



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## **ELEKTRILINE MAASTIKURULA**

### **ELECTRIC MOUNTAINBOARD**

#### **BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Karl Merisalu

Üliõpilaskood: 179507EAAB

Juhendaja: Heigo Mölder, PhD

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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Karl Merisalu

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Elektriline maastikurula“, mille juhendaja on Heigo Mölder,
  - 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)

---

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

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Karl Merisalu

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Elektriline maastikurula

*Kuupäev:*  
21.12.2021

*63 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Heigo Mölder, PhD

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua elektriline maastikurula, millel on ka olemas esi- ja tagatuled pimedas liiklemise jaoks. Peamisteks uurimismeetoditeks olid olemasolevate lahenduste uurimine ja analüüsimine, mõõtmine, modelleerimine ja katsetamine.

Lähtetingimused maastikurula konstrueerimiseks olid järgnevad: sõiduk peab olema piisavalt kerge, et seda käes kanda; võimaldama sõitu maastikul; võimeline kandma kuni 100 kg kaaluga juhti maastikul; suutma üles minna 10° tõusunurgast; läbima ühe akulaadimisega vähemalt 30 km; võimaldama sõita 25 km/h. Sõiduk pidi olema juhitav juhtmevaba puldiga ning selle lõplik mass pidi olema väiksem kui 20 kg.

Elektriliseks ümberehitatud maastikurula võimaldas sõita erinevates oludes: pehmetel pinnastel (nt pinnasteed ja rohumaad) ja kõvematel pinnastel, nagu kruusateedel, munakiviteedel ning asfaltteedel. Sõiduk on vetthülgiv ning sellega sai sõita ka vihmase ilmaga. Selle lõplikuks kaaluks kujunes 15 kg. Sõidukil on funktsioneerivad esi- ja tagatuled. Mootorite maksimaalne elektriline võimsus on kokku 2800 W. Sõiduki tippkiirus on piiratud 25 km/h peale ning elektrilist võimsust piirati vajadusel 1000 W peale liikluses liiklemiseks. Pikim vahemaa, mis läbiti ühe akulaadimisega oli 33 km. Mäest üles sõitmine stabiilsel kiirusel oli rahuldav, kuid järseima koha (10° tõusunurga) pealt sõidu alustamine oli küll võimalik, kuid raskendatud. Sõiduki nõrgeimaks lüliks osutus ülekande ja mootorite kinnitus rula väändteljele. Lõplik sõiduk vastas lähtetingimustele ning seda arendatakse tulevikus edasi, et muuta see vastupidavamaks ning mugavamaks.

*Märksõnad:* rula, elektriline, maastikurula, elektrisõiduk, elektrimootor

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Karl Merisalu <i>Title:</i> Electric mountainboard	<i>Type of the work:</i> Bachelor's thesis
<i>Date:</i> 21.12.2021	63 pages (the number of thesis pages including appendices)
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>School:</i> School of Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Heigo Mölder, PhD	
<p>The purpose of this bachelor's thesis was to create an electric mountainboard, which also has front and rear lights for driving in the dark. The main research methods were exploring and analysing existing solutions, measuring, modelling and testing.</p> <p>The set conditions for the electric conversion of the mountainboard are as follows: the vehicle must be light enough to carry it in hand; it must be able to drive on terrain; it must be able to carry a driver with a weight of up to 100 kg on the terrain; it must be able to go upwards from an angle of 10°; it must pass through at least 30 km with one battery charge; it must be able to drive 25 km/h. The vehicle had to be controlled by a wireless remote control and its final mass had to be less than 20 kg.</p> <p>The constructed electric mountainboard allowed to drive in different conditions: on soft soils (e.g. soil roads and grasslands) and on tougher soils such as gravel roads, egg stone roads and asphalt roads. The vehicle is water repellent and it can also be driven in rainy weather. Its final weight is 15 kg. The vehicle has functional front and rear lights. The maximum electric power of the engines is 2800 W. The maximum speed of the vehicle is limited to 25 km/h and the electric power was limited to 1000 W for driving in traffic. The longest distance travelled with one battery charge was 33 km. Driving up the hill at a steady speed was satisfactory, but starting from a standstill on the steepest point (10° inclination) was possible but difficult. The weakest link in the system is the attachment of the transmission to the tilt axle of the mountainboard. The final vehicle met the conditions and will be developed further in the future to make it more reliable and comfortable.</p>	
<i>Keywords:</i> skateboard, electric, mountainboard, electrically powered vehicle, electric motor	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Elektriline maastikurula**  
Lõputöö teema inglise keeles: **Electric mountainboard**  
Üliõpilane: **Karl Merisalu, 179507EAAB**  
Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**  
Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**  
Lõputöö juhendaja: **Heigo Mölder**

Lõputöö ülesande  
kehtivusaeg:

2020/2021 2021/2022 Sügis

Lõputöö esitamise tähtaeg: **21.12.21**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Maastikurula annab oluliselt enam vabadust liigeldes raskesti ligipääsetavates kohtades, kuhu autoga ei pääse või muu sõidukiga on ebamugav. Lisaks saab rula lihtsa vaevaga endaga kaasas kanda, nii ühistranspordis kui ka mujal. Tavapärane maastikurula on loodud eelkõige mäest alla sõitmiseks - elektriliseks ümberehitamine võimaldab sõita peaaegu igal pool. Samuti funktsionaalsete tulede lisamine tagab ohutuma liiklemise linnas. Maastikurula ehitamine annab võimaluse kogu tootmisprotsessi koos insener-arvutustega läbi käia ja ehitada sõiduk vastavalt autori poolt püstitatud nõuetele.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on luua elektriline maastikurula, millel on ka olemas esi- ja tagatuled pimedas liiklemise jaoks ning mis vastab püstitatud nõuetele.

### **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

Millist lahendust kasutada mootorite kinnitamisel?

Millist tüüpi ülekannet kasutada?

Millist mootori juhtmoodulit kasutada?

Milline on kõige optimaalsem aku valik?

Milline on optimaalne maastikurula kaal?

Millist lahendust kasutada tulede juhtsüsteemiks ja tarkvara arendamiseks?

Millist lahendust valida elektroonika karbi ja akude ümbrise puhul?

### **4. Lähteandmed**

Lähteandmeid saadakse tutvudes olemasolevate lahendustega ja neid analüüsides.

Lähtetingimused maastikurula konstrueerimiseks on järgnevad: sõiduk peab olema piisavalt kerge, et seda käes kanda; võimeline kandma kuni 100 kg kaaluga juhti maastikul; suutma üles minna 10° kraadisest tõusust; läbima ühe akulaadimisega vähemalt 30 km; võimaldama sõita 25 km/h.

### **5. Uurimismeetodid**

Peamisteks uurimismeetoditeks on olemasolevate lahenduste uurimine ja analüüsimine, mõõtmine, modelleerimine ja katsetamine.

### **6. Graafiline osa**

Olulisemad skeemid ja joonised tulevad töö põhiossa.

1. 3D mudelid
2. Tulede süsteemi plokk skeem
3. Elektriskeemid
4. Joonised erinevatest konstruktsiooni etappidest

## 7. Töö struktuur

- ÜLESANDE PÜSTITUS
  - Nõuded ja analüüs
  - Maastikurula valik
  - Elektroonika komponendid
    - Mootori valik
    - Mootori juhtmoodul
    - Puldi valik
    - Aku valik
    - Aku laadimise ja balansseerimise lahendus
    - Jõuelektronika lülitus-komponentide valik
    - Tulede süsteem
  - Ülekanne
- KONSTRUKTSIOON JA SELLE ANALÜÜS
  - Mehhaanika
    - Mootori kinnitus ja ülekanne
    - Ülekande arendus
    - Elektroonikakarp ja selle kinnitus
    - Aku ümbris
  - Elektroonika
    - Akupakk
    - Transistorlülitid
    - Esi- ja tagatuled
    - Tulede kontrolleri programmeerimine
    - Mootori juhtmoodulite seadistamine
- LÕPPTULEMUS
- KOKKUVÕTE

## 8. Kasutatud kirjanduse allikad

*Kursuse ATV0080 Toitemuundurid ja masinate juhtimine materjalid* [Anton Rassõlkin]

*Kursuse ATR0110 Analoog- ja digitaaltehnikate materjalid* [Lauri Kütt]

*Kursuse MHK0150 Süsteemi dünaamika materjalid* [Leo Teder]

*Liiklusseadus*

Asjakohased foorumid analüüsimiseks

Erialaline kirjandus ning artikleid

## 9. Lõputöö konsultandid

Lõputöö konsultandid selguvad töö tegemise käigus.



## **10. Töö etapid ja ajakava**

- Läheandmete kogumine ja analüüs (01.05.21)
- Mõõtmine, modelleerimine ja arvutamine (10.05.21)
- Komponentide valimine (20.05.21)
- Teoreetilise osa kirjutamine (20.05.21)
- Ehitamine ja tulemuste protokoll (01.06.21-01.07.21)
- Katsetamine, proovisõidud, tekkinud tõrgete lahendamine (01.07.21-01.08.21)
- Tulemuste ja järelduste kirjutamine (01.07.21-01.09.21)
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine (05.09.21)
- Teooria kirjutamine ja paranduste tegemine (05.09.21-25.09.21)
- Juhendajale teist korda läbilugemiseks saatmine (25.09.21)
- Teooria kirjutamine ja paranduste tegemine (25.09.21-07.10.21)
- Töö esmane versioon valmis (07.10.21)
- Kokkuvõtte koostamine (07.10.21)
- Juhendajale kolmandat korda läbilugemiseks saatmine (14.10.21)
- Teooria kirjutamine ja paranduste tegemine (14.10.21-01.11.21)
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine (01.11.21)
- Paranduste sisseviimine (01.11.21-20.12.21)
- Töö lõplik versioon valmis (20.12.21)
- Köidetud ja allkirjastatud lõputöö esitamine (21.12.21)
- Lõputöö elektroonilise versiooni esitamine (21.12.21)
- Kaitsmine (17.01.22-20.01.22)

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	12
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	13
SISSEJUHATUS .....	15
1. ÜLESANDE PÜSTITUS .....	17
1.1. Nõuded ja analüüs .....	17
1.2. Maastikurula valik .....	18
1.3. Elektroonika komponendid .....	19
1.3.1. Mootori valik .....	19
1.3.2. Mootori juhtmoodul .....	23
1.3.3. Puldi valik .....	25
1.3.4. Aku valik.....	25
1.3.5. Aku laadimise ja balansseerimise lahendus .....	28
1.3.6. Jõuelektronika lülitus-komponentide valik .....	30
1.3.7. Tulede süsteem .....	32
1.4. Ülekanne .....	34
2. KONSTRUKTSIOON JA SELLE ANALÜÜS .....	36
2.1. Mehaanika .....	36
2.1.1. Mootori kinnitus ja ülekanne.....	36
2.1.2. Ülekande arendus .....	38
2.1.3. Elektroonikakarp ja selle kinnitus .....	42
2.1.4. Aku ümbris .....	42
2.2. Elektroonika .....	43
2.2.1. Akupakk .....	43
2.2.2. Transistorlüliti .....	45
2.2.3. Esi- ja tagatuled .....	46
2.2.4. Tulede kontrolleri programmeerimine .....	48
2.2.5. Mootori juhtmoodulite seadistamine .....	49
3. LÕPPTULEMUS.....	51
KOKKUVÕTE .....	54
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	56
LISAD .....	59
Lisa 1. Elektroonikaskeem .....	60
Lisa 2. Arvutuste skript .....	61

Lisa 3. Tulede kood .....62

## **EESSÕNA**

Käesoleva lõputöö idee tekkis autoril pärast esimese elektrirula valmimist. Tavalise elektrirulaga sõites ebatasastel kergliiklusteedel on tekkivate vibratsioonide tõttu ebameeldiv sõita ning lisaks ei võimalda tavaline elektrirula maastikusõitu. Seetõttu otsustas autor ehitada elektrilise maastikurula, mis võimaldaks liigelda ka kohtades, kuhu tavalise elektrirulaga varasemalt ligi ei pääsenud.

Autor tänab bakalaureusetöö juhendajat Heigo Mõlderit väärt nõuannete ja soovitude eest.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

C – ratta ümbermõõt

$D_{ratas}$  - ratta diameeter

$E_{akuNimi}$  - aku nimipinge

FOC – (field oriented *control*) vektorjuhtimine

$F_{ratas}$  - nõutud jõud ratastel

HW – (*hardware*) riistvara

$I_{aku}$  - aku pidev voolutaluvus

$I_{akuElement}$  - akuelemendi pidev voolutaluvus

$I_{laadija}$  - akulaadija voolutugevus

$I_{max}$  - süsteemi maksimaalne voolutugevus

$K_v$  – koormuseta mootori pöörlemissagedust kirjeldav parameeter

MOSFET – metall-oksiid-pooljuht väljatransistor

$m_{aku}$  - akuelementide mass kokku

$m_{element}$  - akuelemendi mass

$m_{kokku}$  - sõiduki kogumass koos sõitjaga

$n_{elementiJadas}$  - akuelementide hulk jadaühenduses

$n_{elementiKokku}$  - akuelementide hulk kokku

$n_{elementiParal}$  - akuelementide hulk paralleelühenduses

$n_{tJmootor}$  - jõuvõllil mootori poolse hammasratta hammaste hulk

$n_{tJratas}$  - jõuvõllil ratta poolse hammasratta hammaste hulk

$n_{tmootor}$  - mootori külge kinnituva hammasratta hammaste hulk

$n_{transistor}$  - transistoride hulk paralleelühenduses

$n_{tratas}$  - ratta külge kinnituva hammasratta hammaste hulk

$n_m$  - mootori pöörlemissagedus

$n_{mootor}$  - nõutud mootori pöörlemissagedus

$n_{ratas}$  - nõutud ratta pöörlemissagedus

PETG – plastmaterjal polüeteentereftalaat

PLA - plastmaterjal polüpiimhape

PU – polümeer polüuretaan

PWM - pulsilaiusmodulatsioon

$P_m$  - mootori maksimaalne võimsus

$P_{tKadu}$  - transistorlüliti transistoride kaovõimsus

$q_{aku}$  - aku mahutavus

$q_{akuElement}$  - akuelemendi mahutavus

$R_{ds(on)}$  - transistori sisetakistus juhtivas olekus

$R_{rööbiti}$  - transistorlüliti rööbiti paigutatud transistoride sisetakistus

$S_{hinnanguline}$  - hinnanguline sõidukiga läbitav vahemaa  
 $T_m$  - mootori maksimaalne mehhaaniline väändemoment  
 $T_{mootor(n1)}$  - mootori nõutud mehhaaniline väändemoment  
 $T_{ratas}$  - minimaalne vajalik väändemoment ratastel  
 $t_{laadija}$  - hinnanguline ajakulu akude peaaegu täislaadimiseks  
 $U_{pjSisend}$  - transistorlüüti pingejaguri sisendpinge  
 $U_{pjVäljund}$  - transistorlüüti pingejaguri väljundpinge  
 $u_{optimaalne}$  - optimaalne ülekandesuhe  
 $u_{reduktor}$  - ülekande ülekandetegur  
 $u_{ük}$  - hinnanguline ülekandetegur arvutusteks  
VESC® - (*vedder electronic speed controller*) mootori juhtmooduli nimetus  
 $V_{ds}$  - transistori maksimaalne lubatud pinge läte ja neelu vahel  
 $V_{gs(th)}$  - transistori juhtimiseks minimaalne nõutud pinge paisu ja läte vahel  
 $V_{gs}$  - transistori juhtimiseks maksimaalne lubatud pinge paisu ja läte vahel  
 $v_{akuNimi}$  - sõiduki lõplik maksimaalne kiirus aku nimipingel  
 $v_{max}$  - maksimaalne lubatud kiirus  
 $v_{teoreetiline}$  - hinnanguline sõiduki kiirus  
 $W_{aku}$  - nõutud aku energiasisaldus  
 $W_{t hinnanguline}$  - hinnanguline sõiduki energiakulu  
 $\eta_{ülekanne}$  - ülekande hinnanguline kasutegur  
 $\eta_{mootor}$  - mootori hinnanguline kasutegur  
 $\eta_{sõiduk}$  - sõiduki hinnanguline kasutegur

## SISSEJUHATUS

Maastikurula, nagu nimigi viitab, on rulatüüp, mis on mõeldud liiklemiseks maastikul. Rula on neljarattaline sõiduk, mille põhidetallide hulka kuuluvad rulalaud, väändteljed (ehk „trukid“) ja neli ratast. Rulalauale kinnitub kaks väändtelge, millele omakorda kinnituvad rattad. Võrreldes rulaga (Joonis 1) on maastikurulal pikem rulalaud, suuremad rehvid ja väändteljed. Lisaks saab kinnitada enamikele maastikuruladele ketaspiduritel põhineva süsteemi, et piirata allamäge sõites kiirust. Suuremad rehvid võimaldavad maastikusõitu, pakkudes maapinnaga paremat kontaktpinda ja suuremat kliirensit.

Maastikurula loomine sai arvatavasti alguse lumelaudurite soovist sõita ka siis, kui lund ei ole [1]. Usutakse, et sarnasel põhjusel disainiti ka rula surfarite poolt, et nad saaksid sporti teha tuulevaiksel perioodil. Küll aga spekuleeriti selle üle, kas surfarid ikkagi leiutasid rula või mitte, sest sarnaseid disaine on avastatud ka varasematest perioodidest [2]. Tavapärane maastikurula on loodud eelkõige allamäge sõitmiseks - elektriliseks ümberehitamine võimaldab sõita ka ülesmäe.



