



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ELEKTRIKARTAUTO KONTSEPTSIOONI ARENDAMINE JA EHITUS

CONCEPT DEVELOPMENT AND BUILDING OF ELECTRICALCART
BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Harri Oras

Üliõpilaskood: 164811AAVB

Juhendaja: Anton Rassõlkin

Tallinn, 2019

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Harri Oras, 164811
Õppekava, peeriala: AAVB Elektroenergeetika
Juhendaja(d): Hamidreza Heidari, Anton Rassõlkin (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Elektrikartauto kontseptsiooni arendamine ja ehitus

(inglise keeles) Concept development and building of electricalcart

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida ja paigaldada mootor, mis vastaks lähteandmete parameetritele.
2. Uurida aku variante ja otsustada, mis sobiks antud ülesande jaoks, seejärel ühendada süsteemiga.
3. Mootori ja aku parameetrite põhjal leida kontrolleri, mis suudaks süsteemi juhtida, ning seejärel ühildada see kontrolleri ära mootori ja käsigaasiga.
4. Ehitada või muretseda kasutajasõbralik aku laadimissüsteem.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete kogumine	15.02.2019
2.	Arvutuste teostamine, teoreetilise osa kirjutamine	01.03.2019
3.	Lõputöö esimese mustandi esitamine juhendajale	01.03.2019
4.	Mootori, aku ja kontrolleri valik, teoreetilise osa kirjutamine	15.03.2019
5.	Lõputöö teise mustandi esitamine juhendajale	01.04.2019
6.	Mootori ühendamine; gaasi ja kontrolleri ühildamine; aku ühendamine	15.04.2019
7.	Testimine ning teoreetilise osa kirjutamine	30.03.2019
8.	Lõputöö viimase mustandi esitamine juhendajale	06.05.2019
9.	Lõputöö esitamise tähtaeg	13.05.2019

Töö keel:

Lõputöö esitamise tähtaeg: "....."201....a

Üliõpilane: "....."201...a
/allkiri/

Juhendaja: "....."201...a
/allkiri

Konsultant:

"....."201...a

/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
SISSEJUHATUS	8
1 TEHNIKA TASEME ANALÜÜS JA KASUTATAV TOPOLOOGIA.....	9
1.1 Elektrisõidukid, sh kergelektrisõidukid.....	9
1.2 Vajaliku mootori võimsuse arvutus.....	10
1.3 Mootori valik	12
1.4 Juhtimismuunduri parameetrid ja valikud	15
1.5 Akupatarei valik	18
1.6 Juhtimiskomponendid.....	22
1.7 Tagasisideandurid.....	25
2 ELEKTRIKARTAUTO EHITUS	27
2.1 Elektrikartauto elektroonika	27
2.2 Elektrikartauto mehaanika.....	30
3 KATSETAMINE.....	32
3.1 Katsetuste teooria	32
3.2 Elektrikartauto katsetused.....	32
KOKKUVÕTE	34
Summary.....	36
Kasutatud kirjanduse loetelu	38

EESSÕNA

Lõputöö sai alguse tänu Anton Rassõlkini välja pakutud teemale, mille alusel koos tema abiga sai sõnastatud töö nimetus ning ka algandmed. Töö praktiline osa koostati elektrimasinate laboris ja TTÜ Robotiklubi ruumides. Lõputöö praktilises osas soovin ka tänada Mati Raadikut, kes tegeles enda lõputöö raames elektrikartauto mehaanikaga ja vahest aitas elektroonika osa nõuga ja vajadusel ka jõuga.

Lõputöös leidsin sobilikud detailid elektrikartauto ehituseks, nendeks olid järgnevad: Mootor, Juhtimismuundur, akupatarei, juhtimiskomponent ja tagasisideandur. Kui valitud ja tellitud jupid kohale jõudsid, sai jätkatud komponendi tasemel katsetamisega ning kogu elektroonika monteerimisega. Pärast ehituse lõppu toimusid veel viimased katsetused, et kindlustada kardi töökindlust.

Lühendite ja tähiste loetelu

P	– Võimsus, [W]
T	– Pöördemoment, [N·m]
f	– Mehaaniline sagedus, pöörete arv sekundis, [$1\cdot s^{-1}$]
n	– Pöörlemissagedus(<i>rounds per minute</i>), [$1\cdot \text{min}^{-1}$]
i	– reduktori ülekandetegur
F	– Jõud, [N]
r	– Ratta raadius, [m]
a	– Sirgjooneline kiirendus, [$\text{m}\cdot s^{-2}$]
m	– Kardi ja juhi kogumass, [kg]
v	– Kiirus mille saavutab teoreetiliselt 10 sekundiga, [km/h]
t	– aeg mis läheb vaja, et kart saavutaks kiiruse 20 km/h
DRO	– digitaalne näit(<i>Digital readout</i>)
ω	– nurkkiirus, [$\text{rad}\cdot s^{-1}$]
ESC	– elektrooniline kiiruse kontrollier(<i>Electronic Speed Controller</i>)
PWM	– pulsilaiusmodulatsioon(<i>Pulse-Width Modulation</i>)
N	– mootori elektrooniline võimsus, [W]

SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärgiks oli korda teha elektrikartauto, edaspidi ka kart, mis pärast saatuslikku õnnetust ja lahtivõttu seisis Taltechi elektrimasinate teaduslaboris. Lõpp eesmärgiks oleks teha praegusest kardi kerest ringi liikuv ja juhitud masin, mida saaks kasutada tulevikus Taltechi reklaamimiseks ning tudengite huvi suurendamiseks tehniliste alade vastu. Kardi hetkeseisus on puudu mootor, aku, töötav gaasipedal ja kontrollid, mis moodustaks terviku. Veel olid kardi rattad, raam ja ka kere vigasid. Ülessandeks oli leida kõikide mehhanismide parameetrid, mis vastaksid algandmetele, ning siis nende parameetrite järgi välja valida detailid. Pärast detailide kätte saamist pidi kõik kokku ühendama ja tõestama, et valitud osad ühilduvad ja töötavad koostöös.

Kardi elektroonika välja valimiseks vajalikud algandmed said mõõdetud ja välja valitud vastavalt:

- Sõidukiirus, mis on saavutatav 10 sekundiga – 20 km/h
- Kardi kaal koos juhiga – 120 kg
- Sõidu aeg täisvõimsusel – 15 minutit
- Ratta raadius – 125 mm

Elektroonika detailide võimsuste arvutamiseks kasutasin mitmeid erinevaid tavapäraseid valemeid, kui ka internetist saadud infot. Kõik raalprojekteeritud detailid said tehtud Solidworks keskkonnas. Kui oli vajadus midagi 3D printida, siis detailide mudelid said ettevalmistatud printimiseks kasutades Ultimaker Cura programmi, ning välja printitud Ultimaker 2 3D printerit kasutades. Elektroonika skeemi koostas internetis oleva tarkvaraga, EasyEDA.

Lõputöös on kolm suuremat peatükki, kus esimeses osas toimub elektroonika detailide ülevaade ja valikute arutelu, mis lõppeb valitud detaili selgitusega. Teises osas selgitan ehitamise protsessi, koos esinenud probleemidega, ning viimases osas kirjeldan elektrikartauto ja iga komponendi eraldi katsetamisest. Töö esimeses pooles annan ka kerge ülevaate elektrisõidukite ajaloost, ning ka tänapäevast.

1 TEHNIKA TASEME ANALÜÜS JA KASUTATAV TOPOLOOGIA

1.1 Elektrisõidukid, sh kergelektrisõidukid

Kõige esimene elektriauto leiutati ja ehitati 1832 ja 1839 vahel Robert Anderson-i poolt, mis kasutas ühekordseid patareisi ja ei olnud midagi muud kui millegi uue katsetamine. Veel pool sajandikku olid elektri autod üsna laiatarbeline, kuid sise põlemismootoriga autod võtsid turu üle tänu lihtsamale ja kiiremale tankimisele, ning suuremate sõiduaegade tõttu [1]. Tänapäeval on elektriautod tegemas tagasitulekut [2], ning koos nendega ka mitmed muud kergelektrisõidukid, nende näiteks on elektrilised jalgrattad, rulad, tõukerattad ja monorattad.



Joonis 1.1 Monoratas [3]

Neid kergelektrisõidukeid kasutatakse peamiselt kasutatakse linna sisese transpordi lihtsustamiseks, kiirused ja vahemaad on valitud sobilikuks just selleks otstarbeks. Viimastel aastatel on tulnud palju nišši tooteid, mis on aeglasti leidnud ka oma tee tavakodanikke sekka, nendeks on mitmed monorattad, mida võib näha Joonis 1.1 peal, ja ka tasakaaluliikurid. Nende sõidukite mõte on lihtsustada liikumist väiksematel vahemaadel, kuid sõiduki mõõtmed on piisavalt väikseid, et neid saab ka lihtsalt kaasas vedada, kui on soovi liikuda lihtsamalt ka kaugemal algpunktist. Transporditavus on ka tähtis, kuna väikese mõõdu tõttu saavad akud üsna kiiresti tühjaks, seega tihti peab osa teest läbima sõidukit kandes.

1.2 Vajaliku mootori võimsuse arvutus

$$P = T \cdot \omega \quad (1.1)$$

$$T = F \cdot r \quad (1.2)$$

$$P = T \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1.3)$$

Enne mootori valikut tuleb kindlaks teha soovitava mootori parameetrid, kõige tähtsam valik on mootori võimsus, mille arvutus valemile leiab valemist 1.1 [4]. Jõumoment ja pöörete arv sekundis tuleb leida omakorda algandmete kaudu.

$$T = F \cdot r \quad (1.4)$$

$$F = a \cdot m \quad (1.5)$$

Valemi 1.4 abil on võimalik jõumomenti defineerida teiste muutujatega, millest raadius on olemas ja jõu leiab valemi 1.5 järgi.

$$a = v/t \quad (1.6)$$

Kiirendus valemis 1.5 leiab valemi 1.6 järgi, millest nii v kui ka t on algandmetest kättesaadav.

$$P = \frac{v}{t} \cdot m \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1.7)$$

Pannes eelmised lihtsustused tagasi valemisse 1.3, on võimalik tuletada uus valem, valem 1.7. Uues valemis on ainult üks tundmatu, milleks on f , ehk pöörete arv sekundis.

$$f = \frac{v}{r \cdot 2 \cdot \pi} \quad (1.8)$$

Ratta pöörlemise kiiruse, ehk ka mootori pöörlemiskiiruse leiab suurima liikumiskiiruse ja ratta raadiuse järgi kätte, mida kasutan valemis 1.8.

