2.6 Mehhanismi hapra koha nihke tulemus

Ohutusteguri analüüsi tulemus on toodud joonisel 2.7, kus mõjutav jõud on märgitud nooltega ja ohutusteguri suurus värviga. Ohutusteguri skaala ühikud on ul (*Unitless*), mis on mõõtmeteta ühikud. Skaala ulatus on 0 kuni 15, kus 15 on töökindel ja 0 on nõrk. Tulemus näitab, et mehhanism on töökindel.



Joonis 2.7 Ohutusteguri analüüsi tulemus

2.6 Elektrilise osa kirjeldus

Elektriline osa koosneb järgmistest komponentidest: mootorid, kontrolleriplaat Arduino Nano, mootori kontrolleri L298N, Bluetoothi moodul HC-06, liitiumioonakud NCR18650B, ekraaniga voltmeeter, lülitid.

Prototüüp on projekteeritud nelja rattaga, sellepärast kasutati nelja mootorit. Mootorite ühendus mootori kontrolleriga on järgmine: eesmise ja tagumise mootori toitmiseks kasutatakse väljundit OUT1 ja OUT2 ning vasaku ja parema mootori toitmiseks väljundit OUT3 ja OUT4. Kuna mootorid on paigaldatud paaride kaupa peegelpildis, ühendatakse eesmise mootori pluss väljundiga OUT1 ja miinus väljundiga OUT2; tagumise mootori pluss ühendatakse väljundiga OUT2 ja miinus väljundiga OUT1. Vasaku ja parema mootori ühendus on tehtud samamoodi, kuid teiste väljunditega.

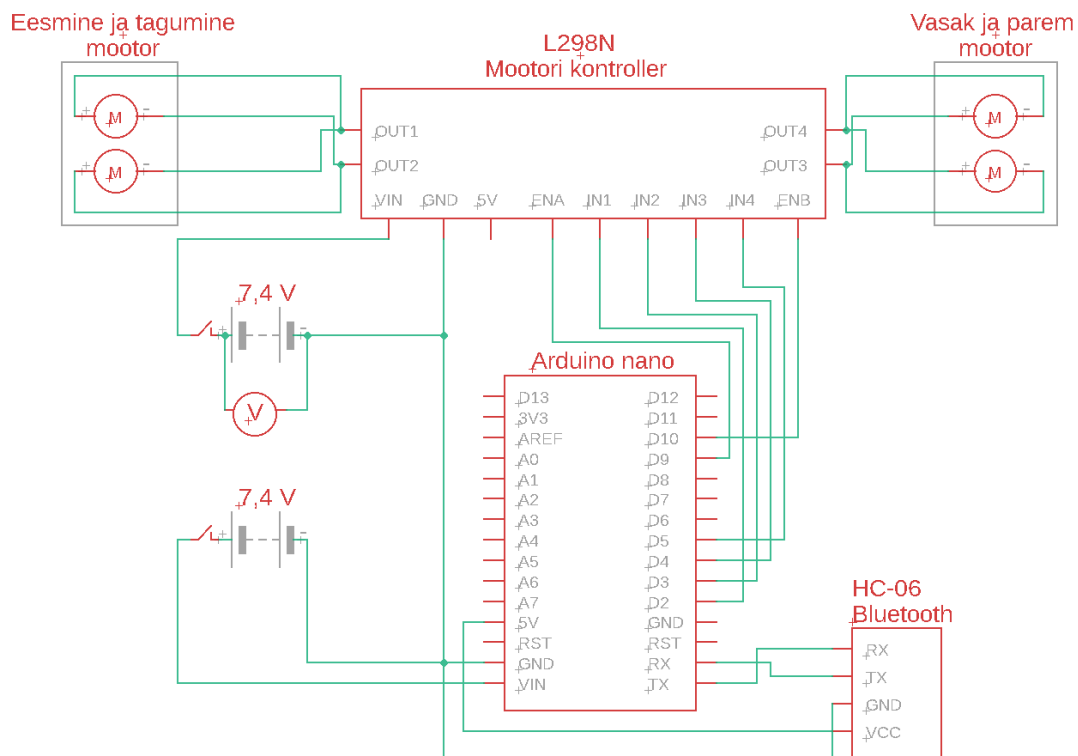
Mootorite juhtimiseks kasutatakse sisendit: ENA (*Enable motor A*), ENB (*Enable motor B*), IN1, IN2, IN3 ja IN4, kus ENA ja ENB määravad mootorite kiiruse ning IN1, IN2, IN3, IN4 määravad mootorite pöörlemissunda. Need sisendid on ühendatud kontrolleriplaadiga Arduino Nano.

Bluetoothi moodul HC-06 kasutab asünkroonset UART-i (*Universal asynchronous receiver-transmitter*) andmeedastust, mille puhul kaugjuhtimismooduli sisend RX (*Receiver*) ühendatakse kontrolleriplaadi väljundiga TX (*Transmitter*) ja kaugjuhtimismooduli väljund TX ühendati kontrolleriplaadi sisendiga RX.

Komponentide toitmiseks on mõistlik kasutada kahte toiteallikat, ühte mootori kontrolleri jaoks, teist kontrolleriplaadi ja kaugjuhtimismooduli jaoks. Eelis on selles, et prototüüpi on lihtsam teenindada. Esiteks tarbivad mootorid rohkem elektrit kui kontrolleriplaat ja kaugjuhtimismoodul, seega on lihtsam laadida akut mootorite jaoks kui kogu elektriskeemi jaoks. Teiseks teeb see mootori kontrolleri koos mootoritega sõltumatuks muudest komponentidest. Kui on vaja testida ainult Bluetoothi ühendust, pole vaja mootori kontrolleri kasutada ning mootorite koormuse tõttu tekib vooluahelas pingelangus, mis mõjutab selle ahela muid komponente.