Joonis 1. Maastikurula (vasakul) ja rula (paremal) kõrvuti [3] [4]

Kergliikurid on muutunud üha enam populaarsemaks, sest need võimaldavad transporti tihtilugu kiiremalt ja mugavamalt kui muud sõiduvahendid. Linnapildis võib aina rohkem näha ringi liikumas elektrilisi tõukerattaid, rattaid, rulasid ja muid kergliikureid.

Elektrirulas kasutatavad põhiosad on järgnevad: rula, mootor ja selle juhtmoodul, ülekanne, aku ning juhtmevaba pult. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua elektriline maastikurula, millel on ka olemas esi- ja tagatuled pimedas liiklemise jaoks.

Töös antakse esmalt ülevaade maastikurula elektriliseks ümberehitamiseks vajaminevatest komponentidest. Seejärel käsitletakse maastikurula ehitamise protsessi ja katsetamist. Peamisteks uurimismeetoditeks on olemasolevate lahenduste uurimine ja analüüsimine, mõõtmine, modelleerimine ja katsetamine. Arvutusi tehti programmiga GNU *Octave*. Mudelid loodi modelleerimistarkvaraga *Autodesk Inventor* ning jooniste koostamiseks kasutati programme *GIMP* ja *Inkscape*. Elektriskeemid loodi programmis *KiCad*. Arvutuste skript on välja toodud Lisas 2. Töös mainitud komponentide hinnad on esitatud eurodes, mis arvutati ümber USA dollaritest lähtudes 19.12.2021 kella 09:52 UTC vahetuskursist.

Lihtsustamaks arusaama rula ehitamisega seotud protsessist koostati ülevaatlik skeem, mis on toodud Joonisel 2. Antud joonisel on kajastatud rula ehitamisega seotud komponendid, nende asukohad rulal ning peatükid, mis neid käsitlevad.



- A** - Mootorid  
(peatükk 1.3.1)
- B** - Mootorikinnitus ja ülekanne  
(peatükk 1.4)  
(peatükk 2.1.1)  
(peatükk 2.1.2)
- C** - Elektroonikakarp  
(peatükk 1.3.2)  
(peatükk 1.3.6)  
(peatükk 2.1.3)  
(peatükk 2.2.2)  
(peatükk 2.2.5)
- D** - Maastikurula  
(peatükk 1.2)
- E** - Aku  
(peatükk 1.3.4)  
(peatükk 2.1.4)  
(peatükk 2.2.1)
- F** - Pult  
(peatükk 1.3.3)
- G** - Esi- ja tagatuled  
(peatükk 1.3.7)  
(peatükk 2.2.3)  
(peatükk 2.2.4)

Joonis 2. Maastikurula ehitamisega seotud komponendid, nende asukohad rulal ja neid kirjeldavad peatükid



# 1. ÜLESANDE PÜSTITUS

Maastikurula elektriliseks ümberehitamiseks on tarvis esmalt püstitada nõuded ning teha vajalikud arvutused, et saaks valida sobivad komponendid, mis täidavad lähtetingimusi. Lähtetingimused maastikurula konstrueerimiseks on järgnevad:

- sõiduk peab olema piisavalt kerge, et seda käes kanda;
- võimaldama sõitu maastikul;
- võimeline kandma kuni 100 kg kaaluga juhti maastikul;
- suutma üles minna 10° tõusunurgast;
- läbima ühe akulaadimisega vähemalt 30 km;
- võimaldama sõita 25 km/h.

Sõiduk peab olema juhitud juhtmevaba puldiga ning selle lõplik mass peab olema väiksem kui 20 kg, sest teisel juhul muutuks selle käes kandmine autori arvates ebameeldivaks.

## 1.1. Nõuded ja analüüs

Maastikurula elektriliseks ümberehitamise jaoks on esmalt vaja välja valida selleks vajalikud komponendid. Enne komponentide valimist on tarvis välja arvutada lähteparameetrid arvestades eelnevalt püstitatud nõudeid. Samuti peab silmas pidama ka kergliikuritele kehtivaid liikluspiiranguid. Vastavalt Liiklusseadusele [5] võib liikluses liigelda kergliikur, mille tippkiirus ja mootori võimsus ei ületa 25 km/h ja 1000 W. Antud võimsuse piirang muudaks maastikul liiklemise raskemaks, seega valitud mootorite juhtmoodulid peavad võimaldama piirangute sätestamist tarkvaraliselt erinevates oludes liiklemiseks.

Komponentide ja materjalide valimisel peab arvestama ka nende kaaluga, et kogu sõiduki mass oleks võimalikult väike. Oluline on ka arvesse võtta sõitja mass, et valida õigete parameetritega mootorid, mis suudaks sõitjat vedada vastavalt töös sätestatud lähtetingimustele. Samuti peavad valitud komponendid olema võimalikult hea hinna ja kvaliteedi suhtega, et maastikurula isehitamine oleks majanduslikult mõistlik.

Akumulaator peab võimaldama sõita ühe laadimisega vähemalt 30 km ning seejuures olema võimalikult kõrge energia mahutavuse ja madala massiga. Aku konstrueerimiseks kasutatakse liitiumakuelemente, mille tüüpiline nimipinge on 3,5 V, sest nii saab luua nõudeid rahuldavate omadustega akupaki, mis koosneb mitmetest jadamisi ühendatud elementidest kõrgema nimipinge saavutamiseks. Selliste kergliikurite isehitamise puhul on enamjaolt kasutusel liitiumakud, millel on 6 kuni 12 akuelementi jadaühenduses. Kasutatakse ka kõrgema pingega akusid, kuid see

muudaks sellel töötava elektroonika keerukamaks ja hinna kallimaks. Akust tarbitav võimsus on selle pinge ja voolutugevuse korrutis, ehk tõstes süsteemi toitepinget, langeb selle voolutugevus konstantse võimsuse puhul. Elektrisüsteemis esinevad kaod sõltuvad juhtide takistusest ja neid läbivast voolutugevusest – juhtmetes ja teistes juhtides esinevad kaod vähenevad koos elektrivoolutugevusega, sest juhil esinev pingelang on võrdeline selle sisetakistuse ja voolu korrutisega. Seetõttu otsustati disainida aku, millel on 12 liitiumakuelementi jadas, et selle nimipinge oleks kõrge ja seeläbi elektrisüsteemis tekkivad kaod võimalikult madalad. Tüüpiline 3,5 V nimipingega liitiumioonaku töötab pingevahemikus 3,3 V ja 4,2 V, seega 12 sellist akuelementi jadaühenduses annavad kokku süsteemi nimipingeks 42 V ning minimaal- ja maksimaalpinge mis on 39,6 V ja 50,4 V vastavalt.

Ülekanne, mis ühendab rattad ja mootorid, peab olema vastupidav ning võimaldama maastikusõitu, kuna väliselemendid, nagu oksad, kivikesed jm võivad sattuda ülekanne vahele ja selle tööd segada.

## 1.2. Maastikurula valik

Maastikurula, mida hakati elektriliseks ümber ehitama, peab olema võimalikult kerge ja majanduslikult mõistlik. Sõiduvahendi valik tehti firma MBS tootevaliku hulgast, sest antud tootja on üks vanemaid ja tuntumaid maastikurulade valmistajaid. Antud firma tootevalik ei ole kõige suurem, seega maastikurula valiti eelkõige hinnaklassi järgi võttes arvesse eelnevalt püstitatud nõudeid. Valik tehti kahe järgneva maastikurula hulgast: MBS Colt 90 Constellation ja MBS Comp 95 Constellation (Joonis 1.1).



Joonis 1.1 Maastikurulad MBS Colt 90 (vasakul) ja MBS Comp 95 (paremal) [3] [6]

Peamine erinevus võrreldavatel maastikuruladel seisneb nende väändtelgede ehituses – kui Colt 90 kasutab tavalisele rulale sarnast väändtelje süsteemi, siis Comp 95 on varustatud uuendatud modernsete trukkidega, mis pakuvad sõitjale rohkem stabiilsust ja kontrolli sõiduki üle. Erinevus tuleneb pukside paigutusest – maastikurula Comp 95 muudab stabiilemaks trukkides kasutatavate pukside paigutus, mis on paigutatud mõlemale väändtelje poolele, mitte väändtelje keskele nagu tavapärasel trakkidel.

Maastikurulaks, mida hakati elektriliseks ümber ehitama, otsustati valida MBS Colt 90, sest see on majanduslikult mõistlik algajale, kes soovib tutvuda rulasõiduga maastikul.

### **1.3. Elektroonika komponendid**

Järgnevalt on kirjeldatud elektroonika komponentide valikut. Komponente valiti loogilises järjekorras lähtudes tehtud arvutuste käigust.

#### **1.3.1. Mootori valik**

Selleks, et rulaga saaks hõlpsasti maastikul sõita, peab valima piisavalt suure võimsusega, kompaktsed ja kaalult kerged mootorid. Töö raames otsustati maastikurulal kasutada kahte mootorit nii, et mõlemad tagumised rattad oleksid vedavad, sest siis on maastikul läbitavus parem kui üherattalise veoga sõidukil.

Peamiselt kasutatavad alalisvoolu mootorid jagunevad kahte kategooriasse: harjadega ja harjadeta. Harjadega mootori peamine eelis on selle juhtimise lihtsus, kuid harjade olemasolu tõttu nõuavad nad perioodilist puhastust või harjade vahetust. Harjadeta mootor on kompaktsem, efektiivsem ja nõuab vähe hooldust tänu harjade ning nendest tulenevate kadude puudumisele. Harjadeta mootor nõuab keerukama ehitusega juhtmoodulit ning seega oleks lõplik süsteem maksumuselt kallim, kuid samas kaaluks vähem, oleks võimsam ja kompaktsem kui sarnane harjadega mootori süsteem. Seega otsustati valik teha harjadeta alalisvoolu mootorite hulgast. [7]

Enne arvutuste teostamist uuriti harjadeta alalisvoolumootori karakteristikuid. Leiti, et valitud harjadeta alalisvoolu mootori tüübi puhul (kolmefaasiline, väljaspoole paigutatud rootoriga) on selle voolutugevus ja väändemoment ning lisaks ka toitepinge ja pöörlemissagedus omavahel lineaarses suhtes. See tähendab, et mootori talitlusel erinevatel pöörlemiskiirustel jääb väändemoment konstantse voolutugevuse

puhul samaks ning pöörlemissagedusega peab suurenema ka mootori toitepinge. Sellest saab ka järeldada, et antud mootori tippkiiruse defineerib alalisvoolu süsteemis selle toitepinge (eeldusel, et toitepinge ei ületa mootori maksimaalseid lubatud parameetreid). Tegu on sünkroonmasinaga, mille staatori kommutatsiooni sagedus on alati sünkroniseeritud rootori pöörlemissagedusega. Pöörlemissagedust muudetakse reguleerides mootori väändemomenti (ehk volutugevust). Tähtis on mainida, et antud lõik kirjeldab kadudeta masinat – päriselus esinevad kaod mõjutavad ka mootori talitlust. Kadude mõju antud süsteemile saab hinnata seda koormates ning antud süsteemis koormuse lisamisel väheneb mootori pöörlemissagedus. Antud töö raames kasutati arvutusteks mootori kasutegurit  $\eta_{mootor} = 0,85$ , mis kirjeldab hinnangulist mootori efektiivsust elektrienergia ümbermuutmisel mehhaaniliseks energiaks.

Esiälgu arvutati vajalik mootori väändemoment, et kanda  $10^\circ$  tõusunurgast üles 100 kg massiga juhti. Lähteandmetes püstitatud tõusunurk  $\alpha = 10^\circ$  on sellise väärtusega, sest see kirjeldab järseimat tõusnurka mäel, mis oli autori läheduses. Arvutuste tegemiseks kasutati kogukaalu  $m_{kokku} = 115 \text{ kg}$  eeldusel, et sõiduki lõplik kaal on umbes 15 kg.

Esmalt arvutati minimaalne vajalik jõud ratastel  $F_{ratas}$ , mis võimaldaks sõita tõusnurgast  $\alpha$  ülesmäge:

$$F_{ratas} = m_{kokku} \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 196 \text{ N} \quad (1.1)$$

Seejärel sai arvutada minimaalse vajaliku väändemomendi  $T_{ratas}$  ratastel, kasutades ratta raadiust:

$$T_{ratas} = F_{ratas} \cdot \frac{D_{ratas}}{2} = 20 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1.2)$$

Selleks, et hinnata umbkaudselt soovitatavat väändemomenti mootoris on tarvis teada mootori ja rataste vahelise ülekande parameetreid. Arvutusteks kasutati hinnangulist ülekandeväärtust  $u_{\ddot{u}k} = 0,167 \approx 6:1$  ning selle umbkaudset kasutegurit  $\eta_{\ddot{u}lekanne} = 0,9$ . Samuti arvestati hinnangulist sõiduki mehhaanilist kasutegurit  $\eta_{s\ddot{o}iduk} = 0,9$  ning kuna töös kasutati kahte mootorit, siis saadud tulemus jagati kahega, et avaldada ühe mootori soovitud mehhaaniline väändemoment  $T_{mootor(n1)}$ :

$$T_{mootor(n1)} = \frac{T_{ratas} \cdot u_{\ddot{u}k}}{\eta_{\ddot{u}lekanne} \cdot \eta_{s\ddot{o}iduk}} \cdot \frac{1}{2} = 2 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1.3)$$

Valitud mootorid peavad olema kõrgema väändemomendiga kui just arvutatud  $T_{mootor(n1)}$ , või ülekandeväärtus peab olema suurema suhtega kui arvutustes kasutatud,

sest teisel juhul ei ole võimalik mäest üles sõites kiirendada ning seeläbi puuduks võimalus alustada sõitu kallakult, mille kaldenurk on  $10^\circ$  või suurem.

Sõiduki lõplik kiirus ei tohi ületada  $v_{max} = 25 \text{ km/h}$  ning seda piiratakse vajadusel tarkvaraliselt. Sõiduki kiirus sõltub mootori pöörlemissagedusest, ülekandesuhtest ja vedava ratta übermöödist. Järgnevalt avaldati ratta übermöödi  $C$  ja pöörlemiskiirus tippkiirusel:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{ratas}}{2} = 0,6 \text{ m} \quad (1.4)$$

$$n_{ratas} = \frac{v_{max}}{C} \cdot \frac{1000}{60} = 663 \text{ p/min} \quad (1.5)$$

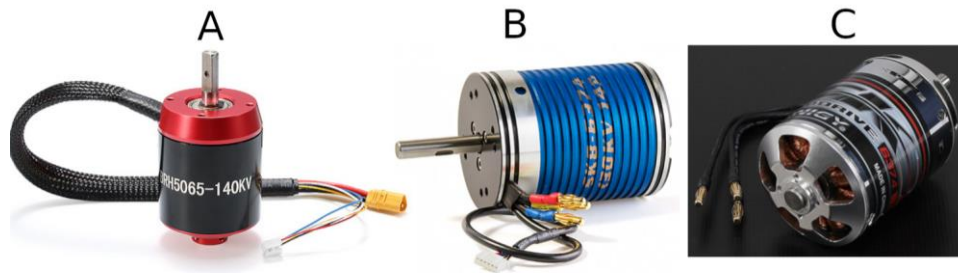
Seejärel arvutati sobiv hinnanguline mootori pöörlemissagedus kasutades ülekandetegurit  $u_{\ddot{u}k}$  ning eelnevalt arvatud ratta pöörlemissagedust  $n_{ratas}$ :

$$n_{mootor} = \frac{n_{ratas}}{u_{\ddot{u}k}} = 3979 \text{ p/min} \quad (1.6)$$

Valik tehti erinevate mootori hulgast, mis on spetsiaalselt toodetud või sobivad kergelektrisõidukitele. Mootoreid valides saadi aru, et soovitud madala pöörlemissagedusega mootorid ei ole majanduslikult mõistlikud ning seega peab seda ülekannet disainides arvestama. Võrdluseks valiti Racerstar ja Turnigy firma poolt toodetud mootorid (Joonis 1.2) – Racerstar BRH5065 140KV ja 200KV [8] ning Turnigy SK8 6374 130KV [9] ja SK3 6374 149 KV [10]. Mootorite võimsus ja kiirus sõltub süsteemi toitepingest, mida tootja kasutas testimiseks. Tootja poolt antud parameetrid, mis sõltuvad süsteemi pingest, kohandati nõuetes püstitatud aku nimipinge järgi, et neid oleks lihtsam võrrelda. Kohandatud väärtused Tabelis 1.1 ja Tabelis 1.2 on tähistatud \* tähisega ning peab arvestama, et need on hinnangulised väärtused.

Tabel 1.1 Mootorite parameetrite võrdlus [8] [9] [10]

Mudel	$K_v$ (p/min)	Toitepinge (V)	Maksimaalne voolugevus (A)	Maksimaalne Võimsus (W)	Koormuseta maksimaalne pöörlemissagedus (p/min)	Mass (g)	Hind (€)
BRH5065	140	42*	34	1400*	5880*	480	53
BRH5065	200	42*	46	1925*	8400*	480	53
SK8 6374	130	42*	65	2730*	5460*	745	107
SK3 6374	149	42*	70	2940*	6258*	840	92



Joonis 1.2 Pildid valikus olevatest mootoritest BRH5065 (pilt A), SK8 6374 (pilt B) ja SK3 6374 (pilt C) [8] [9] [10]

Mootori suurus on loetav selle nimetusest – näiteks 5065 tähendab mootori maksimaalset diameetrit 50 mm ja pikkust 65 mm. Paljud tootjad kasutavad mootori kirjeldamiseks parameetrit  $K_v$ , mis kirjeldab koormuseta talitluses mootori pöörlemiskiirust minutis ühe voldi kohta [7]. Samuti on kirjas mootori maksimaalne volutugevus, toitepinge, võimsus ja muud parameetrid. Selleks, et hinnata mootori sobivust süsteemi arvutati nende hinnanguline koormatud pöörlemiskiirus ning väändemoment. Arvutuste tegemisel lähtuti mootori maksimaalsest võimsusest,  $K_v$  parameetrist ning aku nimipingest  $E_{akuNimi} = 42V$ . Kasutatud parameetrid ning arvutuste tulemused kanti Tabelisse 1.2.