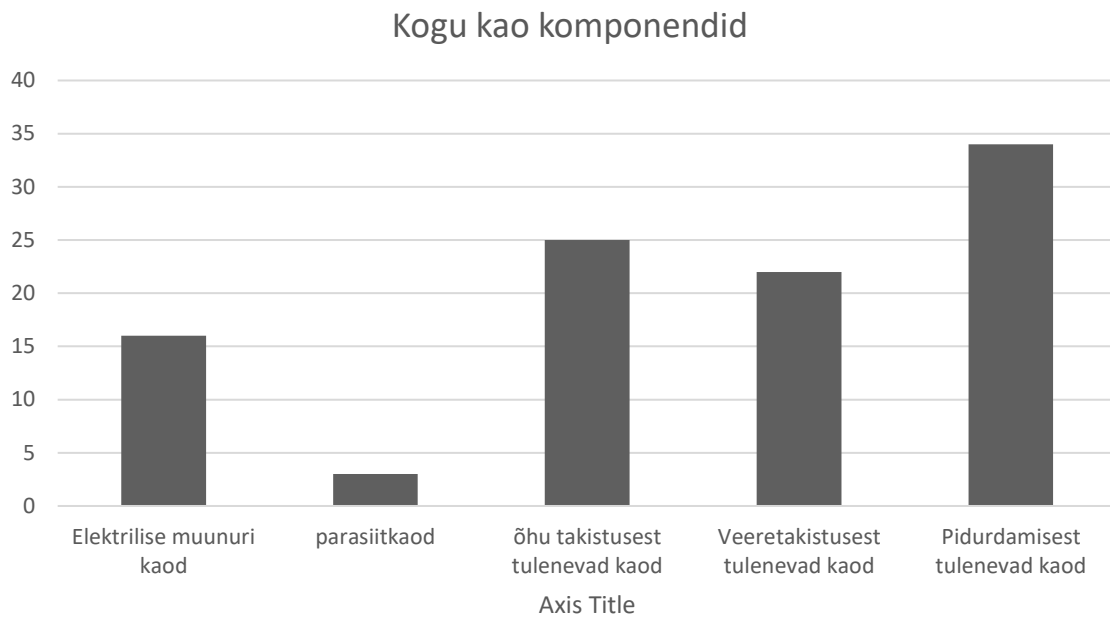
$$P = \frac{v^2}{t} \cdot m \quad (1.9)$$

Algandmetega saab välja arvutada mootori võimsuse läbi, lihtsustatud ja ümber defineeritud, valemi 1.9.

$$P = \frac{(20/3.6)^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10 \text{ s}} \cdot 120 \text{ kg} = 370 \text{ W}$$

Pannes algandmed valemisse leiab, et mootori võimsus teoorias võiks olla 370W.

Kuid reaalses elus on mitmeid erinevaid kadusi, millega tuleb ka arvestada. Elektriautode kadudeks loetakse kuni 40% [5] [6].



Joonis 1.1 Elektrilise mootori kadude komponendid

Kogu kaod aga omakorda koosnevad mitmest erinevast kaoliigist, kogu kadudest loetakse, et „linnasõidul, 16% on elektrilise muunduri kaod, 3% parasiitkaod, 25% õhu takistus, 22% veeretakistus ja 34% pidurdamisest tulenevad kaod, mida on ka näidatud Joonis 1.1 . Kadudest tulenevalt läheb 60% kogu võimsusest edasi liikumisele elektriautodel.

$$P_{\text{reaal}} = \frac{370 \text{ W}}{0,6} = 620 \text{ W}$$

Uue arvutusega leiab, et mootori võimsus peaks olema vähemalt 620W. Kuid kuna arvutus oli tehtud elektriauto, mitte elektrikardi, kohta, mis on üsna kindlalt voolujoonelisem ja efektiivsem kui elektrikart, siis tuleks võtta isegi suurema võimsusega mootor ja vajadusel kontrolleri ja gaasi kalibreerimisega võimsust tagasi võtta natuke. Seega mootor peaks olema üle 650W võimsusega. Teiseks mootori valimiseks vajalikuks parameetriks on mootori nimi pöörde arv, ehk mootori RPM.

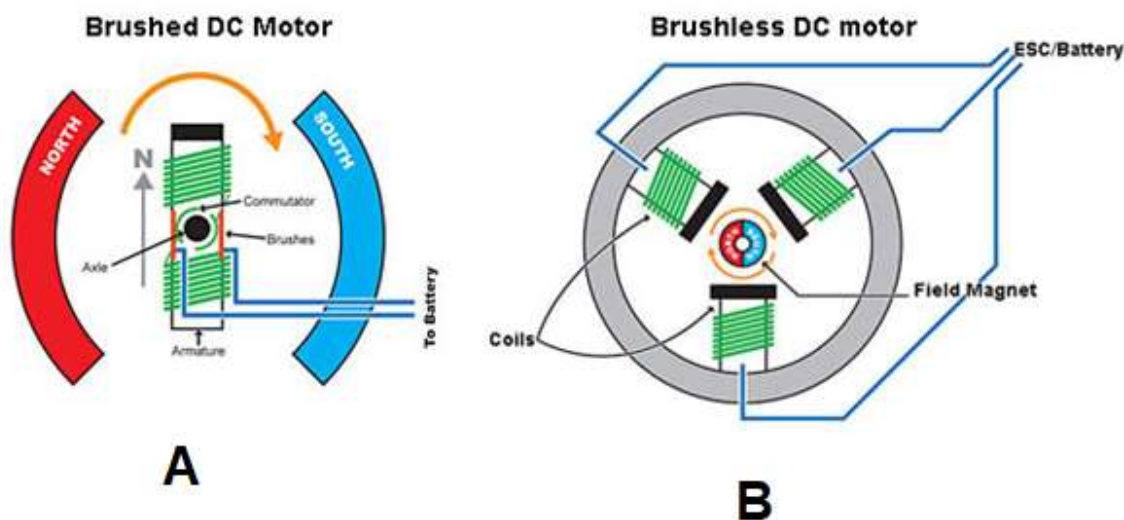
$$n = f \cdot 60 = \frac{v}{r \cdot 2 \cdot \pi} \cdot 60 \tag{1.10}$$

$$n = \frac{20/3,6}{0,125 \cdot 2 \cdot \pi} \cdot 60 = 420 \frac{p}{min}$$

Läbi valemi 1.10, saab teada et soovitud masina nimi RPM peaks olema 420 või rohkem. Varu olemasoluks ümardan selle üles 500 pöördeni minutis. Kuna ühegi elektrimootori RPM ei ole nii väike, siis tuleb kasutada ülekannet, mille täpne väärtus oleneb mootorist mis lõpuks valitud saab.

1.3 Mootori valik

Mootorite valikus on kaks enamlevinud kategooriat, mille vahel valida: harjastega ja harjadeta alalisvoolu mootorid. Kuigi mootorid töötavad sarnase tehnoloogiaga, staator ja rootor, erinevuseks on mähiste asetus, kui harjastega mootoril on mähised rootori küljes, siis harjadeta alalisvoolumootoril on need staatoris, nagu on näha Joonis 1.3 peal.



Joonis 1.3 Harjastega ja harjadeta alalisvoolumootori võrdlus [7] A – harjastega mootori ehitus. B – harjadeta mootori ehitus

See väike iseärasus ehituses annab suure erinevuse mootori käitumises. Harjadeta mootori eeliseks on tema efektiivsus, töökindlus, väiksemad mõõtmed ja suurem kiirendus [8]. Efektiivsuse eelise saab harjadeta mootor tänu puudevatele füüsiliste harjaste, mis harjastega mootoris lisavad hõõrdetakistust ja tekitavad lühikesi ja lühiajalisi kaarlahendusi. Sellised nähtused tekitavad omakorda kadusi ja vähendavad efektiivsust. Töökindluse eelise saavutab harjadeta mootor tänu sellele, et mootoris ei ole harjaseid, mis ajapikku kuldavad hõõrdumise tõttu ja vajavad väljavahetamist. Veel aitab juurde see, et harjadeta mootorid on enamjaolt suletud väliskeskkonna suhtes, seega väline reostus ei saa mootori sisse nii kergelt, pikendades mootori eluiga. Väiksemad mõõtmed tulenevad suuremast efektiivsusest, ehk sama võimsuse juures ei pea mootor nii suur olema, ja sellest, et rootor ei pea olema nii suur, õigesti ehitades saab hoida kõvasti kokku mootori mõõtmetelt. Suurem kiirendus harjadeta mootoritel tuleb peamiselt suuremast pöörlemisagedusest. Kuna harjadeta mootoril ei ole osi, mis ei talu suuri pöörlemisagedusi, nagu näiteks harjased, siis pannakse harjadeta mootorid enamjaolt kordades kiiremini pöörlema kui harjastega mootorid. See erinevus lubab saavutada suurema jõumomendi, kuid toob endaga kaasa ka probleeme [9]. Hoolimata paljudest nimetatud eelistest, mis on harjadeta mootoritel on harjastega mootorid ikka laias kasutuses ja seda heal põhjusel. Harjastega mootorid on märgatavalt

lihtsam kontrollida, piisab alalisvoolust ja mootor töötab, kuid harjadeta mootorid vajavad selleks erilist kontrollit, mida nimetatakse ESC-iks, mis võib tihti maksta rohkem kui mootor ise, eriti kui tahta head juhitavust. Veel annab lihtne ehitus eelise parandamisel, tootmisel kui ka töökindlusel. Tänu vähesele elektroonikale on harjastega mootoritel lihtne vigu tuvastada ja neid parandada. Veel enam, kuna erinevaid mehhanisme ja detaile on vähem, siis on ka vähem osi mootoril, mis saavad katki minna. [9]

Elektrikartauto mootori valimiseks sai eelmises alapeatükis välja arvatud, et mootori võimsus peaks olema vähemalt 650W ja RPM 500, või siis kohe välja arutama ülekande, et saavutada tahetud RPM. Võimsused valin suuremad, kuna lihtsam on piiritleda mootori võimsust, kui seda juurde saada pärast detailide valimist. Mootori täpseks valikuks tekitan võrdlustabeli, kuhu saan kirja panna nii mootori, kui ka ostukoha, positiivsed ja negatiivsed küljed. Ülekande leidmiseks jagan soovitud pöörded mootori pööretega, ning lihtsustan või ümardan lähimate täisarvudeni kasutades valemit 1.11

$$i = \frac{n_m}{n_s} \quad (1.11)$$

Mootori valikul sattusin väikse probleemi otsa, kuna tahetud võimsus oli natuke liiga suur, et leida häid mootori valikuid. Mootorid mis on enamjaolt mõeldud väiksemate kartide ja elektriliste kergliiklussõidukite toitmiseks, on tüüpilisel 500W või väiksemad. Võimsamad kui 500W mootorid olid juba tööstus otstarbeks, ehk nõudsid vahelduv voolu ja ka mõnikord tööstusvoolu, mida elektrikartauto otstarbeks ei saanud kasutada.