Kuna mootori kontrolleri toitepinge on 3,2–40 V [9] ja mootori pinge on 6 V, otsustati kasutada kahte liitiumioonakut NCR18650B, mis on ühendatud järjestikku ning pinge kokku on 7,4 V. Kontrolleriplaadi soovitatav pinge on 7 V [8], seega otsustati kasutada kahte liitiumioonakut, mis on ühendatud järjestikku. Bluetoothi mooduli toitepinge on 3,5–6 V [10], seega otsustati kasutada kontrolleriplaadi pinget, mis on 5 V.

Iga toiteallika jaoks kasutatakse eraldi lüliti. Signaali edastamiseks kontrolleriplaadi ja mootori kontrolleri vahel on maajuhtmed kokku ühendatud. Mootorite toiteallika pinge jälgimiseks kasutatakse ekraaniga voltmeetrit. Elektriskeem on toodud joonisel 2.8.

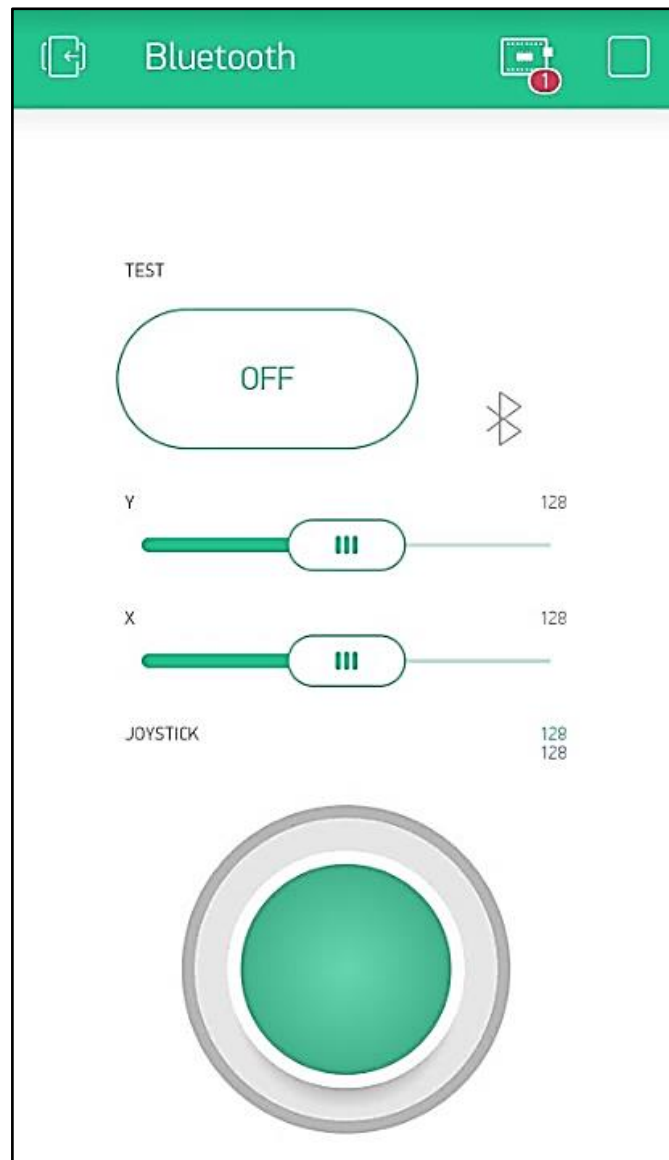


Joonis 2.8 Prototüübi elektriskeem

2.7 Juhtimisalgoritmi kirjeldus

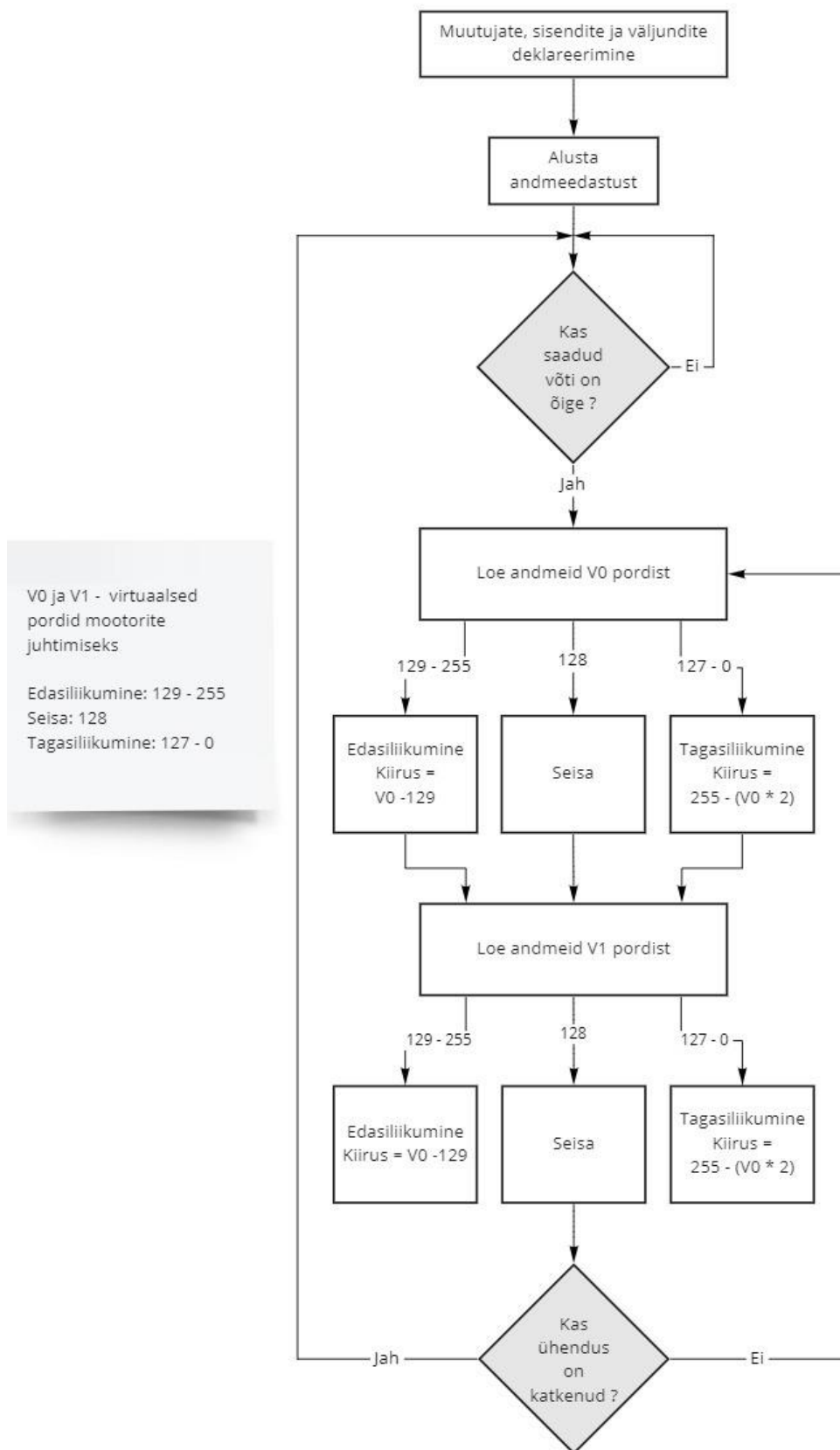
Eesmärk on mootorite kaugjuhtumine Bluetoothi tehnoloogia kaudu, mis võimaldab juhtida mootorit mobiiltelefonil abil. Mobiiltelefonil kasutatakse sellist tarkvara nagu Blynk, mis võimaldab luua juhtimiseks oma liidese [14].