Selleks, et avaldada mootori maksimaalset väändemomenti, avaldati esmalt koormatud mootori pöörlemiskiirus, kasutades mootori hinnangulist kasutegurit  $\eta_{mootor} = 0,85$ :

$$n_m = E_{akuNimi} \cdot K_v \cdot \eta_{mootor} \text{ (p/min)} \quad (1.7)$$

Saadud tulemuse abil arvutati mootori maksimaalne väändemoment, kus pöörlemissagedus  $n_m$  väärtus teisendati nurkkiiruse ühikusse  $rad/s$ :

$$T_m = \frac{P_m}{n_m} \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (1.8)$$

Väärtus  $T_m$  näitab koormatud mootori väändemomenti maksimaalse volutugevuse juures. Kuna mootori talitlusel kiirus ei mõjuta oluliselt väändemomenti, siis järeldati, et saadud väärtus kehtib mistahes pöörlemiskiirusel seni, kuni pöörlemissagedus ei ületa mootori lubatud maksimaalset väärtust.

Tabel 1.2 Arvutatud mootorite parameetrid

Mudel	$K_v$ (p/min)	Toite- pinge (V)	Maksimaalne voolutugevus (A)	Maksimaalne Võimsus $P_m$ (W)	Koormatud pöörlemisagedus $n_m$ (p/min)	Maksimaalne väändmoment $T_m$ (Nm)
BRH5065	140	42*	34	1400*	4998	2,67
BRH5065	200	42*	46	1925*	7140	2,57
SK8 6374	130	42*	65	2730*	4641	5,62
SK3 6374	149	42*	70	2940*	5319	5,28

Otsustati kasutada BRH5065  $K_v = 140$  mootoreid, eelkõige nende madala maksumuse ja massi pärast. Mootori parameetrid on vastavuses arvutatud nõuetega kaldtee näitel ning see võimaldab ka sõita maksimaalse lubatud kiirusega. Kuna arvutusteks kasutatud väärtused on hinnangulised, siis arvutati lõplikud sõiduki parameetrid pärast ülekandesuhte selginemist.

Mootoril on tagasisideks Halli andurid, mille abil saab juhtmoodul teada rootori positsiooni madalamatel kiirustel, tagades selle abil sujuva stardi seisult. Ilma positsiooni anduriteta peab kontroller katse meetodil arvutama rootori positsiooni seisult startides. Juhtmoodul ergutab mootori mähiseid ning jälgib mootoris tekkinud elektromagnetilistest jõududest tingitud tagasitulevaid signaale mootori faasijuhtmetes, mille abil saab juhtmoodul arvutada umbkaudse rootori positsiooni. See tähendab, et seisult käimaminek ilma positsiooni anduriteta oleks ebaühtlane. [11]

### 1.3.2. Mootori juhtmoodul

Eelnevas alapeatükis valitud harjadeta alalisvoolumootori kasutamiseks on vaja valida juhtmoodul, mis juhib mootori kiirust ja muid parameetreid vastavalt soovile. Juhtmoodul juhib harjadeta alalisvoolumootorit ergutades selle mähiseid vastavalt rootori positsioonile kasutades kolmefaasilist poolsildalaldilt. [7]

Erinevaid foorumeid läbi vaadates ja sealsete kasutajate tagasisidet analüüsides otsustati kasutada VESC® põhinevat juhtmoodulit üle teiste hobialektroonikas kasutatavate mootori kontrollereid, sest see on vabavaraline ja seeläbi väga kohandatav harjadeta alalisvoolumootori juhtmooduli disain. VESC®, pikalt *Vedder electronic speed controller*, on Benjamin Vedderi poolt registreeritud kaubamärk [12].

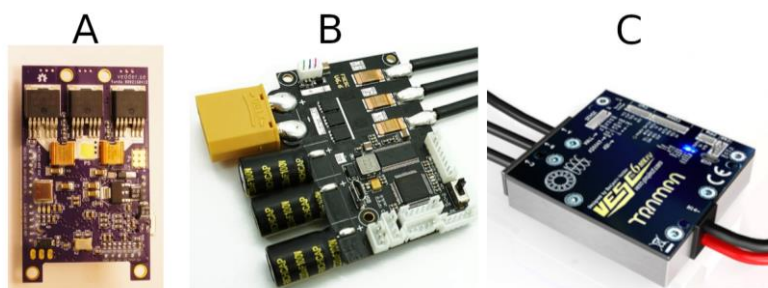
Mootori kontroller valiti välja kahe erineva HW ehk riistvara versiooni hulgast: HW 4.12 ja HW 6.6 [13]. Nende peamine erinevus on mootori voolu jälgimise meetod – esimene variant kasutab kahte šunti transistoride ja aku vahel, kui samal ajal 6.6

kasutab kolme šunti, mis on paigutatud mootori faasidega jadasse. Tänu sellele suudab 6.6 riistvaral põhinev juhtmoodul jälgida täpsemalt mootori faaside voole ning selle tulemusena on kontrolleri usaldusväärsem ja mootorit juhtides täpsem. Kasutajate tagasiside alusel jõuti järelduseni, et 4.12 riistvaral põhinevad kontrollid ei ole nii usaldusväärsed, kui kasutada väljaorienteeritud juhtimist ning seetõttu otsustati 6.6 riistvara kasuks. Väljaorienteeritud juhtimine (FOC ehk *field-oriented control*), teisisõnu vektorjuhtimine, võimaldab valitud mootorit juhtida efektiivsemalt ja vähesema müraga võrreldes tavapärase 6-astmelise trapetsoidkommutatsiooniga, sest mootori faasi signaali kuju näeb välja rohkem siinuseline [14].

Võrdluseks valiti erinevate ettevõtete poolt toodetud kolm juhtmoodulit (Joonis 1.3) ning nende parameetrid on välja toodud Tabelis 1.3. Tabelis sümboliga \* märgitud parameetrid on hinnangulised, kuna tootja poolt antud parameetrid olid puudulikud ning seega kasutati samaste alternatiivide umbkaudseid väärtuseid.

Tabel 1.3 Kontrollite parameetrite võrdlus [15] [16] [17]

Mudel	Riistvara versioon	Maksimaalne pinge (V)	Pidev/Suurim voolutaluvus (A)	Kaal (g)	Hind (€)
Vanda VESC 4.12	hw 4.12	60	50/240	80*	87
Flipsky FSESC 6.6	hw 6.6	60	60	120*	146
Trampa VESC 6 MkV	hw 6.6	60	80/150	163	289



Joonis 1.3 Pildid valikus olevatest juhtmoodulitest Vanda VESC4.12 (pilt A), FSESC 6.6 (pilt B), Trampa VESC 6 MkV (pilt C) [15] [16] [17].

Otsustati kasutada FSESC 6.6 juhtmoodulit, sest see on majanduslikult mõistlikum variant ning vastab eelnevalt kirjeldatud nõuetele. Samuti on selle pidev voolutugevus peaaegu kaks korda suurem kui valitud mootorite maksimaalne voolutugevus.



### 1.3.3. Puldi valik

Maastikurula juhtimiseks on tarvis juhtmevaba pulti. Kuna autor on ka varasemalt tegelenud elektrirulade ehitamisega, siis on katsetatud ajas erinevaid juhtmevabasid pulte. Lähtudes autori varasematest kogemustest leiti, et on mõistlik kasutada pulti FS-GT2B (Joonis 1.4) [18]. Otsus tehti, sest valitud pult on vastupidava konstruktsiooniga, mugav ja eelkõige väga stabiilse ühendusega – teiste pultide puhul, mida autor varasemalt on katsetanud, esines tihtipeale ühenduse katkestusi puldi ja signaali vastu võtva ressiiveri vahel ning seeläbi lõppes sõit ohtliku olukorraga.



Joonis 1.4 FS-GT2B pult (vasakul) ja selle ressiiver (paremal) [18]

Puldil on kokku kolm kanalit, kuid käesoleva sõiduki juhtimiseks on vaja ainult ühte, et juhtida kiirust. Lisakanaleid kasutatakse sõiduki tulede juhtimiseks – pidurdustule, suunatule näitamiseks ning tulede sisse ja välja lülitamiseks, mida on kirjeldatud hilisemas peatükis 2.2.4.

### 1.3.4. Aku valik

Selleks, et maastikurulaga saaks sõita vähemalt 30 km ühe akulaadimisega, on tarvis valida õige mahutavuse, voolutaluvuse ja muude parameetritega aku. Arvutuste tegemiseks lähtuti mootori valiku peatükis saadud võimsustest kaldtee näitel.

Uuriti foorumeid, et saada teada hinnanguline sõiduki energiakulu  $W_{t_{hinnanguline}}$  ning leiti, et tavaline uteraanratastega elektrirula tarbib umbes 5-15 Wh/km ning rehvide olemasolu tõttu võib maastikurula tarbida 25-35 Wh/km. Püstitatud vahemaa  $s = 30 \text{ km}$  läbimiseks vajalik minimaalne akumahutavus  $W_{aku}$  arvutati kasutades hinnangulist süsteemi energiakulu  $W_{t_{hinnanguline}} = 25 \text{ Wh/km}$ :

$$W_{aku} = s \cdot W_{t_{hinnanguline}} = 750 \text{ Wh} \quad (1.9)$$

Järgnevalt teisendati saadud väärtus ampertundidesse  $q_{aku}$  edasiste arvutuste lihtsustamiseks, kasutades lähteandmetes püstitatud aku nimipinget  $E_{akuNimi} = 42 V$ :

$$q_{aku} = \frac{W_{aku}}{E_{akuNimi}} = 18 Ah \quad (1.10)$$

Samuti on tarvis arvestada, et aku pidev voolutugevus peab rahuldama süsteemi nõutud voolutugevust. Aku minimaalse nõutud pideva voolutugevuse väärtuse leidmiseks lähtuti valitud mootorite maksimaalsest voolutugevusest, mis on kahe mootori puhul kokku 68 A. Selleks, et aku eluiga oleks pikem, otsustati aku nõutud minimaalseks pidevaks voolutugevuseks kasutada kõrgemat väärtust  $I_{aku} = 80 A$ , et aku ei töötaks oma maksimaalse võimekuse piirides.

Aku valiku tegemiseks peab otsustama, millist akut oleks mõistlik kasutada, kuna kaasaskantavates seadmetes kasutatakse mitut erinevat tüüpi akusid - varem olid enimkasutatud nikkel-kaadmium jm tüüpi akud. Tänapäeval kasutatakse peamiselt liitiumakusid, mis pakuvad suuremat efektiivust ja energiatihedust võrreldes Ni-Cd akudega. Liitiumakud jagunevad peamiselt kahte erinevasse kategooriasse: Liitiumioon ja liitium-polümeer tüüpi akud. Li-Po talub suuremaid voolutugevusi kui Li-ioon aku, kuid selle energiatihedus on veidi väiksem ühe suurusühiku kohta. Samuti on LiPo akud märgatavalt kallimad kui liitium-ioon akud ning seetõttu otsustati Li-ioon aku kasuks. [19]

Aku otsustati disainida kasutades kõva kestaga silindrilisi liitiumakuelemente, sest need on laialdaselt kasutuses isehitatud akudes. Akud valiti veebisaidilt *nkon.nl* silindriliste 18650 tüüpi elementide hulgast. Valiku tegemisel lähtuti eelkõige elementide mahutavuse ja hinna suhtest. Arvestati ka lõplikku akumulaatori kaalu, mis sõltub eelkõige kasutatud akuelementide kogusest. Akuelemendid olid autoril juba varasemalt enne käesoleva töö tegemist tellitud ning nende hinnad ja valik on seeläbi ajas muutunud, seega ei pruugi valitud akuelemendid olla tänaseks majanduslikult mõistlikuimad.

Selleks, et leida majanduslikult mõistlikum ja kaalult kerge lahendus, peab püstitama akuelemendile nõuded. Järgnevad arvutused tehti erinevate voolutugevuse väärtusetega vahemikus 6-20 A ning saadud tulemused kanti Tabelisse 1.4.

Arvutati vajalike paralleelsete elementide hulk lähtudes nende pidevast voolutaluvusest ja süsteemi nõutud maksimaalsest voolutugevusest valemiga:

$$n_{elementiParal} = \frac{I_{aku}}{I_{akuElement}} \quad (1.11)$$

Akuelementide kogus süsteemis kokku on võrdeline jadasse ja paralleelselt ühendatud elementide korrutisega. Jadaühenduses olevate elementide hulk  $n_{elementiJadas} = 12$  on varasemalt püsitatud lähteandmetes, ning selle abil arvutati, mitut akuelementi mingi konfiguratsioon nõuab:

$$n_{elementiKokku} = n_{elementiJadas} \cdot n_{elementiParal} \quad (1.12)$$

Lisaks on tarvis teada valitud akuelemendi minimaalset vajalikku mahutavust  $q_{akuElement}$ . Selle avaldamiseks kasutati paralleelühenduses olevate akuelementide väärtust  $n_{elementiParal}$  ja eelnevalt avaldatud minimaalset nõutud aku mahutavust  $q_{aku} \approx 18 Ah$ :

$$q_{akuElement} = \frac{q_{aku}}{n_{elementiParal}} (Ah) \quad (1.13)$$

Akuelementide kogukaal arvutati kasutades hinnangulist 18650 tüüpi elemendi massi  $m_{element} = 47 g$  ja elementide hulka paralleelühenduses  $n_{elementiParal}$ , selleks et aimu saada, kui palju mingi konfiguratsiooniga aku umbes kaaluks:

$$m_{aku} = n_{elementiKokku} \cdot m_{element} (g) \quad (1.14)$$

Tabel 1.4 Akuelemendi voolutaluvusest sõltuvad arvutused

Elemendi pidev voolutaluvus $I_{akuElement}$ (A)	Elemente paralleelühenduses $n_{elementiParal}$ (tk)	Elementide kaal kokku $m_{aku}$ (g)	Nõutud elemendi minimaalne mahutavus $q_{akuElement}$ (mAh)
6	13	7332	1374
8	10	5640	1786
10	8	4512	2232
12	7	3948	2551
14	6	3384	2976
16	5	2820	3571
18	4	2256	4464
20	4	2256	4464

Otsustati kasutada Panasonic NCR18650PF akuelemente [20], sest nende akude hinna ja mahutavuse suhe oli tellimise ajal madalaim võrreldes teiste alternatiividega. Antud elementide mahutavus on 2,7 Ah ning pidev voolutaluvus 10 A, mis vastab eelnevalt elemendile püstitatud nõuetele.

Kasutades valitud elemendi parameetreid, kujuneb lõpliku aku mahutavuseks  $q_{aku} = 21,6 Ah$ , pidevaks voolutaluvuseks 80 A ning koosneb 96 akuelemendist, millest 12 on

jada- ja 8 rööpühenduses. Akupakis kasutatavate elementide hinnanguline mass on kokku 4,5 kg.

Arvutati ühe akulaadimisega läbitava vahemaa umbkaudne väärtus, kasutades aku mahutavust  $q_{aku} = 21,6 \text{ Ah}$  ja hinnangulist sõiduki energiakulu valemiga:

$$S_{hinnanguline} = \frac{q_{aku} \cdot E_{akuNimi}}{W t_{hinnanguline}} = 36 \text{ km} \quad (1.15)$$

### 1.3.5. Aku laadimise ja balansseerimise lahendus

Liitiumaku laadimiseks kasutatakse konstantse voolu ja pinge reguleerimisel põhinevat alalisvoolu pingemuundurit. Konstantse voolutugevusega piiratakse laadimise esimeses faasis võimsust, et akusid ei laetaks kiiremini kui soovitud. Laadimise lõppstaadiumis piiratakse laadimiseks kasutatavat pinget, et valitud aku elemendi pinge ei ületaks 4,2 volti, vältimaks liitiumaku üle laadimisel tekkivaid ohte. Konstantse pinge puhul langeb voolutugevus, sest laadija ja aku pingete erinevus muutub väiksemaks. Üldjuhul kui voolutugevus on vähenenud rohkem kui 10 korda (sõltub laadijast), siis loetakse aku laetuks ja süsteem lõpetab aku laadimise. [21]

Autoril on olemas varasemalt juba laboratoorne toiteallikas, mis sobib aku laadimiseks, kuid see ei ole kaasaskantav. Lahenduseks osteti eraldi kaasaskantav akulaadija, mis oleks kompaktne, piisavalt võimas ja eelkõige majanduslikult mõistlik.