Tabel 1 Mootorite valikud koos positiivsete ja negatiivsete külgedega

Mootor, koos ostulingiga	Positiivne	Negatiivne	Hind ¹	Optimaalne ülekanne
BL motor 3650 3900KV 4P ²	<i>Brushless</i> mootor on suure võimsuse ja madala suurusega, väga hea hinna ja võimsuse suhe. Kaasas kontrolleri	<i>Brushless</i> vajab erilist kontrolleri, Nimipöördeka on 60000 pööret minutis mis on äärmiselt suur, <i>sensorless</i> mootor on nõrgema momendiga	40€	120:1
MY1020, 36V ja 750W mudel ³	Kaasas kontrolleri ja gaasi	Mootori müüjal puudub suur hinnagute pagas	146€	20:3
MY1020, 36V ja 1000W mudel ⁴	Odav ja võimas	Väheostetud, ehk väheste hinnangutega	96€	50:7

Mootoritest valisin, kasutades tabel 1, lõpuks 1000W mudeli. Teiseks valikuks oleks olnud sama võimas harjadeta mootor, kuid antud mootori nimipöörded olid liiga suured, mille tõttu oleks pidanud kasutama kallist ja potentsiaalselt väiksema töökindlusega ülekannet. Kolmandaks valikuks oleks olnud 750W mootor, millel oli kontrolleri ja gaasi kaasas, kuid sai valitud võimsam varjant.

¹ Seisuga 12.03.2019

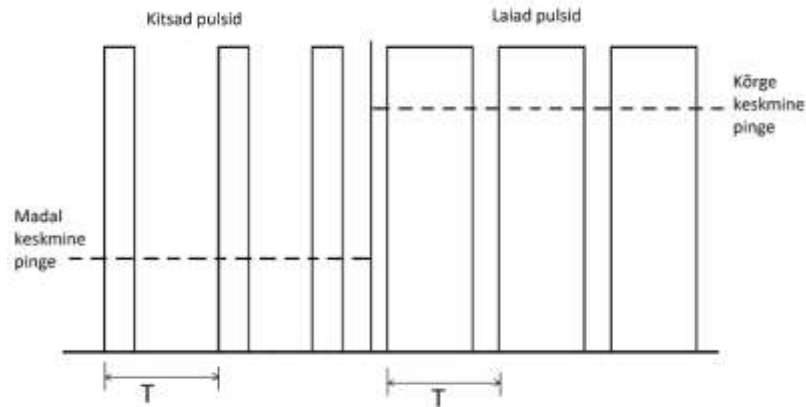
² <https://www.rcmoment.com/p-rm4504.html>

³ https://www.amazon.co.uk/L-faster-Motorcycle-Conversion-UNITEMOTOR-Permanent/dp/B071WVPT4C/ref=nav_ya_signin?ie=UTF8&qid=1551616086&sr=8-3&keywords=electrical+motor+750W&

⁴ https://www.amazon.de/dp/B00NWAS39K/ref=sspa_dk_detail_4?psc=1&pd_rd_i=B00NWAS39K#customerReviews

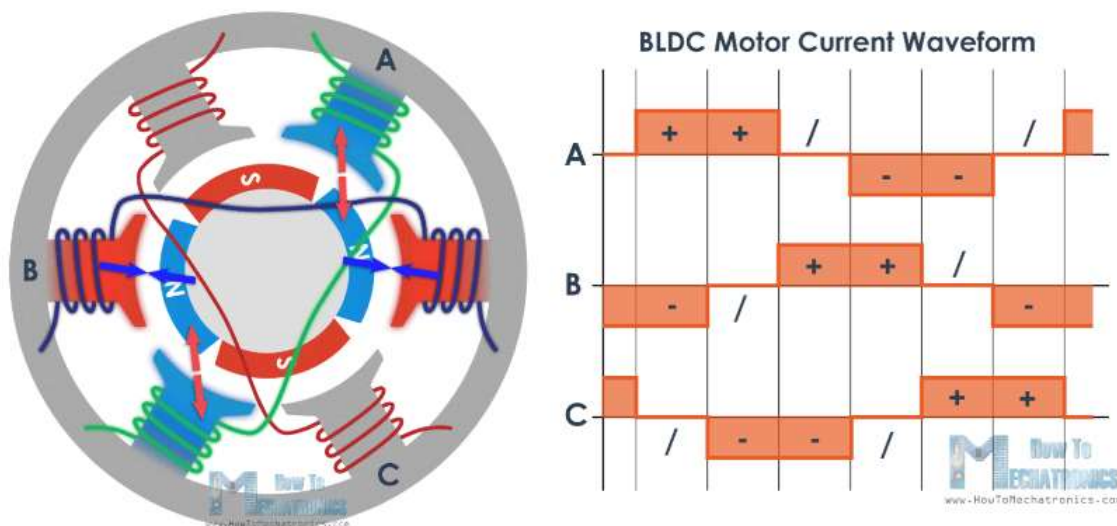
1.4 Juhtimismuunduri parameetrid ja valikud

Juhtimismuundur või kiiruse kontroller on väga tähtis osa nii harjastega kui ka harjadeta mootori juhtimise jaoks.



Joonis 1.4 PWM ja keskmine pinge

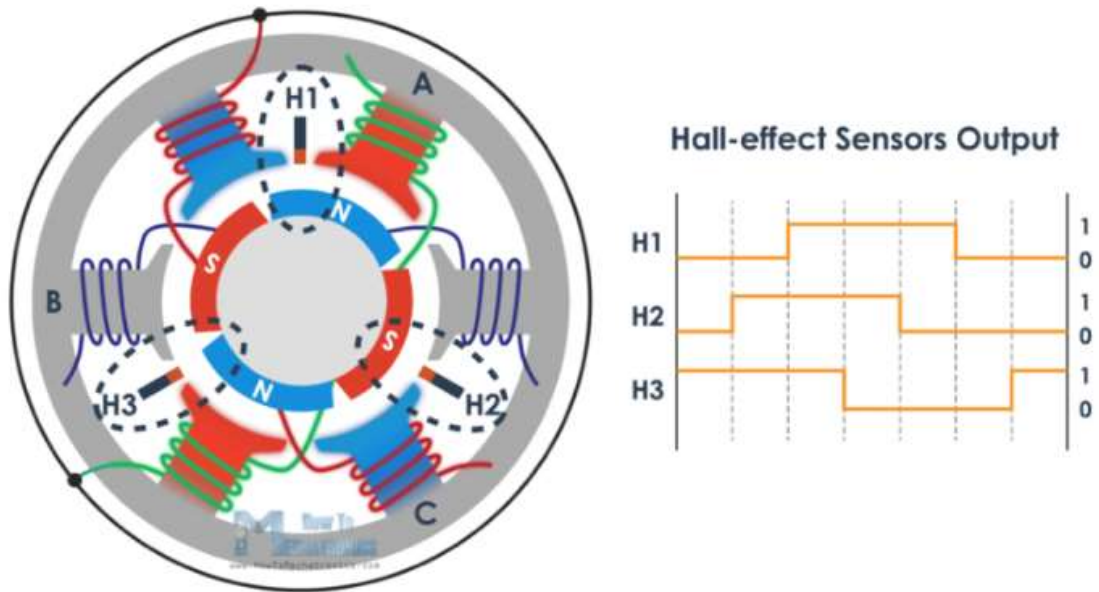
Harjastega mootori kontrollimiseks kasutatakse PWM signaali, mida genereerib siis kontroller. PWM-i idee on luua kindla sagedusega pulsid, mille tipud on vastavalt maksimaalne välja antav pinge. Pulse sagedusest ja pulsilaiusest olenevalt antakse edasi keskmine pinge või koormus [10] [11], mida on näha Joonis 1.4 peal.



Joonis 1.5 Harjadeta mootori juhtimise selgitus skeem [12]

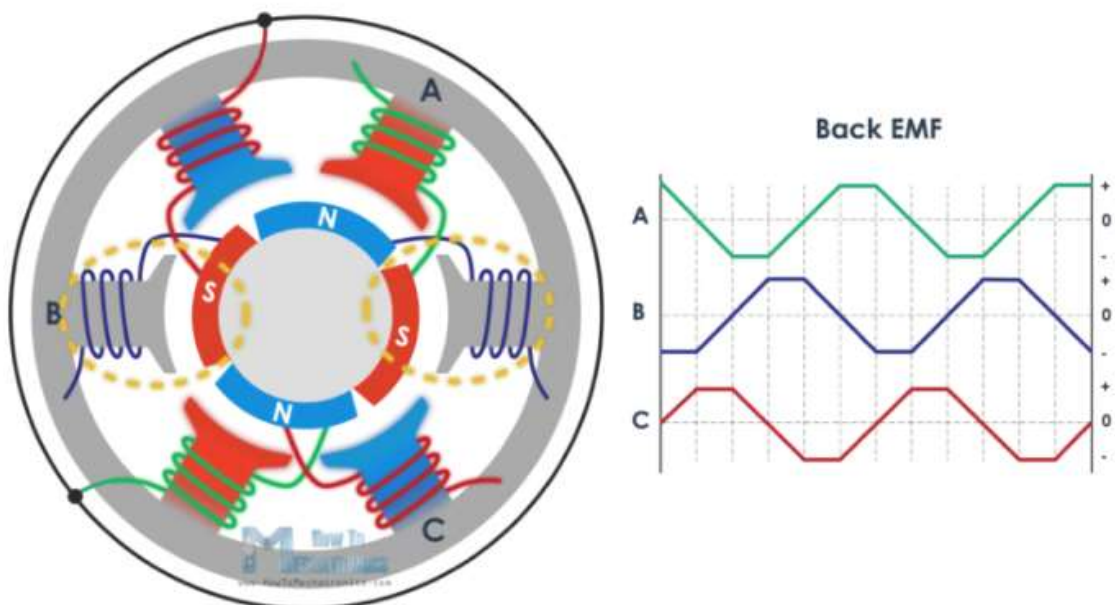
Harjadeta mootorite kontrollimiseks on suuremas pildis üks viis, kus vastavalt rootori asukohale ergutatakse erinevaid mähiseid, nagu on Joonis 1.5 peal näha. Rootori asukoha määramiseks on vähemalt kaks erinevat viisi, kas siis kasutatakse Hall-i sensoreid või vastassuunalist elektromagnetilist jõudu, mida möödab vastavalt ESC, ehk harjadeta mootori kontroller. Halli

sensorite olemasolul, loetakse sensorite väljundist välja rootori asukoht ja vastavalt sellele ergutatakse õiged mähised.