Mootorite juhtimiseks on loodud liides, kus kasutatakse Y-liugurit esimese ja X-liugurit teise mootoripaari juhtimiseks. Iga liuguri väärtuse salvestamiseks kasutatakse virtuaalset porti: V0 on Y-liuguri ja V1 on X-liuguri jaoks. Kasutatakse juhtnupu mitmesuunaliseks liikumiseks. Liuguri juhtnupu tööpõhimõte on peaaegu sama, aga kasutatakse porti V0 ja V1. Blynki loodud liides on toodud joonisel 2.9.



Joonis 2.9 Loodud liides mootorite juhtimiseks mobiltelefonil

Programmkoodi kirjutamiseks kasutati C/C++ keeles tarkvara Arduino IDE. Andmete edastamiseks kasutati viidet SoftwareSerial.h ja BlynkSimpleSerialBLE.h ning loodi võti (salasõna) andmeedastuse lubamiseks. Programmi algoritm on toodud joonisel 2.10.



Joonis 2.10 Programmi algoritmi plokk skeem

Programm kood on toodud lisa.

2.8 Prototüübi väljatöötamine

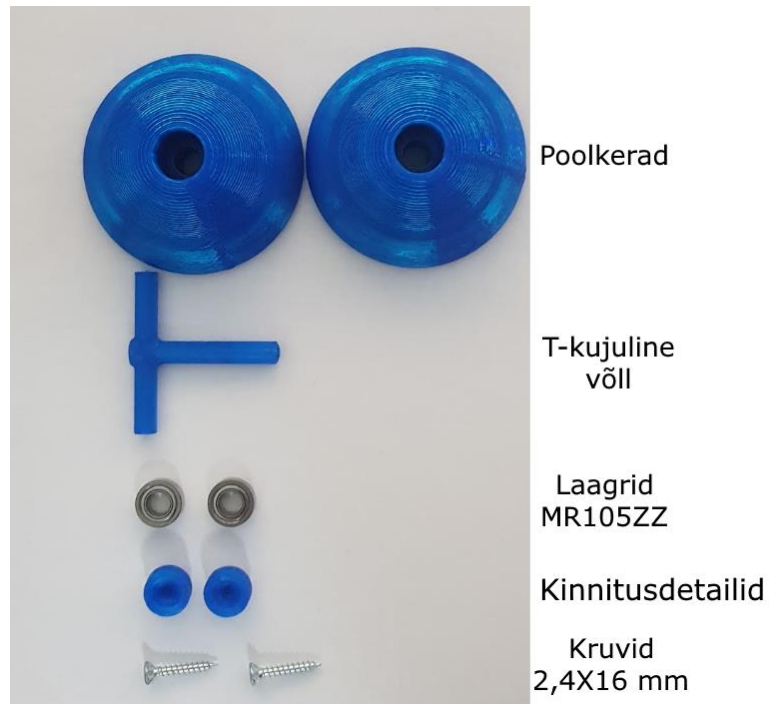
Mehhanismis kasutati palju spetsiifilisi detaile, mida ei saanud poest osta. Sellepärast otsustati paljud detailid printida 3D-printeriga. Printimiseks kasutati ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene*) plastmassi.

3D-mudeli printimiseks on vaja määrata printimise parameetrid 3D-printeri tarkvaras. Kasutatud tarkvara nimi on Ultimaker Cura. Kasutatud printimise parameetrid on järgmised: printimise täpsus, täitmise tihedus. Printimise täpsus määrab mudeli printimise kihi kõrguse, mis omakorda mõjutab printimise täpsust ja printimisviga. Kõige väiksem 3D-printeri täpsus oli 0,1 mm ja kõige suurem täpsus oli 0,3 mm. Täitmise tihedus määrab, kui palju tühja ruumi on välja printitud mudelis. Kui detail on suure koormuse all, soovitatakse täitmise tiheduseks 40–100% [15].

Poolkera on koormuse all, aga T-kujulise võlli ülekoormuse vältimiseks on soovitatav vähendada poolkerade kaalu. Selle mudeli printimiseks otsustati kasutada täitmise tihedust 40%. Printimise täpsuseks valiti 0,3 mm, sest sellel mudelil ei olnud väikseid osi, mis oleksid vajanud suurt täpsust.