Esmalt arvutati optimaalne laadimissüsteemi voolutugevus  $I_{laadija}$  eeldusel, et laadimisaeg on umbes  $t_{laadija} = 8 \text{ h}$ :

$$I_{laadija} = \frac{q_{aku}}{t_{laadija}} = 2,7 \text{ A} \quad (1.16)$$

Valitud laadija peab laadima akut vähemalt 2,7 A voolutugevusega, et aku saaks täis laetud umbes 8 tunniga. Tuleb meeles pidada, et laadimise lõpus väheneb voolutugevus ja seega ka laadimise võimsus, seetõttu peab arvestama, et tehtud arvutused kirjeldavad akut, mis on peaaegu, kuid mitte täielikult täislaetud. Akude laadijaks valiti ettevõtte YZPower laadija mudel YZ260, mille voolutugevus on 4 A ja väljundpinge 50,4 V [22]. Järgnevalt arvutati uus eeldatav laadimisaeg  $t_{laadija}$ :

$$t_{laadija} = \frac{q_{aku}}{I_{laadija}} = 5,4 \text{ h} \quad (1.17)$$

Liitiumaku jadas olevad elemendid ei talitle alati samaselt ning seetõttu elementide vahelised pinged võivad muutuda ajas. Seega peab neid vajadusel balansseerima, et nende pinged ei erineks üksteisest liiga palju. Kui aku on balansseerimata, siis muutub

kasutatav akumahutavus väiksemaks ning samuti võib muutuda aku ohtlikuks kasutajale. Seetõttu on tarvis valida akude balansseerimiseks vajalik süsteem. [23]

Lõplik akumulaator koosneb neljast väiksemast akust, milles on 6 elementi jadaühenduses (edaspidi tähistatud 6S) - otsus tehti, sest 6S aku balansseerimise süsteem on kordades odavam ja lihtsamini kättesaadav kui 12S aku oma. Samuti võimaldab akupaki nõ. tükeldamine muuta selle lõpliku konfiguratsiooni – näiteks saab kasutaja vajadusel rula kaalu vähendada eemaldades pooled akud, mis lihtsustaks rula käes kandmist.

Valiti kahe aku balansseerimise mooduli vahel (Joonis 1.5) ning nende vajalikud tehnilised andmed on välja toodud Tabelis 1.5.

Tabel 1.5 Aku balansseerimise seadmete tehnilised andmed [24] [25]

Mudel	Akuelemente jadas (tk)	Balansseerimise täpsus (mV)	Hind (€)
ISDT BG-8S	1S-8S	<5	27
Heltec BMS 6-8S	6S-8S	5	23



Joonis 1.5 Aku balansseerimise seadmed ISDT BG-8S (vasakul) ja Heltec BMS 6-8S (paremal) [24] [25]

Valiti firma ISDT toode BG-8S, et kontrollida ja balansseerida akuelementide pingeid. Valik tehti, sest antud toode võimaldab kasutajal mugavalt ekraanilt näha akuelementide pingeid ning seeläbi veenduda, et balansseerimise süsteem töötab nii, nagu ette nähtud.

### 1.3.6. Jõuelektronika lülitus-komponentide valik

Süsteemi ja aku vahele on tarvis lüliti, et kasutaja saaks süsteemi sisse või välja lülitada. Otsustati luua transistorlüliti, sest see võimaldab juhtida suurt vooltugevust väikese lülitiga.

Antud töös on süsteemi maksimaalne toitepinge küll 50,4 V, kuid pidurdamisel tekkiva elektrienergia tõttu võib süsteemi pinge tõusta momentaalselt üle eelnevalt mainitud pinge, mille tõttu arvestati, et lülitis kasutatavad transistorid peavad töötama süsteemis, mille pinge ei tohiks ületada väärtust 60 V. Valiti just selline väärtus, sest mootorite juhtmoodulite maksimaalne toitepinge on samuti 60 V. Transistorlüliti puhul on oluline, et selle lõplik sisetakistus oleks võimalikult madal, sest siis on pingelang ja kaotatud energia minimaalne.

Valiti kolme erineva N-kanaliga MOSFET transistori hulgast, mille tehnilised andmed on toodud välja Tabelis 1.6. MOSFET transistor, teisisõnu metall-oksüüd pooljuhtväljatransistor on pingega juhitav seadis, millel on pais, neel ja läte [26].

Tabel 1.6 Transistoride tehnilised parameetrid [27] [28] [29]

Mudel	$V_{ds}$ max (V)	$R_{ds(on)}$ max (m $\Omega$ )	$V_{gs(th)}$ max (V)	$V_{gs}$ max (V)
IRFB3006	60	2,5	4,0	20
IRFB7530	60	2,0	3,7	20
SUP60020E-GE3	80	2,4	4,0	20

Tabelis kasutatud tähistete selgitused on välja toodud järgnevalt:

$V_{ds}$  - Maksimaalne lubatud pinge läte ja neelu vahel

$R_{ds(on)}$  - Transistori sisetakistus juhtivas olekus

$V_{gs(th)}$  - Transistori juhtimiseks minimaalne nõutud pinge paisu ja läte vahel

$V_{gs}$  - Transistori juhtimiseks maksimaalne lubatud pinge paisu ja läte vahel

Kasutusse võeti kuus IRFB7530 N-tüüpi MOSFET transistori, kuna nende sisetakistus on madalaim võrreldes teistega. Transistori sisetakistus avatud olekus on maksimaalselt 2 m $\Omega$  toatemperatuuril [28]. Konstrueerimiseks kasutati autori poolt varasemalt disainitud trükkplaate, kuhu saab paigutada 3 transistori. Lõplik disain kasutab kokku kahte trükkplaati ning seega  $n_{transistor} = 6$  transistori rööbiti, et selle kaod oleksid minimaalsed. Kuna transistoride sisetakistus on samane, siis arvutati kuue rööbiti paigutatud transistoride sisetakistus  $R_{rööbiti}$  järgneva lihtsustatud valemiga:

$$R_{rööbiti} = \frac{R_{ds(on)}}{n_{transistor}} = 0,33 \text{ m}\Omega \quad (1.18)$$

Seejärel arvutati transistorides maksimaalne eralduv kadu  $P_{tKadu}$  lähtudes süsteemi maksimaalsest voolutugevusest  $I_{max} = 68 A$ :

$$P_{tKadu} = I_{max}^2 \cdot R_{rööbiti} = 1,5 W \quad (1.19)$$

Seejärel arvutati, kui palju mõjutab transistoride kadu süsteemi efektiivsust lähtudes süsteemi ja kao võimsuste suhtest, kasutades voolutugevust  $I_{max} = 68 A$  ja aku nominaalpinget  $E_{nimiAku} = 42 V$ :

$$\eta_{transistor} = \frac{P_{tKadu}}{I_{max} \cdot E_{akuNimi}} = 0,000536 \sim 0,05 \% \quad (1.20)$$

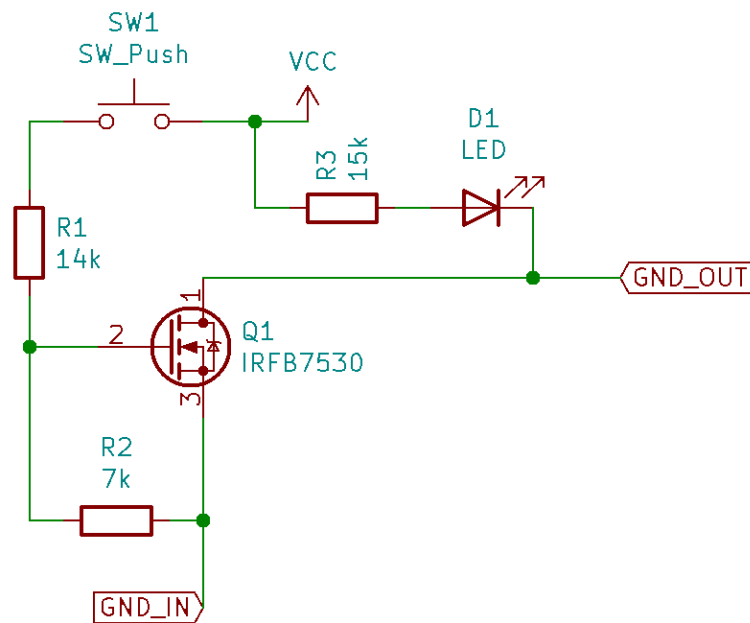
On näha, et transistorlülitid suurendab süsteemi kadusid maksimaalsel voolutugevusel ainult 0,05 % võrra, millest saab järeldada, et transistorlülitid esinevad kaod on minimaalsed.

Valitud transistori lülitamiseks peab rakendama selle paisu ja läte vahele vähemalt 3,7 volti ning samas paisu ja läte vaheline pinge ei tohi ületada 20 V. Selleks, et kõrge akupinge muuta transistoride lülitamiseks sobilikuks, madalamaks pingeks, koostati kahe takistiga pingejagur. Kuna valitud tüüpi transistori juhitakse pingega, siis ei pööratud suurt tähelepanu pingejaguri väljundvoolule ja sellest tingitud väljundpinge muutusele, sest väikese voolu puhul on selle mõju väljundpingele minimaalne. Otsustati, et pingejaguri ahela kogutakistus võiks olla suurem kui  $20 k\Omega$ , sest siis on kaod pingestatud olekus minimaalsed. Kasutatud takistite väärtused leiti veebikalkulaatori abil [30] ning nendeks kujunesid  $R_1 = 14 k\Omega$  ja  $R_2 = 7 k\Omega$ . Pingejaguri väljundpinge  $U_{pjVäljund}$  arvutati järgneva valemiga [31], kus  $U_{pjSisend}$  tähistab pingejaguri sisendpinget:

$$U_{pjVäljund} = \frac{U_{pjSisend} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.21)$$

Valemiga arvutati pingejaguri väljundpinge, lähtudes süsteemi minimaal- ja maksimaalpingest. Lõpliku pingejaguri väljundpingeks arvutati 20 V kuni 13 V lähtudes süsteemi maksimaalsest lubatud pingest 60 V ja tühjakslaetud akupingest 40 V vastavalt.

Transistoride juhtimiseks kasutati veekindlat LED surunuppu ning transistorlülitid lihtsustatud skeem on välja toodud Joonisel 1.6.



Joonis 1.6 Lihtsustatud transistorlüliti skeem.

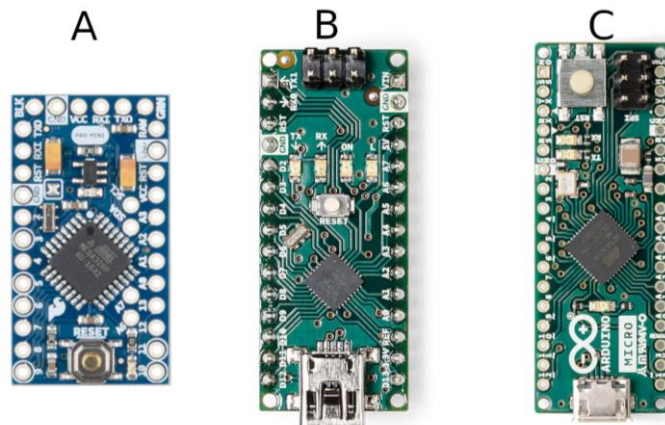
### 1.3.7. Tulede süsteem

Tulede süsteemi loomiseks on tarvis valgusdioode ja mikrokontrollerit, mis võimaldaks tulesid juhtida lähtudes kasutaja puldist saadud signaalist. Esmalt valiti välja mikrokontroller – valik tehti erinevate Arduino mikrokontrollerite hulgast, sest need on lihtsasti kättesaadavad ja kergesti kasutatavad (Joonis 1.7). Tabelis 1.7 on välja toodud mikrokontrollerite valik ja nende tehnilised andmed.

Tabel 1.7 Arduino mikrokontrollerite tehnilised andmed [32] [33] [34]

Nimi	Mikrokontroller	Tööpinge (V)	USB liides	Suurus (mm)	Hind (€)
Arduino Pro Mini	ATmega328	5	Ei	33 x 18	9
Arduino Nano	ATmega328	5	Jah	45 x 18	18
Arduino Micro	ATmega32U4	5	Jah	48 x 18	18





Joonis 1.7 Pildid Arduino mikrokontrollerite valikust Arduino Pro Mini (pilt A), Arduino Nano (pilt B), Arduino Micro (pilt C) [32] [33] [34]

Tulede süsteemi kontrolleriks valiti Arduino Nano, sest seda saab programmeerida USB liidese kaudu ning on suuruselt väikseim kompaktses kui Arduino Micro. USB liides võimaldab kontrolleri mugavat ümberprogrammeerimist ning seeläbi ei nõua eraldi USB programmeerimist. Mikrokontroller saab oma toitepinge mootorite kontrolleritest, kuhu on sisse ehitatud 5 V regulaator [16]. Sinna ühendub ühtlasi ka puldi ressiiver, kust saab mikrokontroller puldi juhtsignaalid. Tuledega seotud ühendusi näitab täpsemalt Lisas 1 toodud elektroonikaskeem.

Tuledena otsustati kasutada WS2812B valgusdioode [35]. Esialgu kavatseti kasutada tavalisi RGB valgusdioode, kuid jõuti järelduseni, et siis oleks lõplik lahendus keerukas ja kulukas. Valitud valgusdiodidel on sisseehitatud kontrollerid (Joonis 1.8), mis muudab nende juhtimise ja ühendamise lihtsaks. Lõplikuks tulede disainiks otsustati kasutada valmistehtud trükkplaate, kuhu on paigutatud kokku 8 valgusdiodi (Joonis 1.8) [36].



Joonis 1.8 WS28121B valgusdiodid (vasakul) ja nendest koosnev moodul (paremal) [37] [36]

## 1.4. Ülekanne

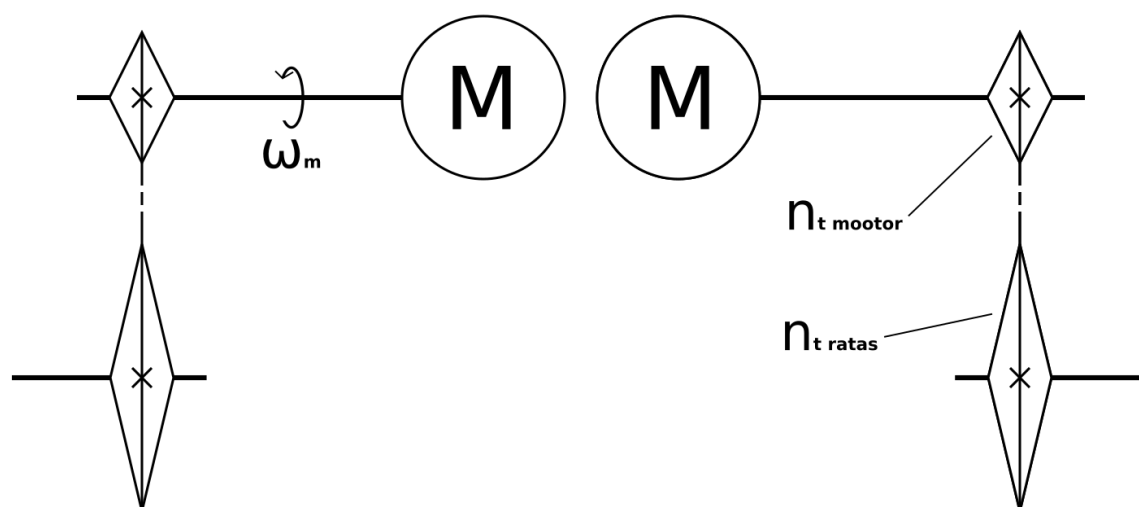
Ülekannet on vaja, et ühendada omavahel mootor ja ratas ning seejuures vähendada mootori pöörlemissagedust, et sõidukil oleks suurem väändemoment ja madalam tippkiirus. Ülekannet, mis vähendab pöörlemiskiirust nimetatakse ka reduktoriks. Ülekandeks otsustati kasutada kettülekannet üle rihmülekande, sest kett on vastupidavam kui rihm halbadel teeoludel. Kettülekanne on valjem ja nõuab rohkem hooldust, kuid väiksemate osade sattumisel ülekande vahele jätkab tõenäolisemalt kett tööd, kui samal ajal rihm võib jääda kinni või puruneda. [38]

Valik tehti kahe erineva ketitüübi hulgast, mille vajalikud parameetrid on välja toodud Tabelis 1.8 Ketitüübi puhul on oluline teada selle sammuvahe ja laiust, sest antud väärtustega saab hinnata ülekande lõpliku suurust ja kaalu. Sammuvahe kirjeldab keti kahe lünga vahelist pikkust, mis võimaldab hiljem valida optimaalse diameetriga hammasrattaid ja õige pikkusega keti.

Tabel 1.8 Võrreldavate ketitüüpide tehnilised parameetrid [39]

Keti tüüp	Sammuvahe (mm)	Keti laius (mm)	Tõmbetugevus (kN)	Keti mass (kg/m)
ANSI 25H	6,35	8,4	4,6	0.15
ANSI 35H	9,53	13,2	10,8	0.33

Kasutusse võeti ANSI 25H ketitüüp, sest väiksema sammuvahega saab luua kompaktsema, maksumuselt odavama ja kaalult kergema ülekande. Joonisel 1.9 on välja toodud lihtsustatud ülekande skeem.



Joonis 1.9 Ülekande kinemaatiline skeem

Enne hammasrataste valimist arvatati optimaalne ülekandesuhe kasutades koormatud mootori hinnangulist pöörlemiskiirust  $n_m = 4998 \text{ p/min}$  ja ratta soovitud pöörlemiskiirust:

$$u_{\text{optimaalne}} = \frac{n_{\text{ratas}}}{n_m} = 0,1327 \approx 7,5:1 \quad (1.22)$$

Saadud väärtust kirjeldati kui optimaalset väärtust, sest sellise ülekandesuhte rakendamise puhul kasutatakse ära terve mootori pöörlemissagedusvahemik. Kuna valitud mootori võimsus on lineaarses suhtes selle pöörlemiskiirusega konstantsel volutugevusel, siis selle piiramine elektrooniliselt tähendaks seda, et osa mootori potentsiaalsest võimsusest jääks maastikul sõites kasutamata.