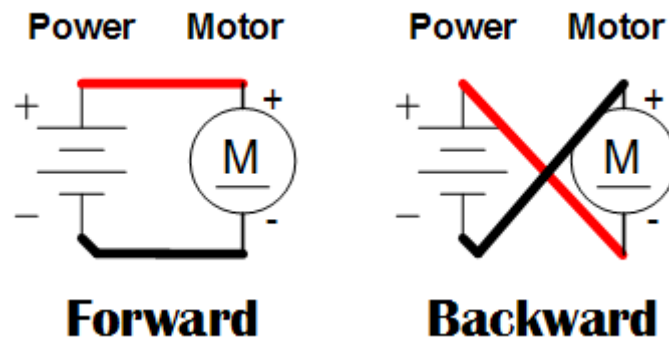
Joonis 1.6 Halli sensorite väljundi sõltuvus rootori asukohast [12]

Halli sensorite väljundite graafik on näha Joonis 1.6 peal, kolme sensori väljundiga saab piisavalt täpselt kindlaks määrata mootori asukoha. Halli sensorid on joonisel märgitud H1, H2 ja H3 märgistega



Joonis 1.7 Vastassuunalise elektromagneetilise jõu sõltuvus rootori asendist [12]

Teiseks varjandiks on kasutada ergutamata mähises genereeritavat voolu, et kindlaks teha rootori asend nagu on näha Joonis 1.7 peal, selle meetodi eeliseks on lisa elektroonika puudumine mootoris, kuid Halli sensoritega on mõõtmine kindlam ja eksisteerib vähem vigu mõõtmisel. Mootori juhtimisel on suuna vahetus vajalik kui soovida sõita ka tagurpidi, et mobiilsus oleks suurem ja saaks välja erinevatest situatsioonidest ilma, et peaks masinat liigutama.



Joonis 1.8 Alalisvoolumootori suuna muutmine [13]

Alalisvoolumootori reverseerimiseks tuleb muuta voolu suunda kas tema ankurmähises või ergutusmähises. Tavaliselt muudetakse ankruvoolu suunda, sest ankru-mähise väiksem induktiivsus kindlustab siirdetalitluse lühema kestvuse ja väldib ohtliku kommutatsioonilise ülepinge teket. Ankruvoolu suuna muutmiseks muudetakse polaarsust ankru klemmidel. Seda tavaliselt saavutatakse kahe relee abil nagu on näha Joonis 1.8.

Juhtimismuunduri või kontrolleri valiku parameetrik on valitud mootori parameetrid. Seega toon 3 kontrolleri valikut ainukesele mootorile millel ei ole veel kontrolleri kaasas.

Tabel 2 Juhtimismuunduri valikud koos negatiivsete ja positiivsete külgedega

Nr	Kontroller	Positiivne	Negatiivne	Hind ¹
1	KNACRO DC Speed Controller 9-55V 40A ²	Odav, lihtne konstruktsioon	Ühe suunaline juhtimine	5,67€
2	CCM6DS-B 12/24/36V 40A ³	Mitme suunaline juhtimine	Kiiruse muutmine ja suuna muutmine erinevate juhtmetega	12,6€
3	Bllinli DC 10-55V 60A PWM DC Controller ⁴	Mitmesuunaline juhtimine, DRO mootori võimuse jaoks	Kõrge hind	23,8€

Kõige ehituselt lihtsam muundur number 1 ei oma võimekust mitmesuunaliseks juhtimiseks. Kui teoreetiliselt on võimalik selline detail ka kontrolleri väliselt ehitada, siis iga lisa detail lisab kulusi ja muudab kogu süsteemi keerukamaks. Lõpuks valisin tabel 2 järgi kolmanda varjandi, mis pakkus suurimat vastupidavust voolule ja sellel oli ka digitaalne väljund, et näha väljund võimsust protsentides. See valik lihtsustas juhtimismuunduri lisamist, kuna ei pidanud lisama tagurdamist iseseisvalt, kui ka tänu sellele, et oli koha kaasas elektrooniline väljund mootori võimsusest.

1.5 Akupatarei valik

Akupatarei on vajalik masina iseseisvaks töötamiseks, ilma et sõiduks oleks ühendatud elektrivõrku. Akupatareide eeliseks tavaliste patareide ees on ka nende taaslaaditavus, ehk pärast akude tühjaks sõitmist võib kasutatud akud täis laadida ja kasutada uuesti. Tänapäeval on patareide areng kaugele jõudnud [14] ja on mitmeid erinevaid akupatarei tüüpe, mille vahel saab valida. Igal akupatareil on erinevad omadused, olenevalt olukorrast tuleb valida õige akupatarei, mis sobib antud olukorraga

¹ Seisuga 12.03.2019

² https://www.banggood.com/DC-9-55V-40A-2000W-PWM-DC-Motor-Pump-Speed-Regulator-High-Power-Speed-Controller-9V-12V-24V-36V-48V-p-1267454.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN#jsReviewsWrap

³ https://www.banggood.com/CCM6DS-B-40A-PWM-DC-Brush-Motor-Speed-Controller-12V24V36V-Speed-Switch-p-1327224.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN

⁴ https://www.amazon.co.uk/Bllinli-10-55V-Controller-Reversible-Switch/dp/B07P8TLYDF/ref=sr_1_11?keywords=brushed+dc+controller+36V&qid=1552405521&s=gateway&sr=8-11

kõige paremini kokku, järgnevalt võrdlen enimlevinud akupatarei tüüpe, milleks on Nikkel-Kaadmiimakud (NiCd), Nikkelmetallhüdroiidakud (NiMH), Liitiumioonakud (Li-ion) ja pliiakud. Tabeliseks võrdluseks kasutan mitmeid erinevaid näitajaid, mida selgitan siin. Energiatihedus näitab kui palju energiat on antud akupatarei ühes kaaluühikus [15], antud näites on energia mõõtühikuks vatt-tund ja kilogramm. Energiatihedus on tähtis valikuks, kui ruum või kaal on probleemiks. Teiseks omaduseks on iseeneslik tühjenemine, mis iseloomustab akupatareis akumulunud energia iseeneslikku kadumist ajajooksul. Iseeneslik tühjenemine on tähtsaks näitajaks, kui akud peavad pikka aega seisma laadimata, ning sellest hoolimata olema võimeline mingit aega töötama. Tühjenemine vähendab ka akude efektiivsust, kuna osa sisse antud energiast kaob ära, ilma et teeks kasulikku tööd. Akud koosnevad enamjaolt mitmetest jadamisi ja/või paralleelsest aku elemendist, et suurendada pinget ja mahutavust, selleks peab teadma ühe elemendi nominaalpinget [16]. Elutsüklid näitavad mitu korda võib antud akupatarei lasta tühjaks, ning seejärel uuesti täis laadida, enne kui aku nimi mahust on 80% alles. Kuna iga aku käitub natuke erinevalt ja eluiga sõltub tugevalt kasutusest, siis see näitaja on tootjate poolt antud ebatäpsalt, nii et pigem tuleb kasutada umbkaudse hindajana, kui täpse infona. Sellest hoolimata, läheb seda näitajat vaja, kui aku peab üle elama pidevat laadimist ja tühjenemist, näiteks kui kasutatakse akupatareid konstantselt energianõudlikus situatsioonis [17]. Viimaseks näitajaks on kasutegur, mis näitab kui palju sisseantud energiast saab akust välja, see näitaja on väga tähtis kui tahta kasutada kõige ökonoomsemat akut. Akupatareid valiku tegemisel ei tule kasutegurit väga jälgida, kuna energiatihedusega saab piisava info kätte, kuid aku tootmisel ja leiutamisel on kasutegur äärmiselt tähtis, kuna sellest olenevad mitmed muud tähtsad aku näitajad nagu energiatihedus ja ka elutsüklid. [14] [15]

Tabel 3 Akupatareide tüüpide võrdlus [14] [15]

Võrdluskriteerium	NiCd	NiMH	Li-ion	Pliiakud
Energiatihedus, Wh/kg	45-80	60-120	100-160	30-50
Iseeneslik tühjenemine, %/kuus	20	30	10	5
Nominaalne aku elemendi pinge, V	1,25	1,25	3,6	2
Elutsüklid	1500	300-500	300-1000	200-300
Kasutegur, %	60-70	~70	~95	75-85

Antud eesmärgiks, ehk elektrikartauto mootori toitmiseks vajalik aku valimisel saab ka kasutada loodud Tabel 3, kuna soovitud mahutavus ei ole väga suur ja juhi kaal koos masinaga on märgatavalt suurem kui potentsiaalne aku, siis energiatihedus ei ole väga tähtis muutuja akupatarei valikult. Iseeneslik tühjenemine võiks olla üsna madal, kuna isegi soodsate ilmade korral ei ole kindel, et elektrikartautoga sõidetakse tihti. Seega võiks pigem vaadata Li-ion ja pliiakude suunas, kuna nende iseeneslikud tühjenemised on märgatavalt väiksemad kui teistel võrreldud akupatareidel, nagu on näha Tabel 3. Nominaalsete elementide pingeid ei pea veel jälgima, tähtis on lihtsalt et valitud aku annaks piisavalt pinget välja, ning seda suudavad enamused teha. Ainukeseks erandiks võib olla pliiakud, mis enamjaolt on 12V, seega oleks vaja 3 tükki jadamisi panna, mis tekitab kaalu ja ruumiga probleeme. Elutsükkleid või tsüklite eluiga võiks olla pigem suurem, et niipea ei peaks hooldama või välja vahetama kasutatud akud, kuid kõikide näidatud akupatareide elutsükklid on piisavalt kõrged antud otstarbeks. Kasutegur muudab kogu masina elektrienergia kasutamise efektiivsust, ehk suurem on parem. Sellest hoolimata ei pea väiksema kasuteguriga akupatareisi kohe välja arvama.