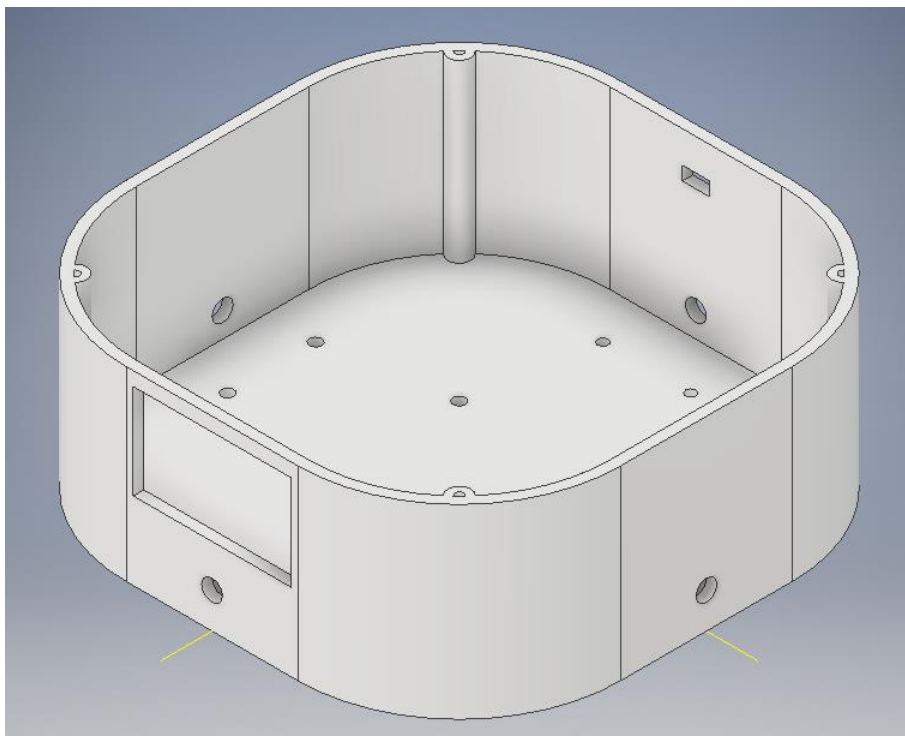
T-kujuline võll on suure koormuse all ning detail on õhuke. Otsustati printida täitmise tihedusega 100%. Kuna detailil on väikseid osasid, otsustati võtta printimise täpsuseks 0,1 mm.

Kuna kinnitus on väike, on printimise täpsus oluline ning täpsuseks võeti 0,1 mm. Täitmise tiheduseks valiti 20%, sest kinnitusel ei olnud suurt koormust. Mehhanismi väljaprintitud ja muud detailid on toodud joonisel 2.11.



Joonis 2.11 Mehhanismi detailide pilt

Mehhanismi rakendamiseks loodi prototüübi keha mudel, mis koosneb alusest ja kaanest. Kehaosad on kinnitud kruvide abil. 3D-mudelid on toodud joonisel 2.12.



Joonis 2.3 Prototüübi keha mudeli aluse mudel

Mootori kinnitamiseks kasutati mootori välja prinditud keha, mis kinnitati prototüübi alusele poltide (DIN965, 10 mm) abil.

Ühe kilogrammi ABS-plastmassi hind oli 18 eurot ja kohaletoiemetamine maksab 3 eurot. Kasutades valemit 2.9, arvutati, kui palju plastmassi kulus detailide väljaprintimiseks, ning leiti detailide koguhind, kasutades plastmassi hinda ja kasutatud plastmassi kogust. Tulemus on toodud tabelis 2.2.

Paljud prototüübi komponendid telliti Hiinast. Mõne komponendi hinnad olid madalamad, kuna neid telliti hulgi. Prototüübi hinna uurimiseks koostati komponentide loetelu, mis on toodud tabelis 2.3.

$$Hind = (Plastmassi hind + Kohaletoiemetamine) \cdot Plastmassi kogus \quad (2.9)$$

Tabel 2.12 Plastmassi kulu

Nr	Detaili nimetus	Detailide arv	Plastmassi kogus (g)	Hind (€)	Ostu kuupäev
1	Poolkera	8	120	2,52	07.11.2020
2	T-kujuline võll	4	4	0,08	
3	Kinnitusdetail	8	4	0,08	
4	Mootori keha	4	15	0,32	
5	Prototüübi alus	1	100	2,10	
6	Prototüübi kaas	1	39	0,82	
7	Kokku	26	282	5,92	

Tabel 2.23 Prototüübi komponentide loetelu

Nr	Komponendi nimetus	Detailide arv	Hind (€)	Kohaletoiemetamise kulud (€)	Kogu hind (€)	Ostu-kuupäev
1	Liitiumioonaku NCR18650B	4	11,36	4,76	16,12	07.11.2020
2	Mootor GA12-N20 6V	4	6,88	4,67	11,55	07.11.2020
3	Bluetooth moodul HC-06	1	2,45	2,89	6,1	26.01.2021
4	Voltmeeter ekraaniga	1	0,76			
5	Detailid plastmassist	26	5,92	-	5,92	07.11.2020
6	Kontrolleriplaat Arduino Nano	1	2,06	3,13	5,19	07.11.2020
7	Laager MR105ZZ	8	2,03	3,1	5,13	26.01.2021
8	Mootori kontroller L298N	1	1,14	1,75	4,26	07.11.2020
9	Lüliti	2	0,37			
10	Aku hoidja	2	1			
11	Polt DIN965	16	2,4	-	2,4	26.01.2021
12	Kruvi 2,4X16 mm	12	0,72	-	0,72	26.01.2021
13	Mutter DIN934, M3	16	0,18	-	0,18	26.01.2021
14	Kokku	94	37,27	20,3	57,57	-