Hammasrataste valimisel on tähtis arvestada eelkõige nende hammaste arvuga, mille põhjal kujuneb hammasrataste lõplik diameeter ja süsteemi lõplik ülekandesuhe. Esmalt valiti ratta külge kinnituv hammasratas ja seda võimalikult suure diameetriga nii, et hammasrattas ei käiks pidevalt vastu maad maastikul sõites. Valitud velje külge kinnituva hammasrataste hammaste arv on  $n_{\text{tratas}} = 68$ . Sellest lähtudes arvatati mootori külge kinnituva hammasratta hammaste arv  $n_{\text{tmootor}}$ , kasutades soovitud ülekandesuhet  $u_{\text{optimaalne}} = 0,1327$ :

$$n_{\text{tmootor}} = n_{\text{tratas}} \cdot u_{\text{optimaalne}} = 9 \quad (1.23)$$

Seejärel arvatati valitud hammasrattaid kirjeldav ülekandesuhe  $u_{\text{reduktor}}$ , lähtudes valitud hammasrataste hammaste arvudest:

$$u_{\text{reduktor}} = \frac{n_{\text{tmootor}}}{n_{\text{tratas}}} = 0,1324 \approx 7,56:1 \quad (1.24)$$

Lõpuks arvatati maastikurula kiirus lähtudes peatükis 1.3.1 valitud mootori parameetritest:

$$v_{\text{teoreetiline}} = u_{\text{reduktor}} \cdot n_m \cdot \pi \cdot D_{\text{ratas}} = 415 \text{ m/min} \sim 25 \text{ km/h} \quad (1.25)$$

Lõpliku sõidukiirust piiratakse elektrooniliselt, sest täislaetud, suurema aku pingel puhul tõuseb mootori pöörlemissagedus, ning seeläbi tõuseks ka sõiduki tippkiirus.

## 2. KONSTRUKTSIOON JA SELLE ANALÜÜS

Peatükis kirjeldatakse maastikurula elektriliseks ümberehitamise protsessi. Kuna sõidukit on ehitatud ja arendatud mitmeid aastaid, siis tuuakse välja kasutamise käigus tekkinud probleemid ning samuti nende lahendused.

### 2.1. Mehaanika

Järgnevalt on kirjeldatud mehaanilist konstruktsiooni.

#### 2.1.1. Mootori kinnitus ja ülekanne

Mootorid ja ülekanne kinnituvad väändtelje külge, kuhu on kinnitatud ka rattad. Maastikurula väändtelgedel on kaks M8 suurusega keermestatud auku, mis on tootja poolt ette nähtud pidurite süsteemi kinnitamiseks. (Joonis 2.1)

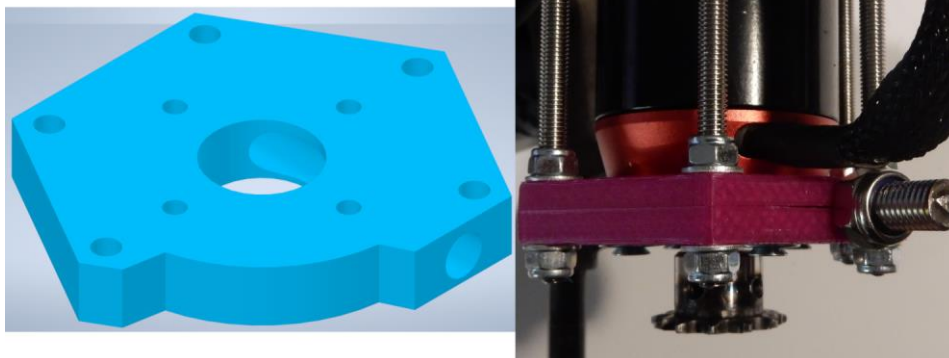


Joonis 2.1 Pilt maastikurula väändtelgedest [40]

**Mootori kinnituse** disainimist alustati lähtudes sellest, et mehhanismi kinnitamiseks kasutati eelnevalt mainitud keermestatud auke ja M8 suurusega A4 tüüpi roostevabast terasest keermelatte, mis kinnitati väändtelgedele kasutades lukkmutreid ja seibe.

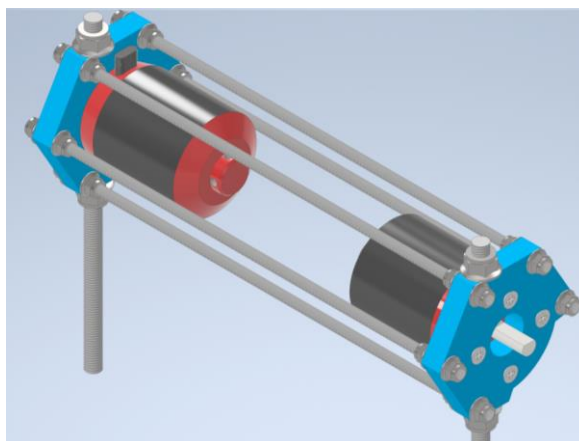
Esmalt oli kasutuses tsingitud galvaniseeritud terasest keermelatt, kuid see deformeerus pärast 200 km läbimist ning seetõttu kaotas kett vajaliku pingutuse ja ülekanne ei olnud enam funktsionaalne. Lahenduseks valiti tugevam A4 tüüpi roostevaba keermelatt ning vähendati ka hammasrataste vahelist kaugust, et keermelatis esinevad jõud oleksid minimaalsed. Pärast pikaajalist sõitmist (ca 700 km, millest kolmandik maastikul) murdis ka uuem, tugevam keermelatt, mida analüüsitakse täpsemalt peatükis 2.1.2.

Disainiti ja 3D prinditi PETG materjaliga mudel, mis võimaldab kinnitada mootorid väändtelje külge kasutades keermelatte, polte, seibe ja lukkmutreid (Joonis 2.2). Mudel 3D prinditi kahe tükina, sest ühe tükina printides saadud tulemus ei olnud rahuldav, mis tulenes kasutatud 3D printeri halva konfiguratsiooni tõttu.



Joonis 2.2 Mootorikinnituse mudel (vasakul) ja pilt selle rakendamisest (paremal)

Elemendid ühendati omavahel M6 keermelattidega kasutades lukkmutreid ja seibe. Antud disain on mugav, sest see võimaldab keti pingutust reguleerida mugavalt liigutades disainitud elementi üles- või allapoole keermelatil (Joonis 2.3).

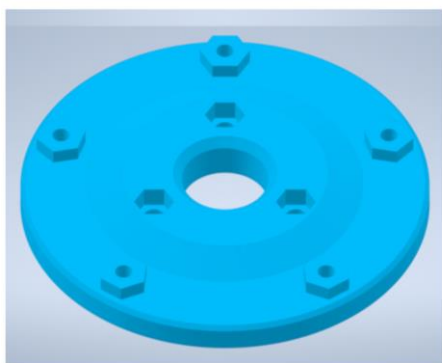


Joonis 2.3 Mootorikinnituse esmase disaini koost

Esmases disainis kasutati PLA materjaliga 3D prinditud detaile, mis olid pärast maastikusõitu deformeerunud mootorite sooja temperatuuri ja materjali madala klaasistumistemperatuuri tõttu. Klaasistumistemperatuur näitab, millal muutub tahke materjal pehmeks [41] ning selle alusel otsustati 3D printida detailid PETG materjaliga. Printimiseks kasutatud PETG ja PLA materjalide klaasistumisetemperatuur on 70 °C ja 55 °C vastavalt [42] [43].

**Ülekande** konstrueerimiseks on tarvis kinnitada hammasrattad velgedele ja mootoritele. Hammasrattad kinnitati mootori võllile kasutades nendega kaasa tulnud kruvisid ja neis olevaid keermestatud auke.

Valitud maastikurula tootja on disaininud velje kahe tükina, et kasutaja saaks vahetada rehve lihtsamini. Rataste külge hammasratta kinnitamiseks disainiti vaheplaat, mis kinnitati veljele kasutades M4 polte, sest nii sai kinnitada omavahel velje kaks poolt ning ka seejuures vaheplaadi velje külge (Joonis 2.4). Hammasratas kinnitati kolme M5 peitepea poldiga, sest valitud poldi suurus ja kooniline pea kuju võimaldab kinnitada hammasratta võimalikult tsentreeritult ratta veljele, vältimaks vibratsioone ja sellest tulenevat keti kulumist.



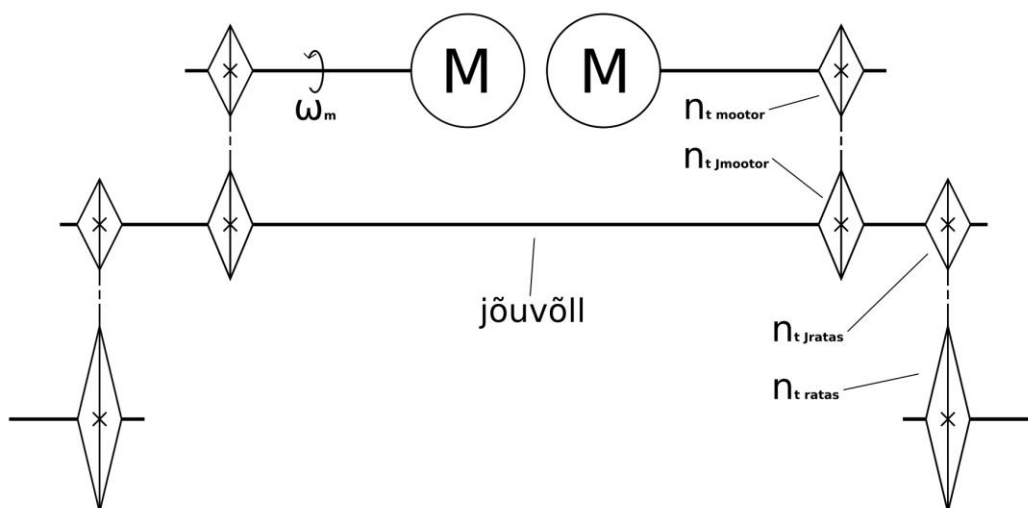
Joonis 2.4 Hammasratta kinnituse mudel (vasakul) ja selle rakendus (paremal)

### 2.1.2. Ülekande arendus

Pärast pikaajalist testimist jõuti järelduseni, et antud ülekande disain rahuldab küll püsitatud nõudeid, kuid maastikul sõitmine ei olnud piisavalt sujuv - teatud pinnastel oli kohapealt liikuma saamine raskendatud. See tulenes sellest, et mootoreid juhitakse volutugevusega, mitte kiirusega (mõlemas mootoris eralduv maksimaalne hetkevõimsus on sama) ning tihtipeale hakkas üks ratas keerlema, kui teine veel seisis. Probleemi aitas pehmenendada mootorite kontrollerites veojõukontrolli seadistamine, kuid see ei lahendanud probleemi täielikult.

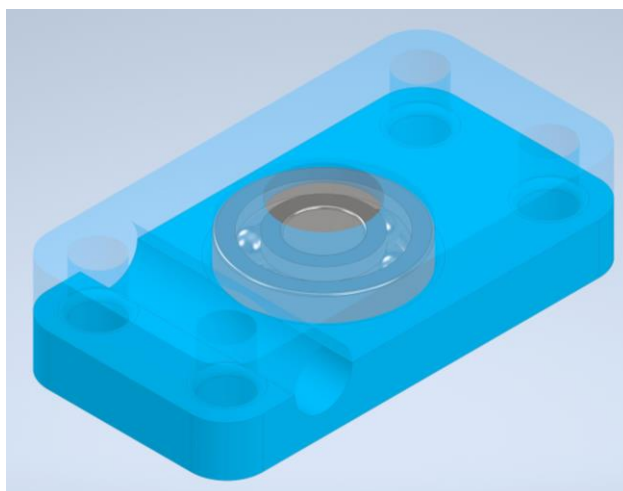
Selleks, et maastikusõit muuta võimalikult sujuvaks otsustati disainida ümber ülekande tööpõhimõte. Paljudel sõidukitel, mis on mõeldud maastikul sõitmiseks, on kasutatud käesoleva probleemi lahendamiseks diferentsiaali lukustamise mehhanismi, mille rakendamisel liiguvad mõlemad rattad teljel alati sama kiirusega.

Seega otsustati disainida uus mootorite kinnitus ja ülekanne, mis lukustab rataste vahelise liikumise ja samas ühendab mõlemad mootorid ühele völliile (Joonis 2.5). Kahe mootori ühendamine ühele völliile tähendas seda, et ühes rattas eralduv jõud võis olla teoorias kaks korda suurem ja seeläbi takistustest üle liikumine muutuks lihtsamaks. Völli, kuhu kinnituvad ülekandega mootorid ja rattad, nimetatakse edaspidi jõuvölliiks.



Joonis 2.5 Arendatud ülekande skeem

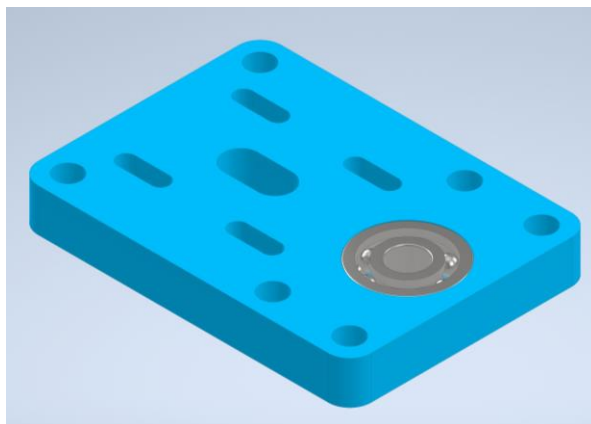
Esmalt disainiti ja 3D prinditi detail, mis kinnitub truckide küljes olevate keermelattide külge. Detailide sisse pandi 608 tüüpi laagrid, mis toestavad kasutatud 8 mm $\varnothing$  jõuvölli (Joonis 2.6).



Joonis 2.6 Arendatud ülekande kinnitus koos laagriga

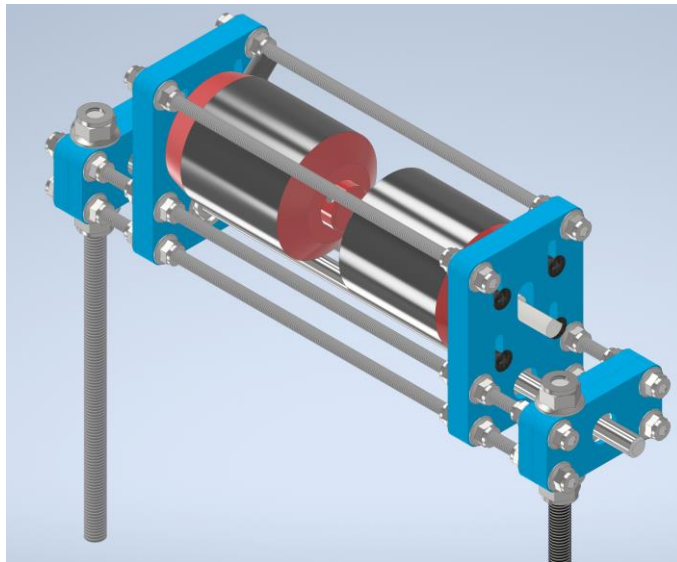
Seejärel disainiti mootori kinnitamiseks detail, millesse otsustati samuti panna laagrid, et jaotada laiali jõuvölli esinevaid jõude laagrite vahel (Joonis 2.7). Samuti hoiavad

lisatud laagrid jõuvõlli kindlamalt paigal mootorite suhtes. Disain võimaldab reguleerida mootori ja jõuvõlli vahelise keti pingutust liigutades mootorit üles või allapoole.



Joonis 2.7 Arendatud ülekande mootori kinnituse mudel koos laagriga

Hiljem modelleeriti disainitud detailidega koost (Joonis 2.8). Lõplikul disainil osutus probleemiks mootoritest väljatuleva juhtme asukoht, millele jäi ette keermelatt. Seetõttu kasutati ehitamisel varasemat disaini, mis ei võimalda mootori asukohta muuta keti pingutuse reguleerimiseks.



Joonis 2.8 Arendatud ülekande koost

Kuna rattad pöörlevad samal kiirusel, siis on asfaldil või sarnase pinnakattega teel sõitmine raskendatud, sest keerates liiguvad esirattad soovitud suunas, kuid tagumised jätkavad samas suunas. Selleks, et rattad omavahel lahti ühendada,



eemaldati kett ühelt rattalt, sest siis pole rattad omavahel lukustatud ning keeramine on asfaldil taaskord võimalik.

Asfaldil sõitmine ühe vedava rattaga töötas rahuldavalt, kuid lõpuks murdus keermelatt vedava ratta poolel. See juhtus, sest autor ei piiranud mootorite võimsust vastavalt nõuetele katsetamisel asfaltteel ning seetõttu tekkisid varasemast suuremad jõud eelkõige ühel poolel mootorikinnitust.

Ehitatud ülekande suureks eeliseks on võimalus tulevikus kasutada kahte mootorit, et luua nelikveoline sõiduk majanduslikult mõistliku hinnaga. Autor usub, et ülekande kinnitamine väändtelgedele vajab samuti arendamist – keermelattidega ehitatud kinnitus on küll majanduslikult mõistlik, kuid mitte kõige robustsem. Samuti soovitakse tulevikus ülekande tugevdamiseks asendada 3D prinditud plastikust detailid alumiiniumdetailidega.

Arendatud ülekandega muutus lõplik ülekandesuhe ning seeläbi muutusid sõiduki lõplikud parameetrid. Järgnevalt toodi ja arvutati välja sõiduki parameetrid arendatud ülekandega.