Kokkuvõtteks on parimateks valikuteks on kas pliiakud või siis Li-ion tüüpi akupatareid. Kuna olen eelnevalt tegelenud Li-ion akudega, ning nad on head kerged ja ei tekita ruumi või kaalu probleeme, siis valin lõpuks Li-ion akud.

$$I = N/U \quad (1.12)$$

$$I = \frac{1000 \text{ W}}{36 \text{ V}} \approx 28 \text{ A}$$

Valitud mootori jaoks oleks vaja umbes 36V akut mis peaks vastu 28 amprilist voolu, mis on saadud tänu valemile 1.12, kuni 15 minutit, ehk veerand mida vajaks mootor terveks tunniks. Seega kardi aku mahtuvus peaks olema 7 Ah, seda juhul kui kogu aja sõidetakse täis kiirusel, tegelikkuses on piisav mahtuvus natuke väiksem. Nagu ka eelmistel komponentidel teen siia tabelikujul võrdluse

Tabel 4 Akupatarei valikute võrdlus.

Akupatarei parameetrid ja link	Positiivne	Negatiivne	Hind ¹
Turnigy nano.tech 5000mAh 8S ²	Koheselt piisava pingega, laadimine on lihtne protsess	Natuke madalam mahutavus kui tahetud, laadijad kallid	138,35€
2X Turnigy High Capacity 8000mAh 4S ³	Kõrge mahutavus	Vaja mitut akut jadaühenduses kasutada	111,76€
2X ZOP power 7000mAh 4S ⁴	Hea hind	Vähetundut firma, ning vajalik jadaühendus	89,3€

Valisin kõige suurema mahutavusega variandi, ehk kaks Turnigy 8000 mAh LiPo akut, mis tuleb ühendada jadamisi, et saavutada soovitud pinget. Akupatareide kogu pinget oleks laetud akude puhul umbes 33V, mis sai mõõdetud jadamisi ühendatud akupatareide pealt, see on natuke alla soovitud, kuid kuna elektrimootor suudab ka töötada madalamal pingel, ning valitud mootori võimsus on suurem kui oleks vajalik, siis natuke madalam pinget ei tekita märgatavaid probleeme lõpp tulemusel.



Joonis 1.9 Akude jadaühenduse kaabel

¹ Seisuga 12.03.2019

² https://hobbyking.com/en_us/turnigy-nano-tech-5000mah-8s-65-130c-lipo-pack-xt90.html

³ https://hobbyking.com/en_us/turnigy-high-capacity-battery-8000mah-4s-12c-drone-lipo-pack-xt90.html

⁴ https://www.banggood.com/ZOP-Power-14_8V-7000mah-40C-4S-Lipo-Battery-XT60-Plug-for-RC-Model-p-1328338.html?rmmds=category&cur_warehouse=CN

Akude jadaühenduseks jootsin kokku kaks aku konnektorit, ühendades kokku ühe aku positiivse klemmi teise aku negatiivsega, nagu on näha Joonis 1.9. Väljund pinge saab kahe aku ühendamata klemmidest.



Joonis 1.10 LiPo akupatareide laadija [16]

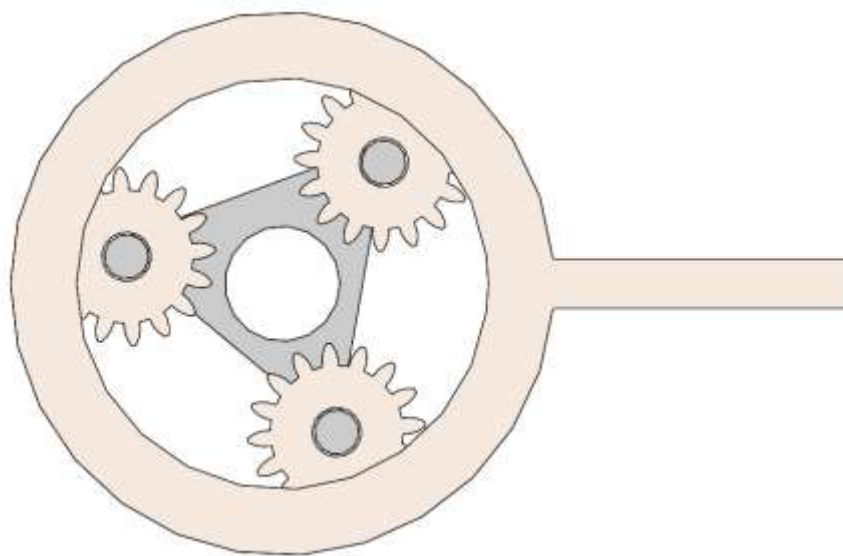
Akude kasutamise eesmärgiks on ka väga tähtis akude laadimine, ilma milleta ei saa laadida akusi pärast kasutamist. Laadimiseks kasutan Turnigy Accucell S60 AC laadijat, mida on näha Joonis 1.10, mis suudab küll ühte akut korraga laadida, kuid sellest hoolimata on laadija kompaktna ja piisavalt võimas. Veel on antud tootel olemas ka võimalus ühenduda arvutiga, et saaks rohkem infot aku tervise ja talitluse kohta. Laadimisprotsess on peale esmast ülesseadmist lihtsakoeline, kus laadimiseks peab ühendama kaks aku juhet laadija külge ja vajutama *start* nuppu.

1.6 Juhtimiskomponendid

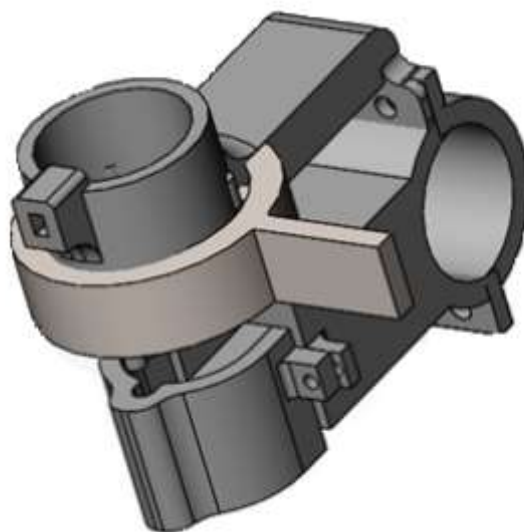
Elektrimasina juhtimiseks on vaja mingisugust kiirendus süsteemi. Üldiselt kasutatakse kahte erinevat gaasi tüüpi: jalagaasi ja käsigaasi. Jalagaasi eeliseks on see, et gaasi vajutamine ja juhtimine toimuvad erinevate jäsemetega mis vähendab tahtmatu kiirendamise võimalust. Selle lõputöö elektrikartauto on mõõtnemelt natuke liiga väike, et edukalt kasutada jalagaasi, sest katsetatud tavaolekus peab juhi jalg olema täisnurga all või isegi järsema nurga all. Selline jalaasetus ei luba kasutada kindlalt jalagaasi, mis võib tekitada ohtlikke olukordi. Käsigaasides on kaks suuremat võimalust, kas siis keeratava gaasiga või põidlagagaasiga. Parandatava kardi peal oli algselt keeratava gaasi tüübiga süsteem, kuid eelnevate kahjustuste tõttu ei olnud seda võimalik uuesti kasutada, ning otsustasin kasutada põidlagagaasi, mida on lihtsam lisada eksisteeriva süsteemi külge. Põidlagagaasil on ka üks suur ohutuse eelis keeratava gaasi ees, kuna järsul kiirendusel võib

kogenematu juht kalduda tahapoole istmel, siis keeratava käsigaasi puhul suureneb kiirendus kui juht tahapoole kaldub, kuid pöidlagaasi puhul seda ei juhtu. Seega ka ohutuse eesmärgil eelistan pöidlagaasi.

Elektrikartautol on peal juhtimiseks gaas, rool, suuna lüliti ja ka pidur. Gaasina kasutan B100K potentsiomeerit koos lülitiga, mis oli mootori kontrolleri peal. Potentsiomeetri pööramisega saab muuta mootori väljund võimsust, ning null kohas lülitub lüliti, mis lühistab mootori, rakendades seda kui elektrilist pidurit. Potentsiomeetri alg- ja lõpp positsiooni vaheline nurk oli üle 180 kraadi. Mis ei sobinud antud ülesandeks, kuna käsigaasi peaks olema võimalik pöörata täis võimsusele, ilma et vahepeal peaks käe asendit muutma



Joonis 1.11 Planetaar ülekanne potentsiomeetrile



Joonis 1.12 Isetehtud pöidlagaasi koostu 3D mudel

Selle probleemi lahendamiseks ehitasin planetaar ülekande, mille ülekande tegur on 3:1. Planetaar ülekande välis ringi külge kinnitasin juhtkangi, seda osa on näha Joonis 1.11 peal. Gaasi isetagastavuse saavutamiseks lisasin ka külge torsioonvedru, mis siis kindlustab, et gaasi lahti laskmisel naaseks gaas tagasi null positsiooni. Kogu see ehitus sai ka ühendatud masina juhtraua külge, ning umbkaudset koostut on näha Joonis 1.12. Kogu see ehitus sai välja 3D printitud PLA tüüpi plastikust, kinnituseks sai kasutatud poltliidet. Roolina töötab kartauto algne juhtraud piisavalt hästi, ning pärast mehaanilist puhastust oli see sobilik uuesti kasutamiseks.