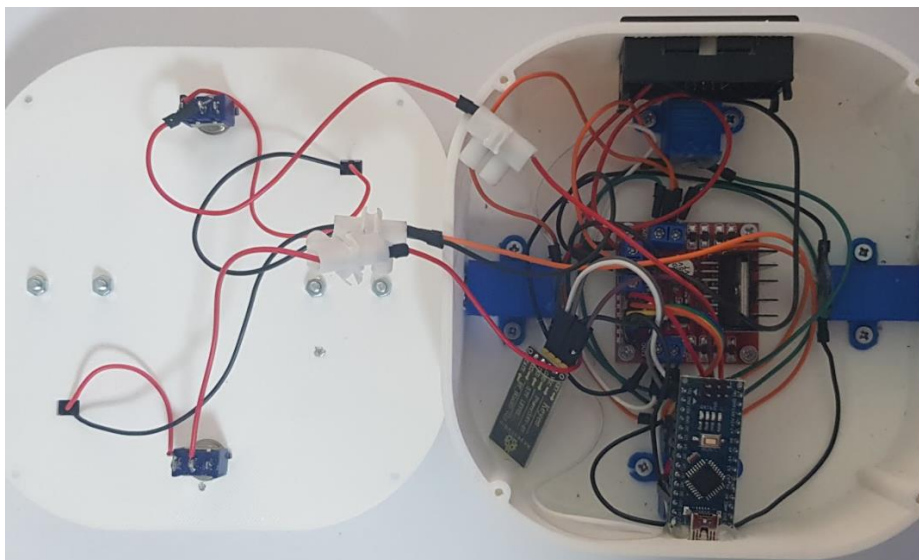
Tulemus näitab, et prototüübi hind on madal (57,57 eurot), sest paljud komponendid telliti Hiinast. Kohaletoiemetamise kulud moodustasid aga veidi üle poole komponentide maksumusest, mis on kallis (20,3 eurot).

Tulemusena on esitatud prototüübi pilt, mis on toodud joonisel 2.13.



Joonis 2.13 Prototüübi pilt

Prototüübi elektriline osa on toodud joonisel 2.14.



Joonis 2.14 Prototüübi elektriline osa pilt

2.9 Kokkuvõte

Selles peatükis kirjeldatakse, kuidas prototüüp projekteeriti ja välja töötati. Arvutuste aluseks on projekteeritud prototüübi variant, mis on mõeldud siseruumides kasutamiseks. Loodud mehhanismil on üsna lihtne ülesehitus, mis teeb tema hoolduse lihtsaks. Hinnaanalüüs näitas, et prototüübi maksumus on madal. Tuleb arvestada, et kui loodud mehhanismi rakendatakse töös, kus koormus mehhanismile on suurem, siis on vaja kasutada teist materjali ja kallimat elektrikomponenti. Prototüüp on kena ja kompaktne ning valmis testimiseks.

3. PROTOTÜÜBI TESTIMINE

Selles peatükis kirjeldatakse loodud prototüübi testimist. Eesmärgi saavutamiseks pandi kirja meetodika, mille põhjal testimine toimus. Seejärel tulemusi analüüsiti ning toodi välja tekkinud probleemid ja nende lahendused ning mehhanismi eelised ja puudused.

3.1 Tekkinud probleemide kirjeldus ja nende lahendamine

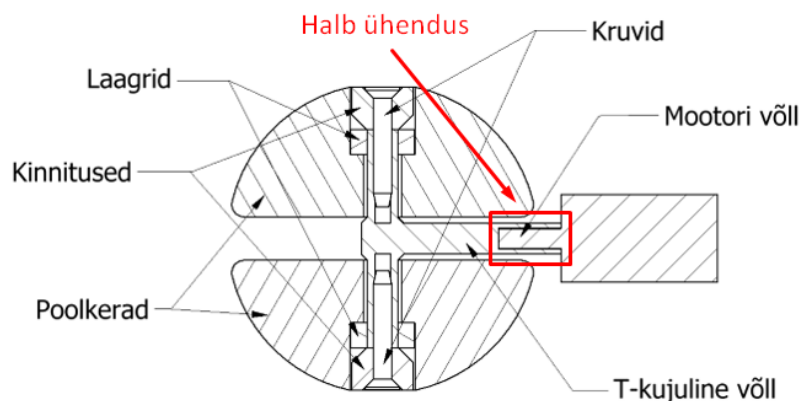
Prototüübi testimisel tekkisid probleemid, mis takistasid testimist. Esimene probleem tekkis ühe rattapaariga, sest need libisesid kontaktpinnal. Selline probleem tekkis rataste printimisvea ja ebatasase kontaktpinna tõttu. Selgus, et ühel rattapaaril oli kontaktpinnaga parem kontakt, teisel paaril aga halvem kontakt ja seega ei olnud hõõrdejõud liikumiseks piisav.

Lahendus on katta rattad kummiga, mis suurendab hõõrdumist ja kompenseerib ebatasasust. Iga liimipõhine tihendusmass sobib selleks hästi. Kasutati liimi- ja tihendusmassi tootjalt Kiilto Pro. Tihendusmass kanti käsitsi õhukese kihina ratastele. Tihendusmass kuivas pärast töötlemist umbes 6 tundi. Tulemus on toodud joonisel 3.1.



Joonis 3.1 Rattad liimi- ja tihendusmassi kihiga

Teine probleem oli halvas ühenduses mootori võlli ja T-kujulise võlli vahel, mis on näidatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2 Halb ühendus mootori võlli ja T-kujulise võlli vahel

Probleemi põhjustas see, et 3D-printer ei saa korralikult printida õhu kaudu, on vaja tuge printimiseks. T-kujulise võlli ühendus on samuti prinditud. Probleemi lahendamiseks kasutati kummiliimi, et luua töökindel ühendus.

3.2 Testimismetoodika kirjeldus

Prototüübi testimiseks kasutati siledat kuiva puitpinda ja mobiiltelefoni prototüübi juhtimiseks. Testiti mehhanismi käitumist erinevatel kiirustel ning liikumisel erinevas suunas.