Hammasrattaste valimisel kasutati autoril varasemalt olemasolevaid hammasrattaid. Hammasrattas, mis on jõuvõllil mootori poolel, nimetati vastavalt mootoripoolseks jõuvõlli hammasrattaks  $n_{tJmootor} = 12$ . Sarnaselt nimetati ratta poolne jõuvõlli hammasrattas  $n_{tJrattas} = 10$ . Hammaste arv ratta hammasrattal jäi samaks väärtusega  $n_{trattas} = 68$  ning mootori küljes oleva hammasratta hammaste arvuks kujunes  $n_{tmootor} = 10$ . Uus ülekandetegur arvutati järgneva valemiga:

$$u_{reduktor} = \frac{n_{tmootor}}{n_{tJmootor}} \cdot \frac{n_{tJrattas}}{n_{trattas}} = 0,1225 \approx 8,16:1 \quad (2.1)$$

Lõpuks arvutati sõiduki kiirus järgneva valemiga, kus lähtuti mootori pöörlemissagedusest (aku nimipinge korral), reduktori ülekandetegurist ja ratta ümbermõõdust:

$$v_{akuNimi} = u_{reduktor} \cdot n_m \cdot C = 385 \text{ m/min} \sim 23 \text{ km/h} \quad (2.2)$$

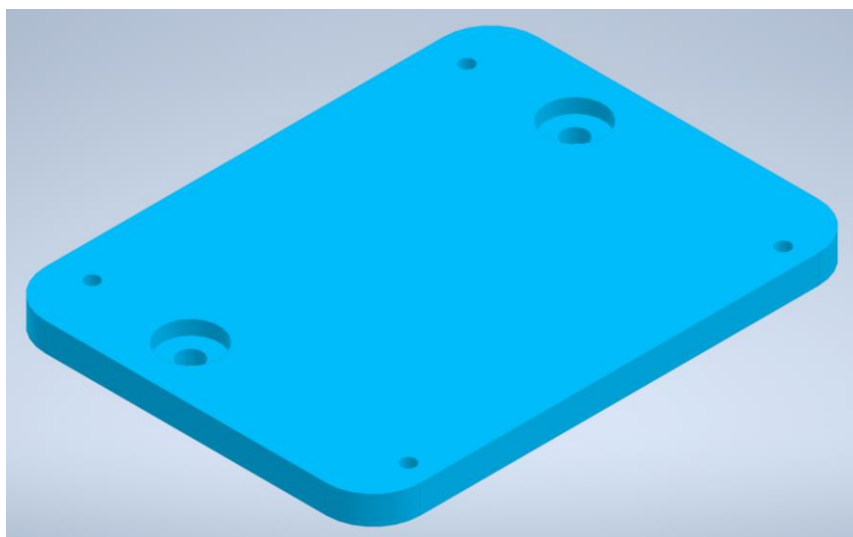
Saadud väärtus iseloomustab sõiduki kiirust akupingega  $E_{akuNimi} = 42 \text{ V}$ . Kui sõidetaks täislaetud akuga, mille pinge on 50,4 V, siis muutuks mootori maksimaalne

pöörlemissagedus suuremaks ning seeläbi kujuneks sõiduki tippkiiruseks 27 km/h, mistõttu piiratakse seda mootori juhtmooduliga.

### 2.1.3. Elektroonikakarp ja selle kinnitus

Elektroonikakarbiks otsustati kasutada 158x90x60 mm suurusega veekindlat projektikarpi (mudel W310) [44], sest sinna mahtus kasutatav elektroonika. Elektroonikakomponendid joodeti omavahel kokku ning seejärel loodi ühendused karbi kaanel olevate pistikute ja muhvidega. Elektroonika on sisuliselt kinnitatud ainult karbi kaane külge selle juhtmetega – karbi seinade ja elektroonika vahele suruti polüetüleenvahtu nii, et elektroonika oleks kinnises karbis paigal ja ei vibreeriks.

Karp sooviti kinnitada võimalikult lähedale mootoritele, ehk rulalaua tagumisse otsa. Karbi kinnitamiseks disainiti ja 3D prinditi vaheplaat, mis kinnitub nelja väiksema poldiga karbi külge ning kahe suurema poldiga rulalauale (Joonis 2.9).



Joonis 2.9 Elektroonikakarbi kinnituse mudel.

### 2.1.4. Aku ümbris

Akude ümbriseks otsustati õmmelda kott kasutades polüester riidet PU kattega, sest see materjal on veekindel ja tugev. Kotti ava kinnitamiseks kasutati trukke. Akukott ise ei ole veekindel, vaid vett hülgav, sest õmbluste vahelt saab vesi ikkagi kotti sisse. Samuti võib vesi kotti sattuda selle avast. Kott õmmeldi kokku kolmest kangatükist kasutades õmblusmasinat. Akukott tehti veidi suurem kui akupakk, et kotti sisse mahuks akude ümber polüetüleenvahtu vibratsioonide summutamiseks. Valmis tehtud

aku ümbrise pikkus, laius ja kõrgus on vastavalt 290 mm, 155 mm ja 90 mm. Lõplik aku kinnitati kahe koormarihmaga rulalaua külge (Joonis 2.10).



Joonis 2.10 Aku ümbris

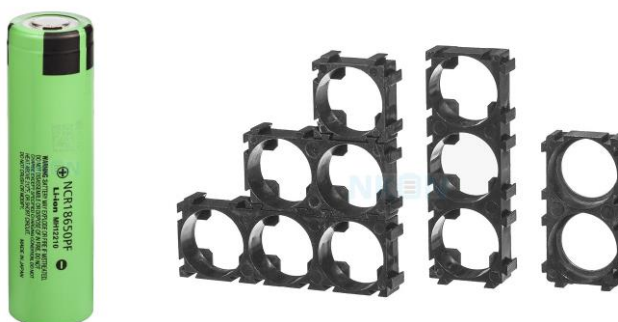
Pärast akuümbrise pikaajalist kasutamist jõuti järelduseni, et tulevikus peaks akule ehitama ka kõva kestaga raami, mis võtaks endasse kukkumisel (rulalaua ümberpaiskumise käigus) tekkivad jõud. See minimeeriks kukkumise järgseid ohte seoses akuga.

## 2.2. Elektroonika

Järgnevalt on kirjeldatud elektroonikaga seonduvat konstruktsiooni.

### 2.2.1. Akupakk

Akupakk ehitati eelnevalt valitud silindrilistest liitiumioon akuelementidest kasutades nende kinnitamiseks spetsiaalseid vaheseinu (Joonis 2.11).

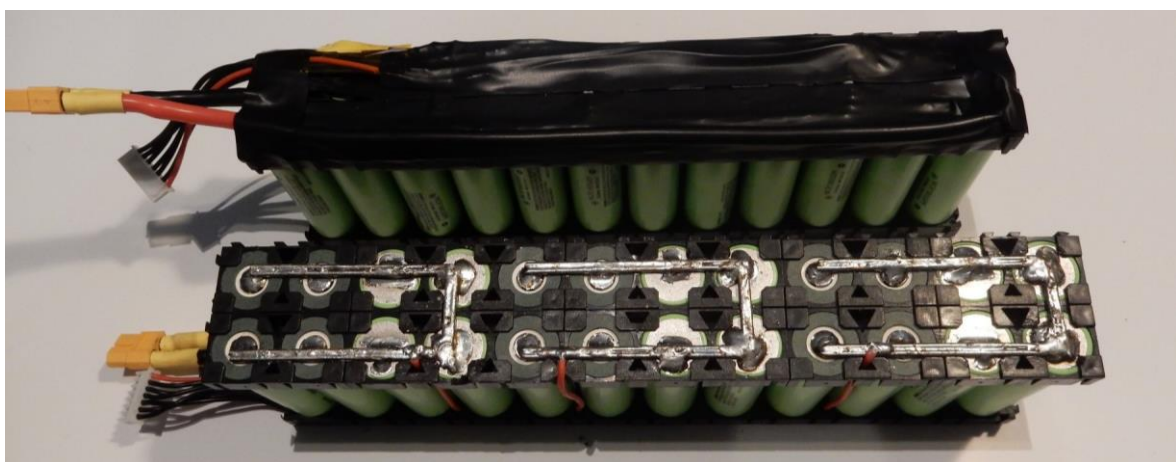


Joonis 2.11 Akuelement (vasakul) ja nende kinnitamiseks kasutatud vaheseinad (paremal) [45]  
[46]

Akuelemente hoiavad koos vahetükid, mis kinnituvad mõlemale poole silindrilist elementi. Enne elementide vahetükkidesse kinnitamist, pandi iga aku positiivse terminali poolele spetsiaalne paberist seib, et ära hoida võimalikke lühiseid, mis võivad tekkida jootmise või vibratsioonide tõttu - termokahanev rüüs, mis on aku ümber ei ole antud olukorras usaldatav, eriti pärast jootmist. Akude jootmine on üpris ohtlik võrreldes punktkeevitusega, sest jootmise käigus kuumutatakse ühte elementi rohkem ja kauem. Jootmise eelis on kindel ühendus elemendi ja juhi vahel, mille tõttu otsustati seda meetodit rakendada.

Akuelementide omavaheliseks ühendamiseks kasutati kahte 1,7 mm $\emptyset$  vasktraati paralleelselt, mis kaeti enne kasutust tinakihi, et vaskjuhe ei oksüdeeruks. Juhtide jootmiseks akudele kasutati 60 W jootekolbi suurima otsikuga, mis leidus. Samuti kasutati kõrgeimat temperatuuri kolvil, et ühe elemendi jootmine läheks võimalikult kiirelt vältimaks selle liigset kuumutamist.

Järgmisena joodeti akupaki negatiivsele ja positiivsele klemmidele jõukaablid, mille otsa joodeti XT60 tüüpi pistik (Joonis 2.12). Siis joodeti elemendi paaride ühenduste vahele peenem juhe, mille abil saab elementide vahelisi pingeid kontrollida ja vajadusel balansseerida. Balansseerimis-juhtmed lõigati lõpuks õigetesse pikkustesse ning juhtide otsa joodeti vastavad terminalid, mis sisestati lõpuks JST-XH tüüpi pistikusse. Akuelementide terminalide ja nende kohal jooksvate juhtmete vahele pandi mitu kihti isoleerpaela, et vältida vibratsioonidest tingitud juhtmete kulumist ja selle tulemusena lühiste teket.



Joonis 2.12 Akupakkide konstruktsioon

Hiljem keerati akupaki ümber üks kiht 2 mm paksust polüetüleenvahtu, et summutada sõites tekkivaid vibratsioone akupakis. Lisaks kaeti pehmendus läbipaistva teibiga ning pihustati üle kummiühendiga, et takistada vee sattumist akupakki (Joonis 2.13).

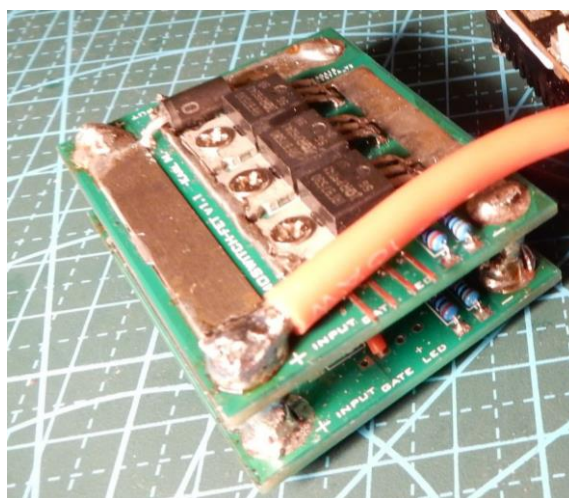


Joonis 2.13 Akupakkide tihendamine kummiühendiga

Akupakid jagati kaheks paariks ning ühendati jadasse läbi 40 A, 58 V sulavkaitsme [47]. Seejärel ühendati jadas olevad akupaki paarid omavahel paralleelselt.

### 2.2.2. Transistorlüli

Transistorlüli konstrueerimiseks kasutati kahte autori poolt varasemalt disainitud trükkplaati (Joonis 2.14), mis ühendati omavahel paralleelselt üksteise kohale kasutades võimalikult suurt juhti. Kõiki komponente jootes arvestati, et ühendused peavad vastu pidama vibratsioonidele.

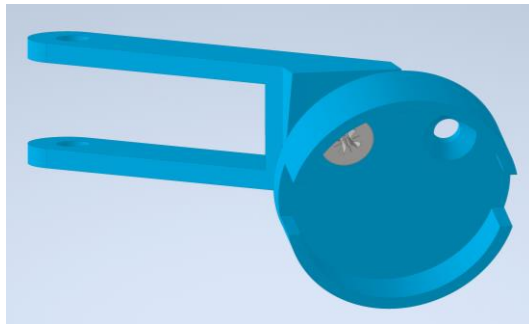


Joonis 2.14 Transistorlüli löplik konstruktsioon



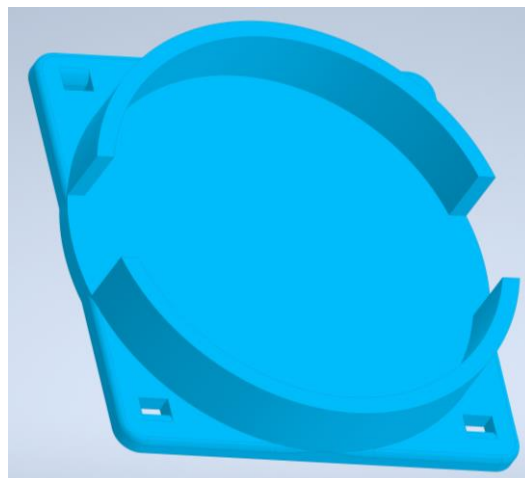
### 2.2.3. Esi- ja tagatuled

**Rula esituli** disainiti kahe tükina, et 3D printimine oleks lihtsam ning lõpptulemus vastupidavam (Joonis 2.15). Tükid kinnitati omavahel M4 poldi ja lukkmutriga. Tuli on rula külge kinnitatud kasutades lauas olevaid 9 mm auke ja M5 polte. Selleks, et hoida tulesid tsentreeritult rulalauas olevates aukudes, 3D prinditi sinna vastav vahesein. Esitulede ühendamiseks taaskasutati vana arvutihiire USB kaabel. Tuledest väljuvad kaablid tugevdati liimiga nende raami külge. Kaabel veeti laua alt kontrollerikarbini ja kinnitati rulalauale musta värvi kleeplindiga.



Joonis 2.15 Esitule koost

**Rula tagatule** kinnitus disainiti ja 3D prinditi ühe tükina (Joonis 2.16). Need kinnitati mootorikinnituse M6 keermelattide külge nelja kaablisidemega. Tugevate vibratsioonide tõttu mootorikinnituses kasutati tagatulede ühendamisel painduvaid silikoonjuhtmeid, et vältida juhi isolatsiooni kulumist. Samuti pandi juhtmete ümber kaitsev ja siduv spiraalvoolik, mille otsad liimiti tulede korpuste külge, minimeerides sellega juhtmetele avalduvaid jõude.



Joonis 2.16 Tagatule mudel

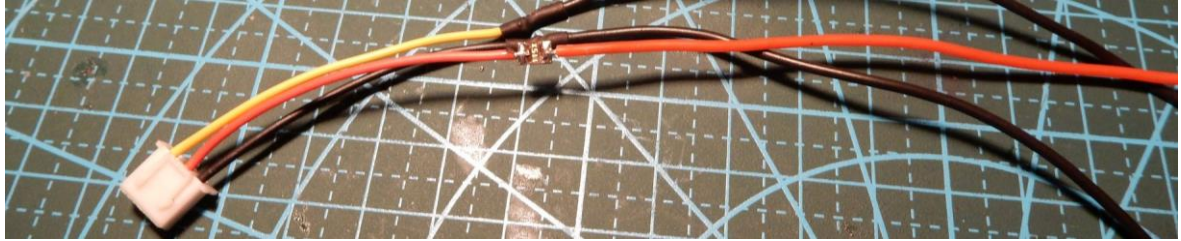
Kõik tuled on oma korpustesse liimitud läbipaistva neutraalse silikooniga, mis samal ajal tagab moodulite veekindluse (Joonis 2.17). Neutraalne silikoon ei kasuta kõvenemiseks äädikhapet, mis muidu hävitaks elektroonikat.



Joonis 2.17 Esi- ja tagatuled

Tulede ühendamisel kasutati kaitsmeid, et lühise esinemisel oleks elektroonika kaitstud ülevoolu eest. Kasutatud kaitsmed on taastuvad ehk ülekoormuse tekkimisel kuumeneb kaitse ning selle sisetakistus tõuseb koos temperatuuriga – koormuse eemaldamisel jahtub kaitse ning ahel hakkab jälle voolu juhtima.

Kaitsmed valiti teadmisega, et üks valgusdiod moodulil tarvitab maksimaalselt 60 mA [35]. Seega üks moodul, kus on 8 valgusdiodi, tarvitab maksimaalselt 480 mA voolu. Kuna kasutatud neli moodulit on jaotatud kaheks (esi- ja tagatulede jaoks eraldi), siis on teada, et ühele moodulipaarile on tarvis kaitset, mis võimaldaks süsteemi tööd 0,96 A voolutugevuse juures. Kasutatavateks kaitsmeteks valiti Polyfuse 1206L seeria kaitse, mis rakendub 1,1 A voolutugevusel [48] – need olid autoril varasemalt juba olemas ning sobisid antud süsteemi hästi. Kaitsmed paigutati võimalikult lähedale elektroonikakarbile (Joonis 2.18), sest eeldati, et potentsiaalne lühis võib tekkida tulede moodulites või neid ühendavas juhtmestikus.