Joonis 1.13 Liikumise suuna vahetus lüliti [17]

Suuna vahetamiseks oli mootori muunduril kohe kaasas lüliti, millel on kolm erinevat asendit, nagu on näha Joonis 1.13. Null asendis ei liigu masin, edasi liikumiseks peab panema lüliti ühe kriipsuga asendisse ja tagurdamiseks teises suunas lüliti liigutama. See lüliti sai paigutatud elektroonika kasti korpuse pealmisele osale, mis asub sõitja istme all. Selline asetus kindlustab, et keegi ei saa kogemata alustada masinat tahtmatult, ning veel aitab see kaasa, et keegi ei prooviks sõidu ajal suunda muuta või lüliti abil pidurdada. Mõlemad sündmused võivad potentsiaalselt tekitada vigastusi elektrikartauto elektroonikale, kuna selline tegevus on väga koormav elektroonikale.



Joonis 1.14 Elektrikartauto pidur

Viimaseks juhtimiskomponendiks on pidur, mis on Joonis 1.14 peal näha. See lahendati elektroonilise piduriga. Potentsiomeetri lüliti juhtmed jootsin lahti ja ühendasin piduri lüliti külge. Tänu sellele modifikatsioonile saab kasutada masinal olevat pidurit ka päriselt pidurdamiseks. Elektrooniline pidur töötab edukalt kõikidel kiirustel. Ainuke erinevus on madalatel kiirustel, kus elektrooniline pidur ei suuda väga edukalt kiirust täiesti nulli viia, katsetamise käigus saab järgi uurida, kas kiirus on piisavalt madal pärast pidurdamist.

1.7 Tagasisideandurid

Kõige tähtsamaks tagasiside signaaliks on mootori väljund võimsus, mida saab otse mootori muundurist välja tuleva seitsme segmendilise kuvari pealt, mida on näha Joonis 1.15 peal. Mootori võimsuse järgi saab kindlustada ohutuse eesmärgil, et masinat käima pannes ei teki järsku kiirendust, mis võib tekkida, kui eelnevast kasutusest on jäänud mootorile võimsus peale. Veel sobib ka kuvar ka kiirusenäidiku rolli, kuigi kiirust see ei näita, saab tänu kuvarile teada, kui suur osa maksimaalsest võimsusest on kasutuses, ehk kui palju saab veel kiirust suurendada



Joonis 1.15 Seitsme segmendiline kuvar mootori võimsuseks



Joonis 1.16 LiPo akude pingemõõduri näide [18]

Akude pingetagasisidemeks ühendan mõlema aku külge LiPo pingemõõduri, mille välimust on näha ka Joonis 1.16, sellised andurid võivad näidata aku ja tema üksikute elementide pinget, kuid eksisteerib ka variante, kus andur ei näita neid pingeid. Tagasisideks on anduril väikesed kõlarid, mis hakkavad valjult piiksuma, kui aku või tema üksiku elemendi pingelangeb alla ettemääratud piiri. Selle hääle järgi saab otsustada, kus vajavad akud laadimist ja peaks lõpetama masina kasutamist. Selline lahendus lisab lihtsasti märgatava teavituse, kui akud vajavad laadimist, ilma et lisaks palju elektroonikat, mis muudaks kogu lahendust liialt keeruliseks.

Rohkem tagasisideme andureid ei leia et oleks vaja, kuna väljundvõimsus annab piisava info mootori kohta ja teine tähtis näitaja võiks olla mootori, akude ja kontrolleri temperatuur. Kuid kuna mootor asetseb välitingimuses ja elektroonika kasti ehitab vastavalt sedasi, et õhu läbikäik oleks lubatud ja ülekuumenemise ohtu ei oleks.

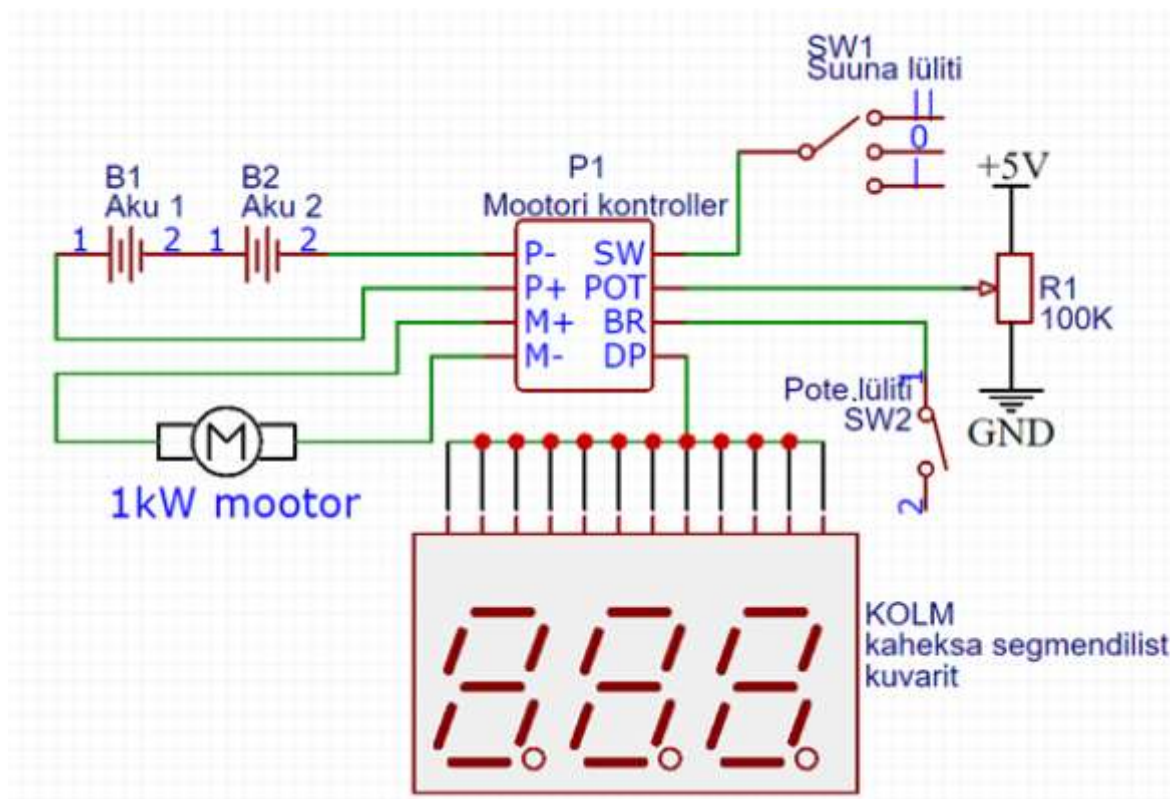
2 ELEKTRIKARTAUTO EHITUS

Ehituse esimeses etapis katsetati igat komponenti eraldi, et kindlustada nende töötamise. TTÜ Robotiklubi toiteplokki abil sai proovitud mootorit erinevate pingete juures. Järgmisena tesitit mootori muundurit, rakendades sellele kasutatava veomootori ning pingeallikaks eelmainitud toiteploki. Testimisel ajal ei märgatud defekte ning muundur töötas ootuspäraselt. Katsetatud sai tavakasutus, suuna muutmise, äkk pidurdus kui ka äärmuslikud olukorrad, kus mootoriga pidurdus toimus maksimaalse mootori võimsuse juures.

2.1 Elektrikartauto elektroonika

Ehituse teises etapis oli vaja kindlustada, et kõik juhtmed oleksid piisavalt pikad ja ulatuksid soovitud kaugustele. Peamiselt vajasis pikendust juhtmed muundurist käsigaasini ja pidurini. Muunduri kontrollivast potentsiomeetrist jootsin lahti lüliti juhtmed ja ühendasin need juhtraua küljes oleva pidurihoova külge, et pidurdus oleks eraldatud käsigaasist.

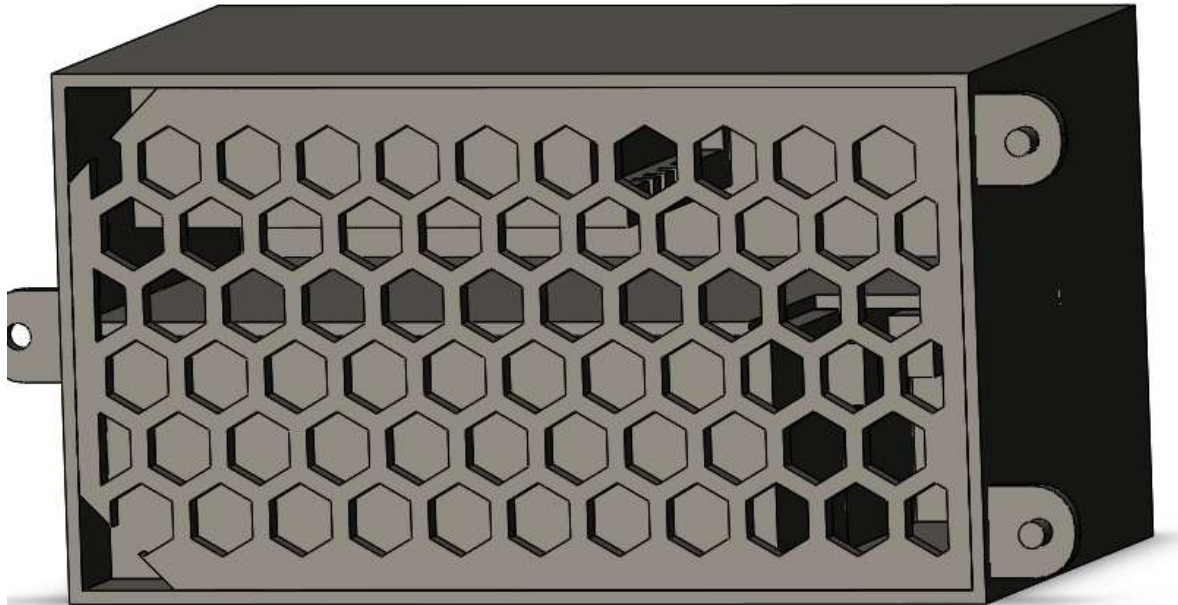
Käsigaasi testimiseks tein ka kiirelt prototüüp lahenduse, mis muutis potentsiomeetri kasutatavaks käsigaasiks.