Algul testiti esimest ja teist rattapaari eraldi. Uuriti haardumist rataste ja pinna vahel ratta erinevate asendite korral. Pärast testiti esimest ja teist rattapaari koos. Uuriti, millal ja kuidas rattapaari asend mõjutab teisele paarile. Tulemusi analüüsiti liikumishälbe suuruse järgi. Kasutati aritmeetilist keskmist liikumishälbe väärtuste (valem 3.1) ja liikumishälbe keskmise hajuvuse (valem 3.2) mehhanismi käitumise analüüsimiseks [16].

$$\bar{L} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{n} \quad (3.1)$$

kus \bar{L} – aritmeetiline keskmine liikumishälve,
 L – liikumishälve,
 n – katsete arv.

$$u(L) = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

kus $u(L)$ – liikumishälbe keskmine hajuvus,

L_{\max} – maksimaalne liikumishälve,

L_{\min} – minimaalne liikumishälve.

Märke (jooni) kasutati liikumishälbe mõõtmiseks. Prototüüp liikus 1 m joone suunas ning pärast mõõdeti liikumishälvet. Märgid on toodud joonisel 3.1.



Joonis 3.3 Märgid liikumishälbe mõõtmiseks

3.3 Tulemuste analüüsimine

Prototüüpi testiti järgmistes olukordades (märgitud numbriga):

- Sirgjooneline liikumine:
 - Kasutatakse esimest rattapaari:
 - Teise rattapaari asend: risti kontaktpinnaga (ei sega liikumisele):
 - 1) Väikese kiirusega liikumine.
 - 2) Suurema kiirusega liikumine.
 - 3) Teise rattapaari asend: rattad on kaldu kontaktpinnaga ja mõlemad rattad on pööratud samas suunas.

4) Teise rattapaari asend: rattad on kaldu kontaktpinnaga ja mõlemad rattad on pööratud erinevates suundades ning nurk on sama (nad kompenseerivad üksteist).

5) Teise rattapaari asend: rattad on paralleelselt (nad pidurdavad).

- Kasutatakse teist rattapaari:

- Esimese rattapaari asend: risti kontaktpinnaga (ei sega liikumisele):

- 6) Väikese kiirusega liikumine.

- 7) Suurema kiirusega liikumine.

- Diagonaallikumine:

- 8) Liikumine paremalt vasakule.

- 9) Liikumine vasakult paremale.

Iga olukorda mõõdeti kolm korda, mistõttu tulemused on ligikaudsed, aga piisavad, et uurida mehhanismi käitumist. Mõõtetulemused on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Mõõtetulemused testimisest

Olukorra number	Mõõtetulemused (cm)			Liikumishälbe aritmeetiline keskmine + keskmine hajuvus (cm)
	8	16	9	
1	8	16	9	$11 \pm 2,3$
2	17	17	18	$17.33 \pm 0,3$
3	80	136	103	$106.33 \pm 16,2$
4	24	22	16	20.67 ± 2.3
5	50	32	53	$45 \pm 6,1$
6	8	1	6	$5 \pm 2,0$
7	5	6	3	$4.67 \pm 0,9$
8	16	12	22	$16.67 \pm 2,9$
9	5	2	6	$4.33 \pm 1,2$

Tulemused näitavad, et rattad ei olnud täiesti ühesugused liikumishälbe väärtuse erinevuse tõttu. Liikumisel mõjutasid mittetöötava rattapaari asend ja mootorite staatori takistus liikumise täpsust. Testimist mõjutasid ka liikumise märgid, kuna nende paksus ei olnud null.

Testimine näitas, et prototüüp on täiesti juhitav. Kahe rattapaari kasutamine kompenseerib mehhanismi puudumist, kuid on vaja jälgida liikumissuunda. Sellega saab hakkama inimene, kes juhendab liikumist, või paigaldatud andurid, mis jälgivad liikumissuunda.

3.4 Kerakujulise ratta mehhanismi eelised ja puudused

Kerakujulise ratta mehhanismi uurimisel ja testimisel leiti nii eeliseid kui ka puudusi. Esimene eelis on mitmesuunalise liikumise võime. On lihtsam reguleerida liikumise suunda näiteks juhtnupu abil. Teine eelis on väike ruumivajadus manööverdabil. Manöövri tegemiseks pole vaja sõidukit pöörata, piisab, kui minna kohe õiges suunas. Kolmas eelis on töökiirus. Sõiduki pööramine võtab aega, mida saab kokku hoida, kui pööret ei tehta.

Esimene puudus on keeruline ülesehitus. Mehhanismi valmistamine ja hooldamine on raskem kui tavalise ratta mehhanismi puhul. Teine puudus on see, et tootmine nõuab suurt täpsust. Testimine näitas, et kui kerakujulised rattad on veidi erinevad, mõjutab see liikumise täpsust. Kolmas puudus on liikumissuuna jälgimise vajadus. Kuna paljud tegurid mõjutavad liikumise täpsust, on vaja jälgida liikumissuunda näiteks anduri või inimese (kui inimene juhendab sõidukit) abil. Eelised ja puudused on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2 Kerakujulise ratta mehhanismi eelised ja puudused

Nr	Eelised	Puudused
1	Mitmesuunalise liikumise võime	Keeruline ülesehitus
2	Vähe ruumivajadus manööverdabil	Tootmistäpsuse vajadus
3	Töökiirus	Liikumissuunda jälgimise vajadus

3.5 Kokkuvõte

Testimine näitas, et mehhanism töötab ja on täiesti juhitav. Testimise käigus ilmnisid mõned probleemid. Esimene probleem tekkis ühe rattapaariga, mis libises kontaktpinnal. Teine probleem oli halvas ühenduses mootori võlli ja T-kujulise võlli vahel, mis õnnestus edukalt lahendada. Mõõtmistulemuse põhjal selgitati välja, et liikumisel mittetöötava rattapaari asend mõjutab liikumise täpsust. Prototüübi testimistulemused olid rahuldavad, kuna testimisel selgus küll liikumishälve, kuid kahe rattapaari kasutamine kompenseeris mehhanismi puuduse, aga oli vaja jälgida liikumissuunda. Selleks sobivad nii kaugusandurid kui ka inimene.

Prototüüp on projekteeritud kasutamiseks siseruumides, kuid mehhanismi kontseptsiooni on võimalik kasutada erinevates valdkondades. See mehhanism sobib hästi selliseks tööks, kus on vaja palju manööverdada, ning annab palju eeliseid ja

võimalusi mitmesugustes töödes, näiteks laotöös, tööpingi teenindamises, veos, robotikas jne.