Joonis 2.18 Tulede moodulite kaitse

#### 2.2.4. Tulede kontrolleri programmeerimine

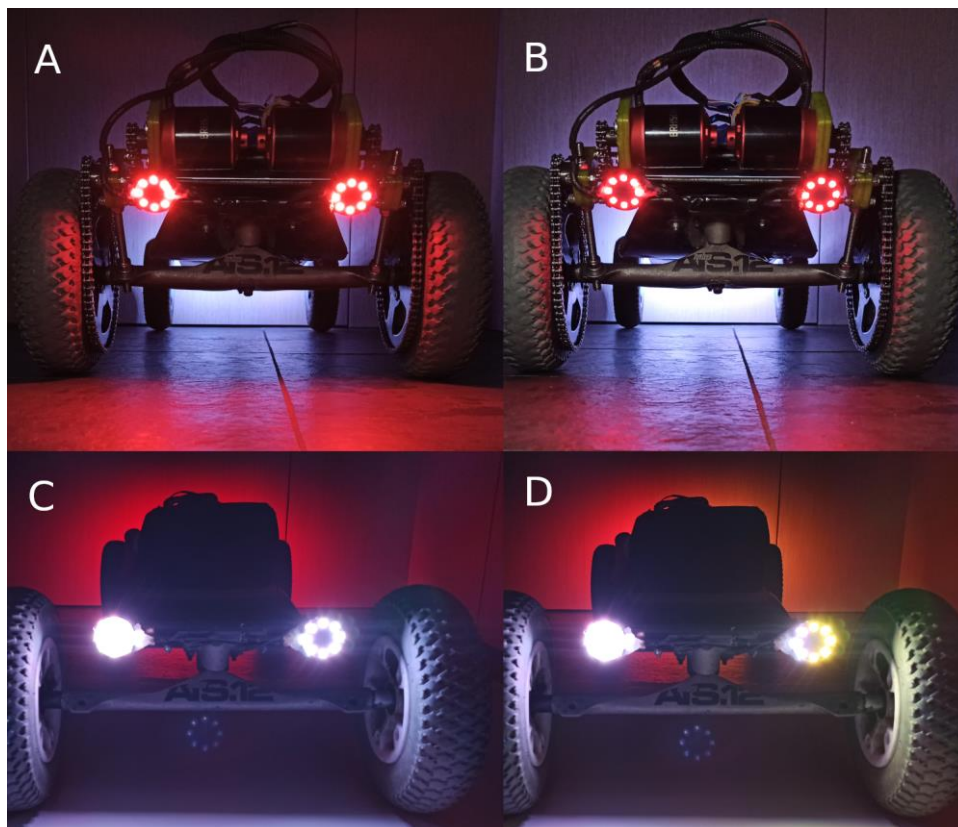
Tulede juhtimissüsteemi mikroprotsessor (Arduino nano) saab oma juhtsignaalid kätte puldi ressiiverist. Ressiiverist väljuva info puhul mõõdetakse sellest väljuva PWM signaali pulsilaiust. Ressiiver edastab infot kolmel erineval kanalil. Rulal on kokku neli tule moodulit, millest kaks on ees ja kaks taga - nagu sõiduautil.

Probleemid, mis on lahendatud puldil olevate kanalite abil:

- Tulede sisse- ja väljalülitamine - puldil oleva nupuga;
- Pidurdamisel piduritulede näitamine;
- Suunatulede näitamine - puldi „rooli“ keeramisega.

Koodi kirjutamiseks kasutati Arduino IDE tarkvara. Programm koosneb kolmest järgnevast osast: initsialiseerimine, põhitsükkel ja täidesaatvast funktsioonist. Esmalt initsialiseeritakse teegud, konstandid ja muutujad. Põhitsükklis loetakse ressiiverist saadud pulsilaiuse väärtuseid kõigil kolmel kanalil. Programm võrdleb saadud väärtuseid autori poolt defineeritud väärtustega ning seeläbi otsustatakse, kas näidata pidurdustulesid ja/või suunatulesid või lülitatakse tuled välja. Valgusdioodide seisu muutmiseks on loodud selleks eraldi täidesaatev funktsioon, mis muudab nende värvust ja heledust vastavalt põhitsükklis tehtud otsuste põhjal. Tulede mikroprotsessoril töötav kood koos täpsemate seletustega on välja toodud Lisas 3. Pildid sõidukil töötavatest tuledest erinevates olukordades (pidurdamisel, sõitmisel ja suunatule näitamisel) on välja toodud Joonisel 2.19.





Joonis 2.19 Pilt tagatuledest pidurdamisel (A), pilt tagatuledest sõites (B), pilt esituledest sõites (C), pilt esituledest suunatulega (D)

### 2.2.5. Mootori juhtmoodulite seadistamine

Kontrollerite seadistamiseks kasutati VESC Tool tarkvara. Esmalt tuvastati mootori parameetrid ning seejärel hall-andurite positsioonid staatoril. Pärast seda seadistati voolupiirangud mootorile ja akule. Hiljem seadistati ka veojõu kontroll mootorite vahel, et parandada maastikusõiduomadusi, kuid arendatud ülekande puhul seda enam tarvis ei olnud.

Kuna kontrollereid on kokku kaks, siis peab voolupiiranguid akule pannes need jagama kahega, ehk 40 A kontrolleri kohta, kui aku maksimaalne pidev voolutaluvus on 80 A. Mootori maksimaalseks vooluks seadistati tootja poolt ettenähtud väärtus 34 A.

Seejärel seadistati aku minimaalne pinge, mille juures kontrolleri lõpetab mootori juhtimise, et kaitsta akuelemente madalale pingele langemise eest. Väärtuseks otsustati kasutada 39,6 V (akuelemendi pinge 3,3 V), sest sellel pingel on kasutatud akuelement tühjaks laetud. Kui aku hakkab tühjaks saama, siis piiratakse voolutugevust nii, et akude pinge ei langeks koormatud olekus alla selle väärtuse.

Lõpuks tuvastati ressiiverist tuleva signaali maksimaal-, minimaal- ja keskväärtus ning seadistati pult juhtima volutugevust mootorisse pidurdamise võimalusega. Kasutati volutugevuse juhtimise meetodit, sest see võimaldab kasutajal juhtida väändemomenti. See tundus autorile kõige sobivam variant, sest see võimaldas juhtida sõidukit sujuvamalt maastikul ning andis kindlama tunde sõites.

Juhtmoodulite külge ei ole veel ühendatud *Bluetoothi* moodulit, mis võimaldaks seadistada juhtmooduleid mugavalt kaasaskantava seadmega - nutiseadmest saaks luua erinevaid eelseadistusi ning neid vahetada hõlpsalt ilma USB liideseta. Selleks, et sõiduk oleks liiklusesse lubatud, peab piirama selle mootorite maksimaalse koguvõimsuse 1000 W peale, mida *Bluetoothi* moodul võimaldaks teha hõlpsalt. Hetkel, kui plaanitakse sõita liikluses, piiratakse võimsust USB liidese kaudu arvutiga.

### 3. LÕPPTULEMUS

Töö raames elektriliseks ümberehitatud maastikurula on toodud Joonisel 3.1 (pealtvaates) ning Joonisel 3.2 (tagantvaates).



Joonis 3.1 Elektriliseks ümberehitatud maastikurula pealtvaates.



Joonis 3.2 Elektriliseks ümberehitatud maastikurula tagantvaates.

Elektriliseks ümberehitatud maastikurula võimaldas sõita erinevates oludes: pehmetel pinnastel (nt pinnasteed ja rohumaad) ja kõvematel pinnastel, nagu kruusateedel, munakiviteedel ning asfaltteedel. Sõiduk on vetthülgiv ning sellega sai sõita ka vihmase ilmaga – pärast sõitu pidi veenduma akupakkide kuivuses ning vajadusel võeti need oma ümbriseist välja, et vältida vee sattumist akudeni, mis põhjustaks

nende korrodeerumise. Vihmaga oli pehmematel pinnastel sõitmine raskendatud, sest muda, savi jm täitis rehvi mustri vahed, mis muutis pidevuse maapinnaga halvemaks.

Sõiduki tippkiirus on piiratud 25 km/h peale ning võimsust piirati vajadusel 1000 W peale liikluses liiklemiseks. Pikim vahemaa, mis läbiti ühe akulaadimisega oli 33 km – sõideti enamjaolt kõva pinnakattega teedel (asfalt, betoon, kruus jm) ning suur osa vahemaast läbiti linnaliikluses. Juhi ja tema varustuse mass oli kokku umbes 95 kg. Sellest sai järeldada, et sõiduki energiakulu oli suurem kui arvutuste tegemisel eeldati, kuid sellegipoolest vastas lõpptulemus püstitatud nõuetele.

Kaldteest üles sõitmist katsetati Tallinna lähedal Viimsis Laidoneri pargi mäel ning Lubjamäel. Autor mõõtis Laidoneri pargi mäel järsemaks tõusuks 10° ning selle koha pealt sõidu alustamine oli küll võimalik, kuid raskendatud. Rehvide haakuvus asfaldiga oli piiripealne ning liiga suure jõu rakendamisel hakkasid rehvid kohapeal pöörlema - mäest üles sõitmiseks kallutas juht end ettepoole, et hoida tasakaalu, kuid seeläbi kandus suur osa raskusest rulalaua vedavast tagateljest üle eesmisele teljele, mis võimaldas vedavatel rehvidel kergemini maapinnaga pidavust kaotada. Olukorda parandaks suurema laiusega rataste kasutamine. Eelnevalt mainitud mägedest üles sõitmine ei valmistanud raskusi.

Sõiduki lõplikuks kaaluks kujunes umbes 15 kg. See võimaldas maastikurula käes kandmist, kuid autor leidis, et selle käes hoidmine ei olnud mugavaim, sest rulal puudus konkreetne koht, kust seda hoida. Olukorda kergendaks käepideme kinnitamine rula raskuskesele.

Tuled töötasid üldjuhul korralikult, kuid pärast kahte hooaega lakkasid töötamast esituled. Põhjuseks oli nii halb joode kui ka tuld ühendava juhtme halb kinnitus rulalaua küljes. Kuna juhe oli halvasti kinnitatud, siis sõitmisel tekkivate vibratsioonide tõttu andis halb joode järgi.

Sõiduki nõrgeimaks lüliks osutus ülekande ja mootorite kinnitus rula väändteljele. Tugevate põrutuste tulemusena (nt äärekivist alla sõites) deformeerus ja hiljem murdus mootorikinnitus. Antud kinnitus pidas vastu umbes 700 km, millest kolmandik läbiti maastikul.

Võimalikud edasiarendused näevad ette ülekande tugevama kinnituse loomist ja ülekande katmist väliselementide eest, et see nõuaks vähem hooldust. Samuti soovitakse luua mehhanism, mis võimaldaks rataste (ja mootorite) omavahelist lukustamist vajadusel. Ülekandes olevad plastikdetailid asendatakse tulevikus alumiiniumdetailidega, et suurendada sõiduki vastupidavust veelgi. Lisaks



## KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua elektriline maastikurula, millel on ka olemas esi- ja tagatuled pimedas liiklemise jaoks. Peamisteks uurimismeetoditeks olid olemasolevate lahenduste uurimine ja analüüsimine, mõõtmine, modelleerimine ja katsetamine. Arvutusi tehti programmiga GNU *Octave*. Mudelid loodi modelleerimistarkvaraga *Autodesk Inventor* ning jooniste koostamiseks kasutati programme GIMP ja *Inkscape*. Elektriskeemid loodi programmis *KiCad*.

Maastikurula elektriliseks ümberehitamiseks püstitati nõuded ning tehti vajalikud arvutused. Lähtetingimused maastikurula konstrueerimiseks olid järgnevad:

- sõiduk peab olema piisavalt kerge, et seda käes kanda;
- võimaldama sõitu maastikul;
- võimeline kandma kuni 100 kg kaaluga juhti maastikul;
- suutma üles minna 10° tõusunurgast;
- läbima ühe akulaadimisega vähemalt 30 km;
- võimaldama sõita 25 km/h.

Sõiduk pidi olema juhitud juhtmevaba puldiga ning selle lõplik mass pidi olema väiksem kui 20 kg, sest teisel juhul oleks selle käes kandmine raskendatud.

Elektriliseks ümberehitatud maastikurula võimaldas sõita erinevates oludes: pehmetel pinnastel (nt pinnasteed ja rohumaad) ja kõvematel pinnastel, nagu kruusateedel, munakiviteedel ning asfaltteedel. Vihmaga oli pehmematel pinnastel sõitmine raskendatud, sest muda, savi jm täitis rehvi mustri vahed, mis muutis pidevuse maapinnaga halvemaks.

Maastikurulale lisati funktsioneerivad tuled – tagatuled annavad märku pidurdamisest ja vajadusel saab näidata ka suunatulesid puldiga või lülitada tuled üldse välja.

Mootorite maksimaalne elektriline võimsus on kokku 2800 W ning sõiduki suurim kiirus on 27 km/h. Sõiduki tippkiirus on piiratud 25 km/h peale ning võimsust piirati vajadusel 1000 W peale liikluses liiklemiseks. Pikim vahemaa, mis läbiti ühe akulaadimisega oli 33 km – sõideti enamjaolt kõva pinnakattega teedel (asfalt, betoon, kruus jm) ning üle poole vahemaast läbiti linnaliikluses.

Kaldteest ülessõitmist katsetati kuni 10° tõusunurgal. Mäest üles sõitmine stabiilsel kiirusel oli rahuldav, kuid järseima koha (10° tõusunurga) pealt sõidu alustamine oli küll võimalik, kuid raskendatud. Rehvide haakuvus asfaldiga oli piiripealne, mis

tulenes sõitja asendi muutmisest kallakul ning liiga suure jõu rakendamisel hakkasid rehvid kohapeal pöörlema.

Sõiduki lõplikuks kaaluks kujunes umbes 15 kg. See võimaldas maastikurula käes kandmist, kuid autor leidis, et selle käes hoidmine ei olnud mugavaim, sest rulal puudus konkreetne koht, kust seda hoida.

Sõiduki nõrgimaks lüliks osutus ülekande ja mootorite kinnitus rula väändteljele. Lõplik sõiduk vastas lähtetingimustele ning seda arendatakse tulevikus edasi, et muuta see vastupidavamaks ning mugavamaks.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Maxtrack Limited, *History of MBS and Mountainboarding*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://mbseurope.com/about-mbs-europe/history-of-mbs-and-mountainboarding/> Kasutatud: 27.11.2021.
- [2] T. Strong, *Sidewalk Surfing: The Gnarly History of Skateboarding Part I (1940s to 1972)*, 2018. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.museumofplay.org/2018/06/07/sidewalk-surfing-the-gnarly-history-of-skateboarding-part-i-1940s-to-1972/> Kasutatud: 27.11.2021.
- [3] Maxtrack Limited, *MBS Colt 90 – Constellatio*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.mbs.com/boards/10101-mbs-colt-90-mountainboard-constellation> Kasutatud: 27.11.2021.
- [4] Lauakuur, *Rula Krown Pro Judah Lion 8.0*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://lauakuur.ee/toode/rula-krown-pro-judah-lion-8-0/> Kasutatud: 27.11.2021.
- [5] *Liiklusseadus*. RT I, 30.11.2021, 18.
- [6] Maxtrack Limited, *MBS Comp 95 – Birds*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://mbseurope.com/product/mbs-comp-95-birds/> Kasutatud: 27.11.2021.
- [7] Y. Padmaraja, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, 2015. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/00885a.pdf> Kasutatud: 27.11.2021.
- [8] Racerstar, *Racerstar 5065 BRH5065 140KV 6-12S Brushless Motor Without Gear For Balancing Scooter*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://m.racerstar.com/racerstar-5065-brh5065-140kv-6-12s-brushless-motor-without-gear-for-balancing-scooter-p-114.html> Kasutatud: 27.11.2021.
- [9] HobbyKing, *Turnigy SK8 6374-130KV Sensored Brushless Motor (14P)*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-sk8-6374-130kv-sensored-brushless-motor-14p.html](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-sk8-6374-130kv-sensored-brushless-motor-14p.html). Kasutatud: 27.11.2021
- [10] HobbyKing, *Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-149KV Brushless Outrunner Motor*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-aerodrive-sk3-6374-149kv-brushless-outrunner-motor.html](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-aerodrive-sk3-6374-149kv-brushless-outrunner-motor.html). Kasutatud: 27.11.2021
- [11] C. Andrews, M. Soltero ja M. Mesganaw, *Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.ti.com/lit/an/slvaeg3a/slvaeg3a.pdf> Kasutatud: 27.11.2021.
- [12] B. Vedder, *Trademark Policies*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://vesc-project.com/trademark\\_policies](https://vesc-project.com/trademark_policies) Kasutatud: 27.11.2021.
- [13] B. Vedder, *VESC Hardware*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://vesc-project.com/node/311> Kasutatud: 27.11.2021.
- [14] N. Bowers, *The ultimate in precision and efficiency*, 2014. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.electronicsspecifier.com/products/communications/the-ultimate-in-precision-and-efficiency> Kasutatud: 27.11.2021.
- [15] VANDA ELECTRONICS, *VANDA ELECTRONICS SPEED CONTROLLER/MOTOR CONTROLLER*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://vandaelectronics.myshopify.com/products/vesc> Kasutatud: 27.11.2021.
- [16] LIPSKY, *FSESC 6.6 based upon VESC® 6 with Heat Sink*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://flipsky.net/collections/electronic-products/products/flipsky-fsesc-6-6-based-upon-vesc%C2%AE-6-heat-sink> Kasutatud: 27.11.2021.
- [17] Trampa, *VESC 6 MkV*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://trampaboards.com/vesc-6-mkv-in-cnc-t6-silicone-sealed-aluminium-box-with-genuine-xt90-connectors--vedder-electronic-speed-controller-trampa-special->