Joonis 2.1 Elektroonika skeem

Kogu elektroonika skeemi sai pandud Joonis 2.1 peale, kahjuks kuna muunduri enda elektriskeemi ei suutnud leida, siis kontrolleri sisesed ühendused tegin mitte täielikult. Nendeks olid suuna lüliti, joonisel SW1, mis on kontrollerial ühendatud SW konnektorisse, mille täpset ühendust elektroonikaga ei saa näha, sellest hoolimata saab üsna kindlalt väita tänu kolmele väljundile, mida on näha Joonis 1.13, et tegu on kahe suunalise lülitiga, millel on olemas ka neutraal seisund, kus ühtegi ühendust ei ole, seda väidet kinnitas ka katsetus, kui multimeetriga uurida ühendusi erinevate lüliti asendite puhul. Teiseks osaliselt tundmatuks ühenduseks oli potentsiomeeter, skeemil R1, mis on ühendatud POT ühendusse kontrollerial, kuid potentsiomeetri peal olevate märgiste järgi sai teada, et see on B100K, ehk siis 100k Ω kogu takistusega potentsiomeeter, ning katsetamise käigus sai teada, et potentsiomeetrile rakendatakse 5V ja loetakse keskmise konnektori väljund pinget ning selle pinge järgi muudetakse mootorile rakendatav võimsus. Potentsiomeetril oli ka sees lüliti, mis lülitus kinnisesse asendisse, kui potentsiomeeter oli algpositsioonist kõrgemale pööratud. Viimane täpselt teadmata ühendus oli kolm kaheksa segmendilist näidikut ühe kuvari peal, mis näitab kui mitu protsenti maksimaalsest võimsusest on kasutusel. Selle näidiku juhtmeid oleks vaja pikendada ja ühendada juhtraua külge, et lihtsasti nähtavas kohas oleks näha relatiivset kiirust maksimaalsele kiirusele.

Elektroonika kast vajab ka komponentide hoidmiseks oma süsteemi. Kokku lähevad kasti sisse kaks akut ja mootori kontrolleri. Mootori kontrolleri ühendan poltide või kahepoolse teibiga kasti lakke, ning akud lähevad kasti põhja. Akupatareide liikumist takistab plaat, mis eraldab akusi ja kontrolleri, ning kärjestiilis plaat mis kindlustab, et akud välja ei kukuks kastist, ning et kastile ei oleks ligipääs igal isikul. Kärjestiili valisin, et oleks õhu läbipääs tagatud kastile, mis omakorda aitab kaasa ülekuumenemise ärahoidmisele, kuid aukudest hoolimata on kärögstruktuur ikkagi väga tugev struktuuri liik, tänu millele saan olla kindel kogu plaadi tugevuses.



Joonis 2.2 Modelleeritud kast koos lihtsustatud elementidega

Joonis 2.2 peal on näha elektroonika kasti koostu 3D mudelit, mudelilt on puudu juhtmed ja ka mõned augud, mis päris kastil ja komponentidel on, kuid mudeli lihtsuste tõttu ei lisanud neid.



Joonis 2.3 Komplekteeritud elektroonika kast

Joonis 2.3 peal saab näha komplekteeritud kasti kõikide prinditud plaatidega, mis hoiavad detaile paigal. Esiplaat fikseeritakse kahe poldiga, ning viimane kinnitus asub kasti kinnituseks mõeldud augus plaadist välja ulatuva plastikust osaga. Selline kinnitus annab piisavalt vastupidavust, et

akupatareid ei kukuks välja sõidu ajal, kuid on ikkagi piisavalt lihtne eemaldada, et peale igat sõitu saaks lahti teha ja lihtsalt eemaldada laadimist vajavad akud.

2.2 Elektrikartauto mehaanika



Joonis 2.4 Mootori paigutus elektrikart autol

Mootori paigutus on elektrikartauto tagumises osas, istme all nagu on näha Joonis 2.4. Mootor annab oma võimsuse edasi vedavale võllile tänu kettülekandele



Joonis 2.5 Elektrikartauto, 1 – elektrimootor, 2 – elektroonika kast, 3 - pidur

Joonis 2.5 peal on näha kokkupandud masinat, kus on elektroonika ja mehaanika ühendatud. Sellel maal on kart valmis sõiduks, ning valmis katsetamiseks.

3 KATSETAMINE

3.1 Katsetuste teooria

Tööstuses katsetatakse sõidukite käitumist erinevate kiiruste ja võimsuste peal, et saavutada parim nägemus sõiduki käitumisest. Sellise katsetusega saab teada lihtsalt ja kindlalt kuidas sõiduk käitub [23], kuid selle lõputöö raames ei olnud võimalik ega otstarbekas elektrikartautoga läbida sellist katsesükklit. Tööstuslike testide asemel läbis elektrikartauto komponentide tasemel katsetamist, läbi mille sai kindlustada, et iga komponent töötab ootuspäraselt, ning pärast monteerimist läbis sõiduk mõned elulised katsetused.

3.2 Elektrikartauto katsetused

Suuna vahetus lüliti testimiseks kõigis kolmes asendis kasutasin multimeetri ühenduse kontrollimise funktsiooni, sain teada et keskmises asendis ei ole ükski ühendus ühendatud, ning vastavalt mõlema poole korral olid alla vajutatud poole vastaspoole konnektoril ühendus keskmise konnektoriga.



Joonis 3.1 Mootori võimsust juhtiv potentsiomeeter [17]

Potentsiomeetri katsetamiseks lugesin esiteks alumist kahte konnektorit, mida võib näha Joonis 3.1 peal, algpositsioonist välja keerates oli kuulda potentsiomeetri seest heli, ning neid samu alumis konnektorite takistust mõõtes sai kinnitatud, et need on potentsiomeetri sisemise lüliti väljund konnektorid. Teiseks mõõtmiseks olid kogu potentsiomeetri takistuse mõõtmine, mida sai kolme konnektori välimiste ühenduste mõõtmisest. Tulemuseks sain 95.6 k Ω , mis on natuke vähem kui lubatud 100 k Ω , kuid on ilusasti $\pm 10\%$ varu sees. Kogu potentsiomeetrit kasutati pingejagurina. Selle sai teada, kui mõõta potentsiomeetrile peale tulevat pinget kui kogu kontrolleri oli toitesse

ühendatud. Potentsiomeetri välimiste konnektorite vahel sai mõõdetud pingeks 5V ja keskmise konnektori väljund pinge äärmiste suhtes muutus olenevalt potentsiomeetri asukohast.

Esimene katse toimus Tallinna Tehnika ülikooli kuuenda korpuse garaažis, kus kergemakaaluline isik, kes kaalus umbes 60kg, proovis sõita masinaga. Katse tulemusena nägime, et tervik lahendus suudab ka edukalt kiirendada, pidurdada ja ka väiksemast nõlvast üles ja alla sõita. Seega mootori võimsus ei saanud valitud liiga madal.

Lühikese katse järel sai ka üle kontrollitud akude pinge, mis andis infot akude järelejäänud mahust. Kogu katsetus kestis ligikaudu 10 minutit, mille järel oli akude elementide pinge langenud algse 4.2V pingest pealt 4.05V peale, mis küll täpset infot ei anna aku mahutatavuse kohta, kuid näitab et piisavalt aku energiat on järel. Järgmise testiga prooviti akusi rohkem koormata, et saada rohkem infot võimalikust sõiduajast.

Katsetatud sai ka pidurdus erinevatel kiirustel, mis oli tähtis, et kindlustada elektroonilise piduri töötamine kõikidel kiirustel. Madalatel kiirustel jäi masin peaaegu täielikult seisma, alla inimese tavakõnni kiiruse, kuid täielikuks seismajäämiseks võis natuke aega võtta. Õnneks kiiruse suuruse tõttu ei olnud pidurdustekond alla meetri, mis on rahuldatav. Keskmise kiiruse, ehk umbes 10km/h peal osutus elektrooniline pidur edukaks, ning masin jäi kiiresti seisma. Viimaseks sisetingimuste testiks sai proovitud pidurdamine kaldteest alla liikumisel. Pidurdamine vähendas kiirust märgatavalt alla liikumisel, kuid täielik seismajääk ei juhtunud. Järgmises katses prooviti sama asja välistingimustes, kus maapind ei ole nii sirge, ehk takistus on suurem, kui pidurdatud kiirus on ikka liiga suur ka välis tingimustes, siis potentsiaalselt peab uurima mehaanilise piduri lisamist.

Välis tingimustes katsetades sai masin edukalt hakkama täiskiirustel sõitmisega ja ka suurte kiirustel pidurdamisega. Kiirus ületas jooksukiirust ja pidurdamismaa oli alla 10 meetri. Välistingimustel sai ka katsetatud maastikul sõitmist, mis osutus ebamugavaks, kuid kartauto liikus edukalt muldkattega küngastest üles ja alla. Katsetades 45 kraadisest kallakust alla sõitmist pidurdas mootor kogu masina kiiruse kõndimiskiiruse peale, mis oli piisavalt väike, et lisa pidureid ei peaks lisama.