KOKKUVÕTE

Kerakujuline ratas on üldlahendus mitmesuunaliseks liikumiseks, sest kera võimaldab pöörata kõigis suundades. Mitmesuunalise liikumise võimalusi uurides on leitud, et parem variant on Omni kera mehhanism, võrreldes teiste mitmesuunalise liikumise mehhanismidega, nii et see võeti aluseks kontseptsiooni väljatöötamisel.

Uurimuse jaoks projekteeriti prototüüp, mis aitas parandada tekkinud vigasid mehhanismis ning selgitada välja sellise kerakujulise mehhanismi eelised ja puudused. Soovimatu hõõrdumise vältimiseks loodi kõrge kasuteguriga ülekandemehhanism ning kasutati laagreid. Arvutati väikseim aeg, millega prototüüp saab maksimaalse projekteeritud kiiruse saavutada ilma soovimatu libisemiseta kerakujulise ratta ja maapinna vahel. See aeg on umbes 0,3 s (maksimaalne projekteeritud kiirus on 1 m/s).

Prototüübi testimine näitas, et mehhanism töötab ja on täiesti juhitav. Testimise käigus tekkisid mõned probleemid. Esimene probleem tekkis ühe rattapaariga, mis libises kontaktpinnal. Teine probleem puudutas halba ühendust mootori võlli ja T-kujulise võlli vahel, mis lahendati edukalt. Mõõtmistulemuste põhjal selgitati välja, et liikumisel mittetöötava rattapaari asend mõjutab liikumise täpsust. Kahe rattapaari kasutamine kompenseerib mehhanismi puudumist, aga on vaja jälgida liikumissuunda. Selleks sobivad nii kaugusandurid kui ka inimene.

Projekteeritud mehhanismi uurimine näitas mehhanismi eeliseid ja puudusi. Mehhanismi eelisteks on mitmesuunalise liikumise võime, väike ruumivajadus manööverdusel ning töö kiirus. Puudusteks on keeruline ülesehitus, tootmistäpsuse vajadus ja liikumissuuna jälgimise vajadus.

Prototüüp on projekteeritud kasutamiseks siseruumides, kuid mehhanismi kontseptsiooni on võimalik kasutada erinevates valdkondades. Selle mehhanismi kontseptsioon sobib hästi selliseks tööks, kus on vaja palju manööverdada, ning annab palju eeliseid ja võimalusi mitmes vallas, näiteks laotöös, tööpingi teenindamises, veos, robotikas jne.

Lõputöö tulemus näitab, et loodud kerakujulise ratta mehhanism teeb oma tööd hästi ning mehhanismi kontseptsiooni saab kasutada paljudes valdkondades, kus on vaja palju manööverdada.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Chia-Wen Wu ja Chi-Kuang Hwang, „A novel spherical wheel driven by Omni wheels“, *2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Kunming, China, juuli 2008, lk 3800–3803, doi: 10.1109/ICMLC.2008.4621067.
- [2] „MHE0061-Loengukonspekt.pdf“. Vaadatud: veebr 21, 2021. [Online]. Available at: <http://www.tlu.ee/~saarsulo/masinaopetus/MHE0061-Loengukonspekt.pdf>.
- [3] Chia-Wen Wu, Kun-Shu Huang, ja Chi-Kuang Hwang, „A novel spherical wheel driven by chains with guiding wheels“, *2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Baoding, China, juuli 2009, lk 3242–3245, doi: 10.1109/ICMLC.2009.5212737.
- [4] K. Tadakuma ja R. Tadakuma, „Mechanical Design of `Omni-Ball`: Spherical Wheel for Holonomic Omnidirectional Motion“, *2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Scottsdale, AZ, USA, sept 2007, lk 788–794, doi: 10.1109/COASE.2007.4341852.
- [5] „EML2322L Drive Wheel Motor Torque Calculations.pdf“. Vaadatud: märts 03, 2021. [Online]. Available at: <https://mae.ufl.edu/designlab/motors/EML2322L%20Drive%20Wheel%20Motor%20Torque%20Calculations.pdf>.
- [6] „RPM Calculator - RPM to mph“. <https://www.omnicalculator.com/everyday-life/rpm> (vaadatud märts 13, 2021).
- [7] „GA12-N20.pdf“. Vaadatud: märts 01, 2021. [Online]. Available at: https://www.handsontec.com/dataspecs/motor_fan/GA12-N20.pdf.
- [8] „arduino-nano.pdf“. Vaadatud: märts 26, 2021. [Online]. Available at: <https://www.handsontec.com/dataspecs/arduino-nano.pdf>.
- [9] „L298N Motor Driver.pdf“. Vaadatud: märts 26, 2021. [Online]. Available at: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/L298N%20Motor%20Driver.pdf>.
- [10] „HC-06 Bluetooth Serial Module – HandsOn Tech“. <https://handsontec.com/index.php/product/hc-06-bluetooth-serial-module/> (vaadatud märts 26, 2021).

- [11] „2.24€ 59% OFF|100% New Original NCR18650B 3.7 v 3400mah 18650 Lithium Rechargeable Battery For Flashlight batteries|rechargeable battery|battery forbattery rechargeable - AliExpress“, *aliexpress.com*.
[//www.aliexpress.com/item/32324914059.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://www.aliexpress.com/item/32324914059.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) (vaadatud märts 27, 2021).
- [12] „0.79€ 13% OFF|0.56 Inch Mini Red Green Blue LED Display Panel Voltage Meter Voltmeter Home Use Voltage 3 Three Digital DC 4.5V 30V 2 / 3 Wires|Integrated Circuits| - AliExpress“, *aliexpress.com*.
[//www.aliexpress.com/item/4001287684748.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://www.aliexpress.com/item/4001287684748.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) (vaadatud märts 26, 2021).
- [13] „1.98€ 9% OFF|10pc Blue Mini MTS 102 3 Pin SPDT ON ON 6A 125VAC Miniature Toggle Switches|mini mini|mini toggle switchmini switch - AliExpress“, *aliexpress.com*.
[//www.aliexpress.com/item/32841472290.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://www.aliexpress.com/item/32841472290.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) (vaadatud märts 27, 2021).
- [14] „Blynk“. <https://blynk.io> (vaadatud apr 01, 2021).
- [15] „Choosing Infill Percentage For 3D Printed Parts“, *3DPros*. <https://www.3dpros.com/choosing-infill-for-3d-printed-parts> (vaadatud märts 04, 2021).
- [16] R. Laaneots ja O. Mathiesen, *Mõõtmise alused*, TTÜ kirjastus. Tallinn.
- [17] „EML2322L -- Friction Coefficients“.
<https://mae.ufl.edu/designlab/Class%20Projects/Background%20Information/Friction%20coefficients.htm> (vaadatud märts 14, 2021).