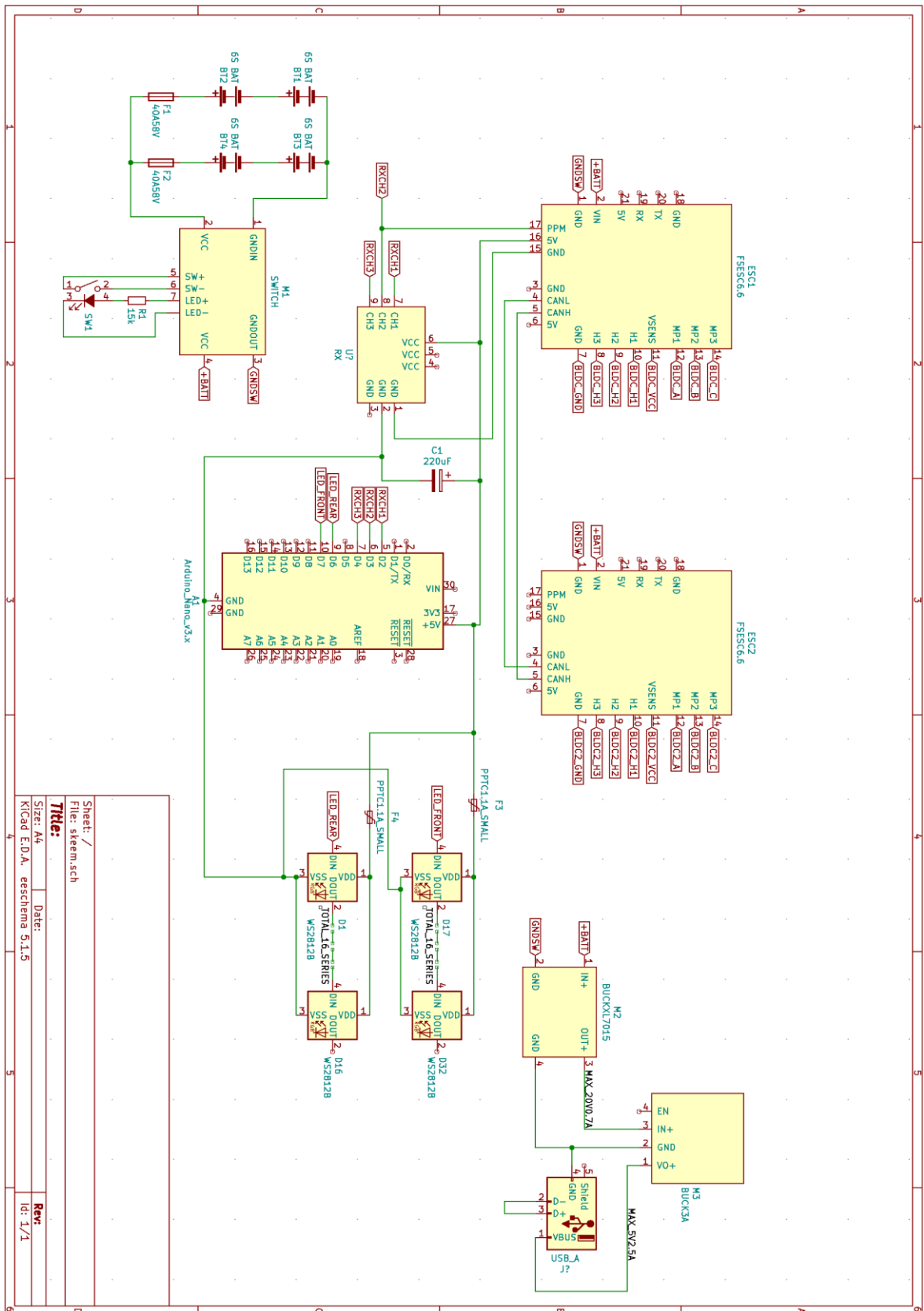


- p-27536.html Kasutatud: 27.11.2021.
- [18] Fly Sky, *FS-GT2B*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://static1.squarespace.com/static/5bc852d6b9144934c40d499c/t/5d25c72812b8160001379e0b/1562757074975/FS-GT2B-%E4%B8%AD%E8%8B%B1%E6%96%87%E8%AF%B4%E6%98%8E%E4%B9%A6+20170528.pdf> Kasutatud: 27.11.2021.
- [19] Battery University, *Is Lithium-ion the Ideal Battery?*, 2016. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://batteryuniversity.com/article/is-lithium-ion-the-ideal-battery> Kasutatud: 27.11.2021.
- [20] Panasonic, *NCR18650PF*, 2016. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://actec.dk/media/documents/70FC46554038.pdf> Kasutatud: 27.11.2021.
- [21] Battery University, *BU-409: Charging Lithium-ion*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion> Kasutatud: 27.11.2021.
- [22] AliExpress, *50.4V 4A 12S Lipo Car Lithium Battery Charger For 44.4V Li-ion Battery Electric Bike Bicycle Scooter With CE ROHS Fast charger*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.aliexpress.com/item/4001209068247.html> Kasutatud: 27.11.2021.
- [23] S. Hemavathi, „Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology”, *Energy Storage*, vol. 3, no. 2, 2020, <https://doi.org/10.1002/est2.203>
- [24] HobbyKing, *ISDT BG-8S Smart Battery Checker*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://hobbyking.com/en\\_us/isdt-bg-8s-smart-battery-checker.html?queryID=c7a56c1906ed6279faba803af65f49e9&objectID=72617&indexName=hbk\\_live\\_products\\_analytics](https://hobbyking.com/en_us/isdt-bg-8s-smart-battery-checker.html?queryID=c7a56c1906ed6279faba803af65f49e9&objectID=72617&indexName=hbk_live_products_analytics) Kasutatud: 27.11.2021.
- [25] Heltec, *3S-21S 5A Capacitive active equalization/Active Balancer*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://heltec-bms.com/project/5a-capacitive-active-equalization-active-balancer/> Kasutatud: 27.11.2021.
- [26] V. Vodovozov and R. Jansikene, *ELEKTROONIKA JA JÕUPOOLJUHTTEHNIKA*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2008.
- [27] International Rectifier, *IRFB3006PbF*, 2014. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.infineon.com/dgdl/irfb3006pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153561247681de9> Kasutatud: 27.11.2021.
- [28] International Rectifier, *IRFB7530PbF*, 2014. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.infineon.com/dgdl/irfb7530pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015364c3d98429c3> Kasutatud: 27.11.2021.
- [29] VISHAY, *SUP60020E*, 2019. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.vishay.com/docs/77056/sup60020e.pdf> Kasutatud: 27.11.2021.
- [30] TEXAS INSTRUMENTS, *Voltage Divider Calculator*, 2003. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.ti.com/download/kbase/volt/volt\\_div3.htm](https://www.ti.com/download/kbase/volt/volt_div3.htm) Kasutatud: 27.11.2021.
- [31] R. Lahtmets, *ELEKTROTEHNIKA ALUSED*, 2001. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro\\_alused/1Alalisvool.pdf](http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/1Alalisvool.pdf) Kasutatud: 27.11.2021.
- [32] Sparkfun, *Arduino Pro Mini 328 - 5V/16MHz*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.sparkfun.com/products/11113> Kasutatud: 27.11.2021.
- [33] Arduino, *Arduino Nano*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>. Kasutatud: 27.11.2021.
- [34] Arduino, *Arduino Micro*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://store.arduino.cc/products/arduino-micro>. Kasutatud: 27.11.2021.
- [35] Worldsemi, *WS2812B*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf> Kasutatud: 27.11.2021.
- [36] Oomipood, *WS2812 RGB led moodul 8bit ring*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud

- adressil:  
[https://www.oomipood.ee/product/ws2812\\_8\\_ring\\_ws2812\\_rgb\\_led\\_moodul\\_8bit\\_ring](https://www.oomipood.ee/product/ws2812_8_ring_ws2812_rgb_led_moodul_8bit_ring) Kasutatud: 27.11.2021.
- [37] Open Circuit, *WS2812B RGB LED - 10 PIECES*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://opencircuit.shop/product/WS2812B-RGB-led-10-pieces> Kasutatud: 27.11.2021.
- [38] J. Warner, *A Look at Belt, Chain and Gear Drive Technology*, 2017. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://www.powertransmission.com/blog/a-look-at-belt-chain-and-gear-drive-technology/> Kasutatud: 27.11.2021.
- [39] USA Roller Chain, *American Standard Roller Chain*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://www.usarollerchain.com/American-Standard-Roller-Chain-s/5388.htm> Kasutatud: 27.11.2021.
- [40] Maxtrack Limited, *MBS ATS.12 Truck*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://mbseurope.com/product/mbs-ats-12-truck/> Kasutatud: 27.11.2021.
- [41] H. Becker and L. E. Locascio, „Polymer microfluidic devices“, *Talanta*, vol. 56, no. 2, pp. 267-287, 2002, DOI: 10.1016/s0039-9140(01)00594-x
- [42] colorFabb, *colorFabb PETG Economy*, 2017. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: [https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS\\_E\\_ColorFabb\\_PETG\\_Economy.pdf](https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_PETG_Economy.pdf) Kasutatud: 27.11.2021.
- [43] MatterHackers, *ColorFabb Standard White PLA/PHA Filament - 1.75mm (0.75kg)*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://www.matterhackers.com/store/l/colorfabb-plapha-filament-075kg/sk/MGWP9SET> Kasutatud: 27.11.2021.
- [44] AliExpress, *158x90x60mm Waterproof Clear Electronic Project Cover Box Enclosure Plastic Case -W310*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://www.aliexpress.com/item/32804072335.html> Kasutatud: 27.11.2021.
- [45] nkon, *Panasonic NCR18650PF 2750mAh - 10A - 2016*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://eu.nkon.nl/panasonic-ncr18650pf-3-7v-2016.html> Kasutatud: 27.11.2021.
- [46] nkon, *2x18650 Battery Spacer holder*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://eu.nkon.nl/accessories/packaccessoires/spacer/2x18650-battery-spacer.html> Kasutatud: 27.11.2021.
- [47] ELFA DISTRELEC, *MDP040 - Auto Fuse 40 A 58V Green, iMaXX*, 2021. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: <https://www.elfadistrelec.ee/et/auto-fuse-40-58v-green-imaxx-mdp040/p/11029348> Kasutatud 27.11.2021.
- [48] Littelfuse, *POLY-FUSE® Resettable PTCs*, 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud adressil: [https://m.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/resettable\\_ptcs/littelfuse\\_ptc\\_1206l\\_datasheet.pdf.pdf](https://m.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/resettable_ptcs/littelfuse_ptc_1206l_datasheet.pdf.pdf) Kasutatud: 27.11.2021.

# LISAD

# Lisa 1. Elektroonikaskeem



Sheet: /	
File: skeem.sch	
<b>Title:</b>	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. - eschema 5.1.5	
	<b>Rev:</b>
	Id: 1/1

## Lisa 2. Arvutuste skript

```
clc
clear all

riderWeight = 100;           % Sõitja mass kg
boardWeight = 15;           % Sõiduki mass kg
totalMass = riderWeight + boardWeight;
wheelD = 0.2;
wheelR = wheelD / 2;

batVoltage = [39.6 42 50.4]; % Aku tööpingevahemik min, nimi, max v
batAh = 2.7 * 8;
batWh = batAh * 3.5 * 12;    %Aku mahutavus Wh

motorRPMRating = 5200;
motorVRating = 36;
motorPowerRating = 1200;    % Maksimaalne võimsuse rating
motorkVRating = 140;
motorEfficiency = 0.85;

% mootori väändemomendi arvutamine
motorRPMRating = motorVRating * motorkVRating * motorEfficiency;
motorRADpSRating = (motorRPMRating / 60) * (2 * pi);
motorNm = motorPowerRating / motorRADpSRating;

% kaldteest ülesmäge sõitmine%
slopeGradeDegree = 10; % tõus kraadides
% minimaalne vajalik jõud rattal, et sõita üles tõusust
forceMinReq = totalMass * 9.8 * sin(slopeGradeDegree * (pi / 180));
torqueMinReq = forceMinReq * wheelR;

theoreticalReductorRatio = 1/6;
reductorEfficiency = 0.9;
vehicEfficiency = 0.9;
% ühe mootori nõutud mehhaaniline väändemoment /2 sest kasutuses on kaks mootorit
motorTorqueReq = torqueMinReq * theoreticalReductorRatio / reductorEfficiency / vehicEfficiency / 2;
% break;

% sõiduki parameetrite arvutamine valitud komponentidega
% hammasrattad rattal, ülekandevõllil ratta ning
% mootori juures ja mootoril võllil vastavalt
gears = [68 10 12 10];
gearRatio = (gears(4) / gears(3)) * (gears(2) / gears(1));
motorRPM = batVoltage * motorkVRating * motorEfficiency;
wheelRPM = motorRPM * gearRatio;
C = 2 * pi() * wheelR
finalSpeed = wheelRPM * C %m/min
finalSpeed = wheelRPM * C /1000 *60 %km/h
```

### Lisa 3. Tulede kood

```
#include "FastLED.h"

// Define LED parameters
#define NUM_LEDS 16 //Front and back lights both have 16 LEDs, but they are connected
to two separate pins. The total amount of LEDs is 32
#define LEDPINREAR 6
#define LEDPINFRONT 7

CRGB backleds[NUM_LEDS];
CRGB frontleds[NUM_LEDS];

// Define led colors
const CRGB fullRed(255, 0, 0);
const CRGB dimRed(50, 0, 0);
const CRGB TurnYellow(255, 255, 0);
const CRGB FrontWhite(200, 200, 200);
const CRGB NoColor(0, 0, 0);

// Define global variables for timekeeping and blinking
unsigned long timebefore;
unsigned long blinkertimeBefore;
boolean blinkState=0;
int noOfBlinks=0;
int currentPattern=0;
int turnSignal=0;

void setup() {
  // Setup the PWM reader and the LEDs
  // https://create.arduino.cc/projecthub/kelvineyeone/read-pwm-decode-rc-receiver-input-
  and-apply-fail-safe-6b90eb
  setup_pwmRead();
  FastLED.addLeds<NEOPIXEL, LEDPINREAR>(backleds, NUM_LEDS);
  FastLED.addLeds<NEOPIXEL, LEDPINFRONT>(frontleds, NUM_LEDS);
  //Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  boolean toggleLights=0, braking=0;;
  int pwmValues[3];
  unsigned long timenow;
  timenow = millis();

  if(RC_avail() || timenow - timebefore > 25){
    timebefore = timenow; // Store the time into a variable for next cycles
    for(int i=0; i<3; i++){ // Put the pwm values into an array
      pwmValues[i]=pwmValue(i); // PWM values range from 1000 to 2000 (1500 idle) de-
      pending on the position of the RC controller potentiometers, the button on ch3 toggles between
      1000 and 2000
    }
    if(pwmValues[1]>1530){braking=0;}else{braking=1;} // Determine if the user is bra-
    king
    if(pwmValues[0]<1100){turnSignal=1; noOfBlinks=0;} // Determine turning left or right
    while setting noOfBlinks
    else if(pwmValues[0]>1900){turnSignal=2; noOfBlinks=0;} // to 0 to ensure we blink x
    times after the release of the joystick
    if(pwmValues[2]>1530){toggleLights=1;}else{toggleLights=0;} // Turn off the lights
    when the button is toggled to high state

    if(timenow - blinkertimeBefore > 600 && turnSignal!=0) { // If the turnsignal is pre-
    sent and one second has passed
      blinkertimeBefore = timenow; // Last time the function was ran
```

```

    blinkState= !blinkState;           // Toggle blinkState - 1 means the blinker is lit, 0
means the blinker is turned off

    if(noOfBlinks==3){ // If there has been 4 blinks (counting from 0)
        noOfBlinks=0; // Reset the blinker counter
        turnSignal=0; // Set turn signal to 0 to make sure the blinker does not run infinitely
    }

    if(blinkState){ // If the blinkState is 1, then light up the blink light and increase
the blink counter
        currentPattern=turnSignal; // Set the proper light pattern according to the turn signal
        noOfBlinks++;
    }else{ // If the blinkState is 0, turn off the blink light
        currentPattern=0;
    }
}

if(toggleLights){ // When the CH3 button is toggleed, turn off the lights
    switchLights(braking, 3);
}else{ // Otherwise allow the lights to run
    switchLights(braking, currentPattern);
}
}
} //end of loop

//This function drives the LEDs
void switchLights(boolean brakes, int pattern){

    for(int i=0; i<16; i++){ // Front lights to white
        frontleds[i]=FrontWhite;
    }

    if(brakes){ // When the brake is applied rear lights are at full brightness
        for(int i=0; i<16; i++){
            backleds[i]=fullRed;
        }
    }else{ // Dim the rear red light when no brake is applied
        for(int i=0; i<16; i++){
            backleds[i]=dimRed;
        }
    }

    switch(pattern){
        case 1: // Left turn signal light pattern
            for(int i=2; i<=6; i++){
                backleds[i]=TurnYellow;
                frontleds[i]=TurnYellow;
            }
            break;
        case 2: // Right turn signal light pattern
            for(int i=10; i<=14; i++){
                backleds[i]=TurnYellow;
                frontleds[i]=TurnYellow;
            }
            break;
        case 3: // All lights off
            for(int i=0; i<16; i++){
                backleds[i]=NoColor;
                frontleds[i]=NoColor;
            }
            break;
    }

    FastLED.show(); // Show the LEDs we configured
}

```