KOKKUVÕTE

Elektrisõidukeid on tänapäeval mitmeid erinevaid, alates elektri vormelitest ja lõpetades motoriseeritud jalgrattastega. Kõikides sellistes sõidukites on olemas elektrimootor, juhtimismuundur ja mingisugune energia allikas, milleks on tavapärastel akupatarei. Täpselt neid samu detaile oli ka antud elektrikartautol puudu. Pärast elektrikartauto probleemide ja puudujääkide hindamist sai hakata otsima puudujäävaid elektroonika osi. Nende valimiseks ja otsustamiseks arvutasin algandmetest välja mitmed lisa näitajad, mille abil sai valitud vajalikud detailid. Elektroonika detailide saabumisel sai läbi viidud elektroonika komponentide tasemel testimine, et kindlustada kõikide osade töötamise ja sobilikuse antud eesmärkideks, sellest protsessist leiab ülevaate KATSETAMINE peatükis. Katsetamine andis positiivse tulemuse ja kõik detailid töötasid rahuldavalt. Pärast seda algas ehitus protsess, kus hakkas projekti monteerimis osa. Üksteise vahelist ühendamist vajasis uus mootor, juhtimismuundur, akupatareid ja juhtimiskomponent. Juhtimiskomponendi kasutatavaks tegemiseks projekteeriti mehaaniline lahendus. Projekteeritud lahendus realselt rakendatuna ei töötanud ootuspärastel, seega tasub ostutoote kasutuselevõttu kaaluda. Akupatareide ühendamine vajab väikest lisa detaili, mille pidin kokku jootma, kuid selle probleemi eemaldamise järel oli ka akusi lihtne ühendada olemasolevasse süsteemi. Elektroonika pakiti plastmassist korpuse sisse. Töö käigus lisati sellele akusi ja elektroonikat eraldav vahesein ning kaas. Pärast ehitamisfaasi katsetati elektrikartautot tervikuna. Kogu süsteemi katsetamiseks sõideti masinaga kahes olukorras. Esimene sõit toimus Tallinna Tehnikaülikooli kuuenda korpuse keldris, kus sai üle kontrollitud mootori võime karti koos juhiga ringi liigutada edukalt, pidurdamine erinevatel kiirustel kui ka akude kestvus. Kart koos juhiga suutis liikuda üles kergest kaldest kui ka saavutada keskmisi kiirusi lühikese ajaga, mis tegi kindlaks, et valitud mootor oli piisavalt võimas. Pidurdamise katsetamiseks sai proovitud seismajääk erinevate kiiruste pealt kasutades elektroonilist pidurit, kõik testid andsid positiivse tulemuse, välja arvatud kaldest alla sõit, kuna seismajääki ei toimunud ja jääk kiirus oli küll väike, kuid sellest hoolimata isiklikult oleks soovinud veel väiksemat kiirust, välis tingimustes katse võib anda parema ja reaalsema tulemuse. Akude kestvuse tulemuseks sain, et 10 minutilise ebaregulaarse sõiduga kaotasid akupatareid olematu osa oma kogu voolu mahust. Teine suurem katse toimus välis tingimustes kus sõideti üle 15 minuti ja katsetati täis kiirusel sõitmist ja 45 kraadise nõlvaku pealt alla sõitmisel pidurite rakendumist. 15 minutisel sõidul olid akud rahuldava pinge suurusel ja oleks saanud veel edasi sõita. Pidurdamine nõlvast alla andis rahuldava tulemuse, kuna kiirus oli kõndimiskiirusest madalam.

Lõputöö tulemusel sai antud elektrikartauto raamistik muudetud sõiduvõimeliseks masinaks tänu lõputöö raamis tehtud muudatustele. Lõppprodukt vastas ka algandmetele. Kahjuks tekkisid elektrikartautole mehaanilised limitatsioonid, mis avastati hilises ehitamise faasis, seega ei ole võimalik kasutada karti täis võimsusel, ilma et tekkiks oht kogu raami lagunemisele.

Järelduseks võiksin öelda, et kui komponentide tasemel uurida ja katsetada, siis annab edukalt parandada elektrikartautosi.

Summary

There are many different types of electric vehicles today, ranging from electric formulas to motorized bicycles. All such vehicles have an electric motor, a controller, and some kind of energy source, typically a battery. Exactly the same details were missing in this electric cart. After evaluating the problems and shortcomings of the electric cart, it was possible to start looking for missing electronic parts. For selecting and deciding on what to choose, I calculated a number of additional indicators from the source data that helped in selecting the necessary electronics. Upon receiving the ordered components, it was time to start component level testing, which was carried out to ensure that all parts work and fit for the intended purposes, an overview of which can be found in the testing chapter. Testing gave a positive result and all the components worked satisfactorily. After that, the construction process started. The assembly needed a new engine, a motor controller, battery packs and a control component. The attachment of the engine was easier than the other parts, because the selected engine had only two outputs, but there were difficulties in connecting the controller and the control component, as the existing control component worked well but was not suitable for the control of the electric cart, I had to design a quick mechanical solution to make it work. In the future, my solution would need to be replaced with proper electrical thumb gas, but the problem was discovered in the late construction phase, and there was no time to solve the problem in this thesis. Connecting battery packs needed a little extra component that I had to solder together, but after removing this problem, the batteries could easily be connected to the existing system. Most of the electronics were in the electronics box, which existed before, but needed some extra details, over the course of the construction a door was added to the box and a plastic sheet, that held the battery packs in place. After the construction phase, the entire electric cart could be tested. For testing the entire system, the machine was driven in two situations. The first ride took place in the cellar of the Tallinn University of Technology, where we were able to test the carts ability to drive the cart with the muundur, braking at different speeds, and the battery life. The kart with the muundur was able to move up from a light slope as well as it was able achieve average speeds in a short time frame that determined that the selected engine was powerful enough. For testing the braking system, cart was stopped at various speeds using an electronic brake, all the tests gave a positive result, except for the downhill ride, because cart didn't stop completely and the residual speed was small, but personally would have preferred a lower residual speed, the test can be done under external conditions to receive a better and more realistic result. As a result of battery life test, I found that with a 10-minute irregular ride, the battery packs were almost full. Another major experiment took place in an external environment where te driving

lasted for more than 15 minutes and driving at full speed and braking on a 45-degree slope were tested. In the 15-minute drive, the batteries were of a satisfactory voltage and could still be used for driving. Braking down the slope gave a satisfactory result as the speed was lower than the walking speed of a human.

As a result of the thesis, the framework of this electric cart was transformed into a capable machine due to the changes made. The final product also responded to the original data. Unfortunately, the mechanical cart was subjected to mechanical limitations that were discovered in the late construction phase, so it is not possible to use the cart at full capacity without the risk of the entire frame breaking down.

Kasutatud kirjanduse loetelu

- [1] AutoStory, „First Electric Car,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.automostory.com/first-electric-car.htm>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [2] R. Irle, „Global EV Sales for 2018 - Final Results,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [3] J. Vincent, „THE UNIWHEEL IS ANOTHER RIDEABLE THAT'S MORE OSTENTATIOUS THAN PRACTICAL,“ 10 detsember 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.theverge.com/2015/12/10/9886348/uniwheel-electric-unicycle-rideable-hands-on>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [4] Engineering ToolBox, „Angular Motion - Power and Torque,“ 2008. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/angular-velocity-acceleration-power-torque-d_1397.html. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [5] S. Hanley, „Electric Car Myth Buster - Efficiency,“ 10 märts 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://cleantechnica.com/2018/03/10/electric-car-myth-buster-efficiency/>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [6] E. Apostolaki-Iosifidou, P. Codani ja W. Kempton, „Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging,“ 1 märts 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/314301528_Measurement_of_power_loss_during_electric_vehicle_charging_and_discharging. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [7] Think RC, „Brushed vs Brushless Motors,“ JP Commerce, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.thinkrc.com/faq/brushless-motors.php>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [8] Ohio Electric Motors, „Brushless DC Motors Used in Industrial Applications,“ 22 oktoober 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.webcitation.org/6C1OYfgb2>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [9] M. Dirjish, „What's The Difference Between Brush DC And Brushless DC Motors,“ 16 veebruar 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.electronicdesign.com/electromechanical/what-s-difference-between-brush-dc-and-brushless-dc-motors>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [10] W. Storr, „Pulse Width Modulation,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/pulse-width-modulation.html>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [11] J. Heath, „PWM: Pulse Width Modulation: What is it and how does it work,“ 4 aprill 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analogictips.com/pulse-width-modulation-pwm/>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [12] Dejan, „How Brushless Motor and ESC Work,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [13] D. Cook, „Simplest Method to Make a Motor Turn Off, Turn On, Go Forwards, and Go Backwards,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.robotroom.com/DPDT-Bidirectional-Motor-Switch.html>. [Kasutatud 8 mai 2019].

- [14] C.-X. Zuab ja H. Li, „Thermodynamic analysis on energy densities of batteries,“ *Energy & Environmental Science*, nr 8, pp. 2593-3076, 2011.
- [15] J. Donev, „Energy Education - Energy density,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy_density. [Kasutatud 9 mai 2019].
- [16] Samsung, „The Composition of EV Batteries: Cells? Modules? Packs? Let’s Understand Properly!“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.samsungdi.com/column/technology/detail/54344.html>. [Kasutatud 9 mai 2019].
- [17] Cadex Electronics, „How to Prolong Lithium-based Batteries,“ 8 veebruar 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries. [Kasutatud 9 mai 2019].
- [18] Cadex Electronics, „What's the Best Battery,“ 21 märts 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [19] K. Jõgisaar, „Patareide ja akude tüübid,“ 12 november 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://bioneer.ee/patareide-ja-akude-t%C3%BC%C3%BCbid>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [20] HobbyKing, [Võrgumaterjal]. Available: https://hobbyking.com/en_us/accuell-s60-ac-charger-eu-plug.html. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [21] [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.amazon.co.uk/Bllinli-10-55V-Controller-Reversible-Switch/dp/B07P8TLYDF/>. [Kasutatud 8 mai 2019].
- [22] HobbyKing, [Võrgumaterjal]. Available: https://hobbyking.com/en_us/hobbykingtm-lipo-voltage-checker-2s-8s.html. [Kasutatud 8 mai 2018].
- [23] „ISO 8178,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/iso8178.php>. [Kasutatud 21 mai 2019].

Lisa 1 Valitud toodete ostukohad

Tabel 5 Valitud toodete hinnad ja ostukohad

Komponent	Mudel	Link	Hind ¹
Akupatarei	Turnigy High Capacity 8000mAh 4S 12C Lipo Pack w/XT90	https://hobbyking.com/en_us/turnigy-high-capacity-battery-8000mah-4s-12c-drone-lipo-pack-xt90.html	56,49€
Aku laadimissüsteem	Turnigy Accucell S60 AC Charger	https://hobbyking.com/en_us/accuell-s60-ac-charger-eu-plug.html	30,87€
Mootor	MY1020 36V 1000W	https://www.amazon.de/dp/B00NWAS39K/ref=sspa_dk_detail_4?psc=1&pd_rd_i=B00NWAS39K	84,99€
Juhtimismuundur	Bllinli DC Motor Speed Controller	https://www.amazon.co.uk/Bllinli-10-55V-Controller-Reversible-Switch/dp/B07P8TLYDF	12,93€

¹ Seisuga 21.05.2019