LISAD

Lisa 1 Kasutatud tabelid

Lisa 2 Komponentide pildid

Lisa 3 Programmikood

Lisa 1 Kasutatud tabelid

Tabel L1.1 Pinna hõõrdetegur plastimassist rataste jaoks [5]



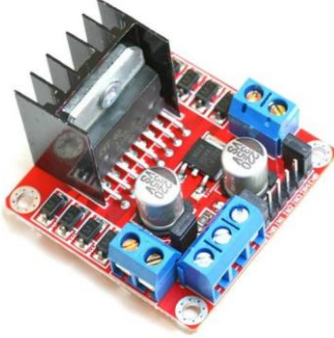
Nr	Kontaktpind	C_{sf}
1	Betoon (hea / õiglane / halb)	0,010 / 0,015 / 0,020
2	Asfalt (hea / õiglane / halb)	0,012 / 0,017 / 0,022
3	Puit (kuiv / tolmune / märg)	0,010 / 0,005 / 0,001
4	Lumi (2 tolli / 4 tolli)	0,025 / 0,037
5	Mustus (sile / liivane)	0,025 / 0,037
6	Muda (kõva / keskmine / pehme)	0,037 / 0,090 / 0,150
7	Rohi (kõva / pehme)	0,055 / 0,075
8	Liiv (kõva / pehme / düün)	0,060 / 0,150 / 0,300

Tabel L1.2 Staatilised hõõrdetegurid erinevate rataste materjalide ja pindade vahel [17]




Nr	Materjali kombinatsioon	μ_s
1	Pehme kumm kuival betoonil	0,85
2	Kõva kumm kuival betoonil	0,6
3	Pehme plastmass kuival betoonil	0,6
4	Kõva plastistmass kuival betoonil	0,3
5	Pehme kumm kuival puidul	0,95
6	Kõva kumm kuival puidul	0,7
7	Pehme plastmass kuival puidul	0,7
8	Kõva plastmass kuival puidul	0,4

Lisa 2 Komponentide pildid

Tabel L2.1 komponentide loetelu

Komponendi nimetus	Komponendi pilt	Allikas
Mootor GA12-N20 6V		[7]
Kontrolleriplaat <i>Arduino Nano</i>		[8]
Mootori kontrolleri L298N		[9]

Tabel L2.1 järg

Komponendi nimetus	Komponendi pilt	Allikas
Liitiumioonakud NCR18650B		[11]
Voltmeeter ekraaniga		[12]
Lüliti		[13]

Lisa 3 Programmkood

```
#define BLYNK_USE_DIRECT_CONNECT

#include <SoftwareSerial.h>
#include <BlynkSimpleSerialBLE.h>

#define BLYNK_PRINT DebugSerial
#define motor1pin1 2
#define motor1pin2 3
#define motor2pin1 4
#define motor2pin2 5
#define motor1speed 9
#define motor2speed 10

char auth[] = "AuVALppHEzA46WoQeR43_BwzBPKMo_mq";

SoftwareSerial DebugSerial(0, 1); // RX, TX

BLYNK_WRITE(V0)
{
  byte y = param[0].asInt();
  byte a;
  Serial.print("Y = ");
  Serial.println(y);

  if(y > 128)
  {
    a = (y-128)*2;
    digitalWrite(motor1pin1, HIGH);
    digitalWrite(motor1pin2, LOW);
    analogWrite(motor1speed, a);
  }
  else if(y < 128)
  {
    a = 255-(y*2);
    digitalWrite(motor1pin1, LOW);
    digitalWrite(motor1pin2, HIGH);
    analogWrite(motor1speed, a);
  }
  else if(y == 128){
    digitalWrite(motor1pin1, LOW);
    digitalWrite(motor1pin2, LOW);
    analogWrite(motor1speed, 0);
  }
}

BLYNK_WRITE(V1)
{
  byte x = param[0].asInt();
  byte a;
  Serial.print("X = ");
  Serial.println(x);
}
```

```

if(x > 128)
{
a = (x-128)*2;
digitalWrite(motor2pin1, HIGH);
digitalWrite(motor2pin2, LOW);
analogWrite(motor2speed, a);
}
else if(x < 128)
{
a = 255-(x*2);
digitalWrite(motor2pin1, LOW);
digitalWrite(motor2pin2, HIGH);
analogWrite(motor2speed, a);
}
else if(x == 128){
digitalWrite(motor2pin1, LOW);
digitalWrite(motor2pin2, LOW);
analogWrite(motor2speed, 0);
}
}
void setup()
{
// Debug console
pinMode(motor1pin1, OUTPUT);
pinMode(motor1pin2, OUTPUT);
pinMode(motor2pin1, OUTPUT);
pinMode(motor2pin2, OUTPUT);
pinMode(motor1speed, OUTPUT);
pinMode(motor2speed, OUTPUT);

DebugSerial.begin(9600);

DebugSerial.println("Waiting for connections...");

// Blynk will work through Serial
// 9600 is for HC-06. For HC-05 default speed is 38400
// Do not read or write this serial manually in your sketch
Serial.begin(9600);
Blynk.begin(Serial, auth);
}

void loop()
{
Blynk.run();
}

```